



Analogová elektronika

KI/AEL

**doc. RNDr. František Fiala, CSc.
RNDr. Jan Krejčí, Ph.D.**



Ústí nad Labem 2016

- Kurz:** Analogová elektronika
- Obor:** Informační systémy, Informatika (dvouoborové studium).
- Klíčová slova:** Kondenzátor, cívka, odpor, kapacita, indukčnost, diody, tranzistory, klopné obvody, operační zesilovač
- Anotace:** Kurz je zaměřen na používání základních obvodových prvků v aplikacích s polovodičovými diodami, tranzistory a analogovými integrovanými obvody. Získané teoretické poznatky jsou ověřovány a procvičovány na konkrétních úlohách. Studenti na základě samostatných zkušeností získají hlubší průnik do podstaty činnosti zmíněných polovodičových součástek v praxi.

Jazyková korektura nebyla provedena, za jazykovou stránku odpovídá autor.

Úvodní slovo

Kurz spadá do kategorie H-17(Z) a má tedy hodinovou dotaci ve struktuře

- Tutoriál: 2 hodiny
- Laboratorní cvičení: 3 × 4 hodiny
- Skupinová konzultace: 3 × 1 hodina

Kurz je zaměřen na používání základních obvodových prvků v aplikacích s polovodičovými diodami, tranzistory a analogovými integrovanými obvody. Získané teoretické poznatky jsou ověřovány a procvičovány na konkrétních úlohách. Studenti na základě samostatných zkušeností získají hlubší průnik do podstaty činnosti zmíněných polovodičových součástek v praxi.

Zkouška se skládá z písemného testu a z praktické zkoušky.

- Písemný test se skládá z otázek odpovídajících sylabu kurzu

bodové hodnocení	známka
100 % – 91 %	1
90 % – 81 %	2
80 % – 71 %	3
70 % – 0 %	4

- Praktická zkouška
 - student losuje 2 otázky
 - student losuje znovu pokud jsou otázky ve stejné tématické oblasti
 - min. 60 minut samostatné přípravy
 - odpovědi hodnoceny známkami 1-4
- výsledná známka jejich celkovým zhodnocením dílčích hodnocení
- zkouška je považována za neúspěšnou, pokud je student hodnocen stupněm 4 z jakékoli části

Pro tento kurz byla v roce 2015 vypracována skripta v rámci projektu „Univerzitní centrum podpory pro studenty se specifickými vzdělávacími potřebami“ realizovaném na Univerzitě J. E. Purkyně v Ústí nad Labem. Skripta jsou s drobnými úpravami součástí této studijní opory. V textu skript tak student nalezne nejen teoretické znalosti k jednotlivým oblastem studia, ale také praktické úkoly a laboratorní experimenty.

Příklad písemného testu

Maximální počet bodů za správně vypracovanou otázku je uveden v závorce. Celkový maximální počet bodů je 40.

1. Jaký vztah platí pro výsledný odpor paralelního zapojení dvou rezistorů? (1)
2. Proč se žárovka rozsvítí okamžitě ačkoli se elektrony nepohybují rychlostí světla? (1)
3. Jaký je odpor žárovky, kterou při napětí $U = 220 \text{ V}$ protéká proud $I = 5 \text{ A}$? (2)
4. Co je to relativní permitivita dielektrika? (1)
5. Vyslovte indukční zákon. (1)
6. Cívka s ohmickým odporem $R = 157 \Omega$ a s vlastní indukčností $L = 0,5 \text{ H}$ je připojena k síti $U_{ef} = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Určete
 - (a) impedanci cívky (2)
 - (b) fázový posun mezi svorkovým napětím a proudem v cívce (2)
 - (c) proud v cívce (2)
 - (d) indukované elektromotorické napětí (2)
 - (e) úbytek napětí na ohmickém odporu (2)
 - (f) sestrojte vektorový diagram napětí (2)
7. Nakreslete schéma voltampérové charakteristiky polovodičové diody. (2)

8. Nakreslete schéma dvoucestného usměrňovače v můstkovém Grätzově zapojení. (3)



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Univerzitní centrum podpory
pro studenty se specifickými vzdělávacími potřebami
CZ.1.07/2.2.00/29.0023

ANALOGOVÁ ELEKTRONIKA

verze pro slabozraké

KI/AEL

Jan Krejčí
František Fiala

Ústí nad Labem 2015

Obor: Informační systémy, Informatika (dvouoborové), Informatika se zaměřením na vzdělávání.

Klíčová slova: Elektronika, odpor, resistor, cívka, kondenzátor, dioda, tranzistor, operační zesilovač.

Anotace: Kurz je zaměřen na používání základních obvodových prvků v aplikacích s polovodičovými diodami, tranzistory a analogovými integrovanými obvody. Získané teoretické poznatky jsou ověřovány a procvičovány na konkrétních úlohách. Studenti na základě samostatných zkušeností získají hlubší průnik do podstaty činnosti zmíněných polovodičových součástek v praxi.

Projekt „Univerzitní centrum podpory pro studenty se specifickými vzdělávacími potřebami“

Registrační číslo projektu: CZ.1.07/2.2.00/29.0023

Tento projekt byl podpořen z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky.

© UCP UJEP v Ústí nad Labem, 2015

Autor: RNDr. Jan Krejčí, Ph.D.
doc. RNDr. František Fiala

Při sazbě byl použit open-source řez písma *Tiresias LP* určený primárně pro slabozraké.
Bližší informace viz http://www.tiresias.org/fonts/lpfont/about_lp.htm.
© 2009, The Royal National Institute for the Blind

Sylabus

1. Kondenzátory, cívky, rezistory v elektronických obvodech
2. Měření kapacity, indukčnosti a odporu
3. Polovodičové diody – přechod PN, voltampérové charakteristiky
4. Jednocestný a dvoucestný usměrňovač – Grätzovo zapojení
5. Tranzistory typu NPN a PNP – měření charakteristik
6. Nastavení pracovního bodu – použití Kirchhoffových zákonů
7. Hybridní čtyřpólové rovnice, napěťový nízkofrekvenční zesilovač, měření zesílení pomocí osciloskopu
8. Tranzistor ve spínacím režimu
9. Klopné obvody s tranzistory – bistabilní, monostabilní a astabilní klopný obvod
10. Operační zesilovače – základní pojmy
11. Invertující zesilovač s operačními zesilovači
12. Neinvertující zesilovač s operačními zesilovači

Výstupy

Znalosti

1. Studenti umí určit základní vlastnosti polovodičových diod, tranzistorů a operačních zesilovačů.
2. Studenti umí určit základní aplikace s polovodičovými diodami, tranzistory a operačními zesilovači.

Dovednosti

1. Studenti umí pracovat s rezistory, kondenzátory a cívkami.
2. Studenti umí navrhnout a sestavit usměrňovače s polovodičovými diodami.
3. Studenti umí navrhnout a sestavit obvod pro nastavení pracovního bodu tranzistoru.
4. Studenti umí navrhnout a sestavit nízkofrekvenční zesilovač napětí malého rozkmitu.
5. Studenti umí navrhnout a sestavit astabilní klopný obvod s tranzistory.
6. Studenti umí navrhnout a sestavit invertující zesilovač s operačními zesilovači.
7. Studenti umí navrhnout a sestavit neinvertující zesilovač s operačními zesilovači.

Koncepce předmětu

Cíl: Předmět si klade za cíl vybavit studenty základními znalostmi a dovednostmi v používání analogových obvodů, jako jsou rezistory, kondenzátory a cívky, polovodičové diody, tranzistory a operační zesilovače.

Metodika: Pojmy jsou zaváděny od elementárních znalostí až po matematické zpracování a prohlubovány na jednoduchých laboratorních úlohách. Kontrolní otázky poslouží k ověření, do jaké míry je příslušná látka zvládnuta. Tento pohled je zachován i v podpůrném studijním materiálu.

1. Základní část

Základní část je zaměřena na vytvoření elementárních představ a znalostí, které se vytvoří v přednášce. Každý takový jev je odvozován z jednoduchého modelu a na základě experimentálního pozorování.

2. Laboratorní část

Získané vědomosti jsou prohloubeny v samostatných měření. Výsledky jsou zaznamenávány, početně zpracovány a doprovázeny grafy.

3. Kontrolní otázky

Porozumění a znalosti jsou sledovány v kontrolních otázkách a na řešení příkladů.

Co se nenajde v tomto předmětu? Z koncepce zaměření vyplývá, že není možné očekávat podrobné teoretické zpracování, například použití diferenciálních rovnic apod., pásová teorie, dále klasické laboratorní zpracování měřených veličin a praktických aplikací s chybami měření jako např. pravděpodobná chyba atd.

Poznámka: Výuka bude probíhat ve třech vyučovacích hodinách. První hodina je věnována výkladu nezbytném pro experimentální využití v laboratořích. Laboratornímu zpracování jsou věnovány navazující dvě vyučovací hodiny. První tříhodinový cyklus bude věnován výkladu tak, aby se tři pracovní skupiny mohly další tři týdny věnovat experimentálnímu zpracování. Výklad musí být v předstihu před experimenty.

OBSAH

1	Rezistory, kondenzátory a cívky v el. obvodě	8
1.1	Elektrický obvod s rezistorem	8
1.1.1	Rezistor v obvodě stejnosměrného proudu	8
1.1.2	Spojování odporů	13
1.1.3	Laboratorní část	17
1.1.4	Kontrolní otázky	19
1.1.5	Příklady	20
1.2	Elektrický obvod s kondenzátorem	22
1.2.1	Kondenzátor v obvodě stejnosměrného proudu	22
1.2.2	Kondenzátor v obvodě střídavého proudu	23
1.2.3	Spojování kondenzátorů	25
1.2.4	Laboratorní část	27
1.2.5	Kontrolní otázky	30
1.2.6	Příklady	30
1.3	Elektrický obvod s cívkou	31
1.3.1	Cívka v obvodě stejnosměrného proudu	31
1.3.2	Cívka v obvodě střídavého proudu	32
1.3.3	Řešení pomocí symbolického vyjádření - idealizovaná cívka	34
1.3.4	Laboratorní část	35
1.3.5	Kontrolní otázky	37
1.3.6	Příklady	37
2	Polovodičové diody	39
2.1	Polovodiče typu N a typu P	39
2.1.1	Přechod PN	40
2.1.2	Laboratorní část	43
2.1.3	Teoretický základ	43
2.1.4	Kontrolní otázky	44
2.2	Polovodičové usměrňovače	44
2.2.1	Jednocestný usměrňovač	44
2.2.2	Dvoucestný usměrňovač	45
2.2.3	Laboratorní část	46
2.2.4	Teoretický základ	48

2.2.5	Kontrolní otázky	48
3	Bipolární tranzistory	50
3.1	Charakteristiky tranzistorů	51
3.1.1	Laboratorní část	52
3.2	Nastavení pracovního bodu	52
3.2.1	Laboratorní část	53
3.2.2	Kontrolní otázky	55
3.3	Hybridní čtyřpólové rovnice	55
3.4	Napěťový nízkofrekvenční zesilovač malého rozkmitu	56
3.4.1	Vysvětlení činnosti zesilovače	56
3.4.2	Laboratorní část	61
3.4.3	Kontrolní otázky	62
3.5	Tranzistor pracující ve spínacím režimu	63
3.5.1	Laboratorní část	64
3.5.2	Kontrolní otázky	65
3.6	Klopné obvody	66
3.6.1	Bistabilní klopný obvod	66
3.6.2	Monostabilní klopný obvod	67
3.6.3	Astabilní klopný obvod	69
3.6.4	Laboratorní část	74
3.6.5	Kontrolní otázky	75
3.6.6	Příklady	75
4	Analogové integrované obvody – operační zesilovače	79
4.1	Komparátor	81
4.1.1	Laboratorní část	83
4.1.2	Kontrolní otázky	84
4.2	Invertující zesilovač	85
4.2.1	Laboratorní část	88
4.2.2	Kontrolní otázky	89
4.2.3	Příklady	90
4.3	Neinvertující zesilovač	90
4.3.1	Laboratorní část	94
4.3.2	Kontrolní otázky	95
4.3.3	Příklady	95
	Použitá literatura a další zdroje	97
A	Dodatek	98
A.1	Zpracování výsledků měření (experimentální část)	98

Rezistory, kondenzátory a cívky v obvodě stejnosměrného a střídavého proudu



Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je podat základní přehled o elektrickém odporu a jeho použití v jednoduchých elektrických obvodech. Dále jsou do obvodu přidány cívky a kondenzátory a jsou na jednoduchých úkolech předvedeny základní charakteristiky a vlastnosti těchto součástek.



Klíčová slova

Rezistor, cívka, kondenzátor, el. obvod, zdroj napětí, schéma el. obvodu

1.1 Elektrický obvod s rezistorem

1.1.1 Rezistor v obvodě stejnosměrného proudu

Základní část

K průchodu elektrického proudu spotřebičem (rezistor, kondenzátor, cívka, dioda, tranzistor atd.) musí být elektrický obvod uzavřený a připojený na zdroj elektromotorického napětí, např. akumulátor, transformátor. Na svorkách zdroje se měří elektromotorické napětí U_{EMN} v případě, že obvod není zatížen žádným spotřebičem. Říkáme, že měříme napětí naprázdno. Měříme-li napětí na svorkách se zátěží, potom měříme svorkové napětí U . Napětí $U < U_{EMN}$. Elektromotorické napětí a svorkové napětí bez zátěže mají stejnou velikost, ale opačný směr. Elektromotorické napětí tedy je napětí uvnitř zdroje a míří od záporného ke kladnému pólu, kdežto svorkové napětí míří od kladného k zápornému pólu.

Podmínkou existence proudu ve vodiči je přítomnost elektrického pole.

Poznámka: Elektrické pole se projevuje silovými účinky. Jestliže se například češeme, potom hřeben třením nahromadí elektrický náboj, kolem něhož vznikne nový stav prostředí, projevující se silovým působením, například na útržky papíru.

Podobně ve vodiči se působením elektrického pole silovým působením uvádějí elektrony do pohybu a tak vzniká elektrický proud.

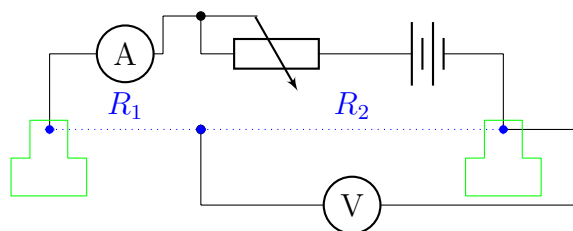
Vložíme-li na svorky napěťového zdroje rezistor, potom uzavřeným obvodem prochází elektrický proud. Vložením zdroje napětí vznikne ve vodiči elektrické pole, které působí silově na volné elektrony v rezistoru, které se dostanou v důsledku silového působení do uspořádaného pohybu. Elektrony přenášejí elektrický náboj. Čím více elektronů projde průřezem vodiče za jednu sekundu, tím bude procházet větší proud. Proud je dán velikostí náboje, který projde daným průřezem vodiče za jednu sekundu. Elektrické pole se šíří ve vodiči rychlostí světla, takže silové působení je prakticky okamžité na všechny elektrony. Elektrony se pohybují mezi atomy materiálu vodiče, takže jejich rychlost je řádově mm/s. Jako každý pohybující se předmět mění část své kinetické energie na teplo, tak i elektrony při svém pohybu vodičem mění část své energie na teplo.



Experiment 1.1: OVĚŘENÍ OHMOVA ZÁKONA

Pomůcky: akumulátor, odporový drát, ampérmetr, Helmholtzovy svorky, voltmetr

Schéma zapojení:



Obrázek 1.1: Schéma zapojení k odvození Ohmova zákona.

Akumulátor je zdrojem napětí a při uzavřeném obvodu odporovým drátem prochází elektrický proud. Kvalitu akumulátoru vyjadřujeme kapacitou akumulátoru, která je určena množstvím náboje, které akumulátor vydá při vybíjení a měří se v ampérhodinách. Vnitřní odpor akumulátorů bývá velmi malý $0,01 \Omega$ až $0,001 \Omega$. Je proto důležité chránit akumulátor před zkratem. Na čem závisí velikost proudu? Zvětšíme-li dvakrát napětí, tak se také dvakrát zvětší elektrický proud. Proud daným vodičem je přímo úměrný napětí. Zkrácením na polovinu se při daném vloženém napětí zmenší proud dvakrát. Vezmeme jiný drát stejného průřezu a délky (např. z mědi), tak je proud větší. Proud závisí na kvalitě drátu, v tomto případě na jeho vodivosti. Označme napětí U , proud I , potom $U = RI$, kde R je konstanta přímé úměrnosti. Na čem závisí tato konstanta úměrnosti? Z předcházejícího experimentu jsme poznali, že závisí na tzv. měrné vodivosti materiálu (měď, konstantan), závisí na délce a mohli bychom ukázat, že závisí také na průřezu drátu. Tyto veličiny zahrneme pod pojmem odpor vodiče R .

Závislost vyjadřuje Ohmův zákon

$$U = RI \quad \text{neboli} \quad I = \frac{U}{R} \quad (1.1)$$

Proud I při konstantním odporu je přímo úměrný napětí a při konstantním napětí U nepřímo úměrný odporu R . První vztah v 1.1 vyjadřuje, úbytek napětí na odporu vzniklý procházejícím proudem. Napětí měříme ve voltech V , proud v ampérech A , odpor v ohmech Ω .

Symbolická metoda

Matematické řešení obvodů střídavých proudů bylo podstatně zjednodušeno zavedením symbolů, fázorů. Střídavé sinusové veličiny můžeme místo sinusovkou symbolicky znázornit rotujícím vektorem, z jehož průmětu na svislou osu y lze sinusovku sestrojít. Tuto myšlenku můžeme dále rozvést zavedením předpokladu, že rovina xy , v níž rotující vektor znázorňujeme, je Gaussova rovina komplexních čísel. Pro symbolické vyjádření střídavých proudů budeme tedy předpokládat, že vektor \vec{A} (obr. 1.2) rotuje v Gaussově rovině. Jsou-li a a b souřadnice koncového bodu vektoru \vec{A} , pak je jimi v této rovině jednoznačně určeno komplexní číslo,

$$z = a + jb$$

kde j je imaginární jednotka. Poznámka: v matematice imaginární jednotka se obvykle označuje i . V našem textu písmeno i vyjadřuje okamžitou hodnotu střídavého proudu, proto imaginární jednotku označujeme malým písmenem j .

Poněvadž $a = A \cos \varphi$ a $b = A \sin \varphi$, kde A je hodnota vektoru \vec{A} , lze také psát,

$$z = A (\cos \varphi + j \sin \varphi)$$

což lze podle Eulerovy poučky psát ve tvaru:

$$z = Ae^{j\varphi} .$$

Komplexní číslo z a vektor \vec{A} jsou tím vzájemně jednoznačně přiřazeny, takže píšeme:

$$\vec{A} = Ae^{j\varphi} . \quad (1.2)$$

Kde $A = |\vec{A}| = |z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ je absolutní hodnota vektoru \vec{A} . Střídavý proud a napětí můžeme vyjádřit ve tvaru:

$$I = I_m e^{j\omega t} \quad (1.3)$$

$$U = U_m e^{j(\omega t + \varphi_0)} \quad (1.4)$$

Při počítání s fázory platí běžné zásady pro počítání s komplexními čísly. Mějme dva vektory o číselných hodnotách A_1 a A_2 s fázovými posuny φ_1 a φ_2 tj.

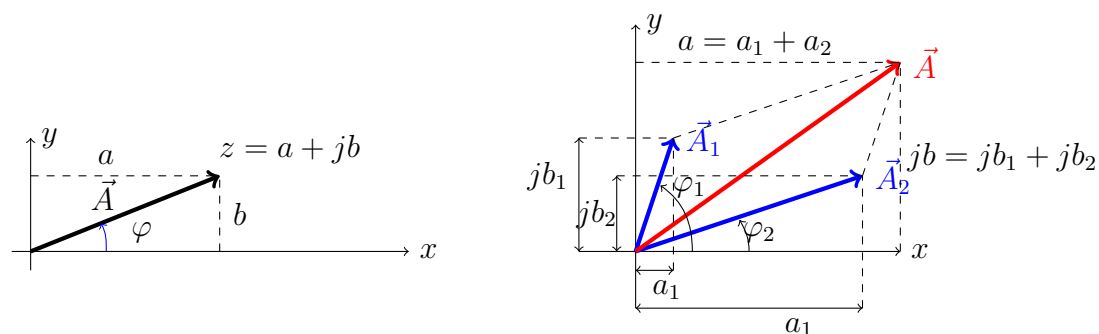
$$\vec{A}_1 = a_1 + jb_1 \quad , \quad \vec{A}_2 = a_2 + jb_2$$

Máme stav znázorněný na obr. 1.2. Výsledný vektor je:

$$\vec{A} = \vec{A}_1 + \vec{A}_2 = (a_1 + a_2) + j(b_1 + b_2)$$

Absolutní hodnota tohoto součtu je:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (1.5)$$



Obrázek 1.2: Symbolické vyjádření střídavých proudů a symbolické řešení obvodů střídavých proudů.

Fázový posun φ je dán:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b_1 + b_2}{a_1 + a_2} \quad (1.6)$$

Při symbolickém řešení sériových obvodů napíšeme pro každý obvod střídavého proudu algebraickou rovnici fázorů napětí. V této rovnici osamostatníme část reálnou a imaginární, a tím dostaneme složky fázoru výsledné veličiny. U paralelních píšeme rovnice proudů.

Při sériovém zapojení odporů na střídavý zdroj prochází všemi odpory stejný proud. Úbytky napětí na odporech jsou však co do velikosti a fáze různé. Fázový posun vektoru napětí, vzhledem k vektoru proudu, se určí z podílu imaginární a reálné části.

$$U = U_1 + U_2 + \dots = I (R_1 + R_2 + \dots)$$

Při paralelním zapojení je napětí na všech odporech stejné, proud v odporech je obecně různý co do velikosti i fáze.

$$I = I_1 + I_2 + \dots = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \right)$$

Náš příklad je potom:

Ohmický odpor nepřispívá žádným fázovým posuvem, protože je frekvenčně nezávislý. Vyjádříme fázor proudu:

$$\vec{I} = I_m e^{j\omega t} \quad (1.7)$$

Fázor napětí:

$$U = RI = RI_m e^{j\omega t} = U_m e^{j\omega t} \quad (1.8)$$

Odtud:

$$U_m = RI_m \quad (1.9)$$



Experiment 1.2: VLIV PROUDU NA ODPOROVÝ DRÁT

Pomůcky: akumulátor, odporový vodič, Helmholtzovy svorky, vypínač

Schéma zapojení:

Zvolíme kratší odporový drát. Zvyšujeme napětí, co se stane? Z minulého experimentu víme, že proud poroste, zároveň se vodič značně zahřívá.

Závěr: Elektrická energie se mění v teplo, důležitá tedy je přeměna energie daná výkonem $P = UI = RI^2$ ve wattech W. Jestliže by přenášený výkon byl příliš velký, drát se přetaví. Při volbě odporu se musí přihlížet ke dvěma veličinám: velikosti odporu v ohmech a velikosti maximálního přenášeného výkonu ve wattech.

1.1.2 Spojování odporů

Vodiče můžeme spojovat buď za sebou (sériově) nebo vedle sebe (paralelně).

Spojování za sebou

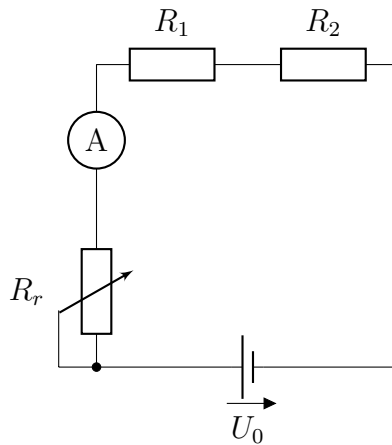
Dva rezistory se spojí do série, jestliže výstupní svorku jednoho spojíme se vstupní svorkou druhého rezistoru. Zajímá nás, jaký bude výsledný odpor, kterým můžeme nahradit tyto dva odpory? Odvození provedeme z experimentu. Mějme odporový vodič, na který vložíme napětí zdroje a měříme napětí na dvou částech vodiče.



Experiment 1.3: ODVOZENÍ VLASTNOSTÍ SÉRIOVÉHO ZAPOJENÍ ODPORŮ

Pomůcky: akumulátor, ampérmetr, voltmetr, odporový drát, Helmholtzovy svorky, posuvný jezdec, vypínač

Schéma zapojení:



Obrázek 1.3: Zapojování odporů za sebou.

Odporovými částmi R_1 a R_2 protéká stejný proud I , protože elektrony se pohybují v témže směru v obou částech. Změříme napětí U_1 na odporu R_1 a napětí U_2 na odporu R_2 . Označme celkový odpor R . Naměříme, že napětí U na odporu R . Z naměřených hodnot platí, že $U = U_1 + U_2$. Dosadíme-li z Ohmova zákona, potom:

$$RI = R_1I + R_2I$$

Po vytknutí před závorku a po dělení, dostaneme výsledek:

$$R = R_1 + R_2 \quad (1.10)$$

Ekvivalentní odpor obvodu je roven součtu jednotlivých odporů. Výsledek platí pro konečné množství rezistorů zapojených za sebou.

Odvození vztahu 1.10 provedeme také pomocí 2. Kirchhoffova zákona. Uvažujme uzavřený elektrický obvod na obrázku 1.3 s elektromotorickým napětím U_{EMN} a sériově zapojené odpory R_1 a R_2 . Potom platí: **Algebraický součet elektromotorických napětí je roven algebraickému součtu úbytků napětí na jednotlivých odporech.** Postupujeme tak, že v uzavřeném obvodu zvolíme libovolně jeden směr (vhodné je zvolit směr stejný jako směr procházející proudy). Kladně vezmeme ty úbytky napětí, které jsou ve zvoleném směru oběhu. Je třeba připomenout, že směr elektromotorického napětí je opačný, než je směr svorkového napětí. Algebraický součet právě vyjadřuje možnost několika vložených elektromotorických napětí s ohledem na polaritu. V našem případě platí:

$$U_{EMN} = R_1I + R_2I \quad (1.11)$$

Nepřihlížíme k vnitřnímu odporu zdroje.

V praxi je výhodnější používat svorková napětí, která mají velikost stejnou jako elektromotorická napětí, ale opačný směr. Potom 2. Kirchhoffův zákon je:

Algebraický součet svorkových napětí a úbytků napětí na jednotlivých odporech je roven nule. Potom platí:

$$-U + R_1I + R_2I = 0 \quad . \quad (1.12)$$

Pro náhradní odpor $U = RI$ je výsledný náhradní odpor:

$$R = R_1 + R_2 \quad (1.13)$$

Napětí na odporech porovnáme pomocí jejich poměru:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1I}{R_2I} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1.14)$$

Napětí na jednotlivých odporech se rozdělí úměrně k velikostem jejich odporu.

Závěr:

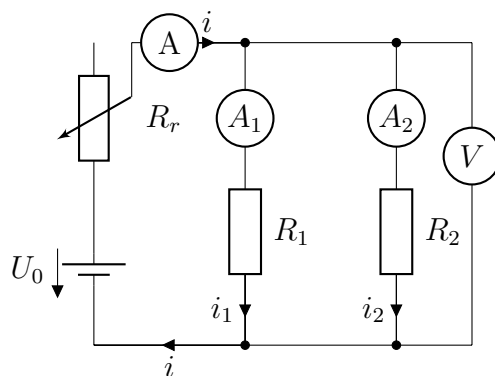
1. Proud je v uzavřeném obvodu všude stejný.
2. Výsledné napětí se rovná součtu napětí na jednotlivých odporech.
3. Napětí se rozdělí na odporech v přímém poměru k jejich odporům.
4. Ekvivalentní odpor obvodu se rovná součtu odporů jednotlivých rezistorů. Odpor soustavy je vždy větší, než kterýkoliv odpor v zapojení.

Poznámka: Napěťové zdroje mají vnitřní odpor R_i , takže předpokládáme $R_i \ll R$.

Spojování vedle sebe

Při paralelním zapojení jsou navzájem spojeny vstupní svorky všech rezistorů a rovněž všechny výstupní svorky. Na vstupní a výstupní svorky připojíme zdroj napětí, tak na všech rezistorech je stejné napětí. Elektrony pod působením elektrického pole v důsledku vloženého napětí se dostávají do uspořádaného pohybu. Na rozdíl od sériového zapojení se elektrony rozdělí do jednotlivých odporů ve větvích. Platí 1. Kirchhoffův zákon: Místa obvodu, kde se setkávají alespoň tři vodiče, nazýváme uzly. Vodič mezi dvěma uzly se nazývá větev. Proud, který vstupuje do uzlu, pokládáme za kladné, proudy vystupující z uzlu za záporné. **Algebraický součet proudů v uzlu je roven nule. Nebo součet uzlů vstupujících do uzlu je roven součtu proudů z uzlu vystupujících.** Proud vstupující do uzlu označme I . Předpokládejme dva rezistory o odporech R_1 a R_2 , kterými procházejí proudy I_1 a I_2 .

Schéma zapojení:



Obrázek 1.4: Zapojování odporů vedle sebe pomocí rezistorů.

Napětí na odporech je stejné, protože vstupní svorky jsou připojené na kladný pól zdroje a výstupní na záporný pól. Podle 1. Kirchhoffova zákona platí:

$$I = I_1 + I_2 \quad (1.15)$$

Hledám odpor, který nahradí oba paralelně zapojené odpory. Potom $I = U/R$ je proud před uzlem a na náhradním odporu R je vloženo stejné napětí, jako na paralelně zapojené odpory. Proudů ve větvích podle Ohmova zákona jsou $I_1 = U/R_1$ a proud $I_2 = U/R_2$. Po dosazení do rovnice 1.15 a vykrácení U máme výsledek:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1.16)$$

nebo po úpravě:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.17)$$

Proudů protékající odpory porovnáme pomocí jejich poměru:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{U}{R_1}}{\frac{U}{R_2}} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1.18)$$

Příslušné proudy jsou v obráceném poměru k jejich odporům.

Závěr:

1. Napětí je na paralelně zapojených odporech a jednotlivých odporech stejné.
2. Proud do uzlu je roven součtu proudů z uzlu vystupujících.
3. Proudů se rozdělí do větví v obráceném poměru k jejich odporům.

1.1.3 Laboratorní část



Úloha 1.1: Měření odporů

Úkoly:

1. Pomůcky: napěťový zdroj 5 V, NiFe akumulátor, reostat 100 Ω , reostat 1200 Ω , rezistor 100 Ω , rezistor 470 Ω (2 W), rezistor 10 k Ω , voltmetr, ampérmetr
2. Postup měření (hodnoty запиšte do tabulky):
 - (a) Pomocí montážní desky nepájivých polí podle obr. 1.1 sestavte obvod. Zdůvodněte sériové připojení ampérmetru a paralelní zapojení voltmetru (Vnitřní odpor měřidel).
 - (b) Pro každý rezistor proveďte 10 měření při různých protékajících prouděch (nastavte pomocí reostatu).
 - (c) Vypočtete průměrnou hodnotu každého odporu a chyby měření podle přiloženého návodu k dané úloze.
 - (d) Nakreslete schéma zapojení pro měření vnitřního odporu akumulátoru. Upravte rovnici v zadání pro výpočet vnitřního odporu akumulátoru. Jak změříte elektromotorické napětí akumulátoru? Jakou hodnotu zatěžovacího odporu zvolíte?

Provedení úlohy:

1. Pomocí Ohmova zákona změřte odpor dvou rezistorů.
2. Změřte vnitřní odpor zdroje podle rovnice $E_{EMN} - IR_i = IR$. Nakreslete odpovídající schéma zapojení.



Úloha 1.2: Sériové zapojení odporů

Úkoly:

1. Pomůcky: napěťový zdroj 5 V, reostat 100 Ω , reostat 1200 Ω , rezistor 100 Ω (2 W), rezistor 470 Ω (2 W), rezistor 10 k Ω , voltmetr (3 kusy), ampérmetr (3 kusy).
2. Postup měření (hodnoty запиšte do tabulky):

- (a) Na montážní desce nepájivých polí sestavte obvod podle obr. 1.3. Zdůvodněte sériové připojení ampérmetru a paralelní zapojení voltmetru (Vnitřní odpor měřidel).
- (b) Do obvodu připojte reostat k nastavení různých proudů protékajících obvodem.
- (c) Pro danou sestavu proveďte 10 měření při různých protékajících prouděch (nastavíme pomocí reostatu). Zdroj napětí připojte na odpory sériově zapojené, změřte proud a napětí.
- (d) Vypočtěte průměrnou hodnotu a chyby měření podle přiloženého návodu k dané úloze.
- (e) Vypočtěte výsledný odpor. Musí platit $R = R_1 + R_2$.

Provedení úlohy:

1. Na základě změřených hodnot odporů z Úlohy 1 vypočtěte a změřte výsledný odpor při sériovém zapojení dvou odporů.
2. Ověřte přímou úměrnost mezi odpory a napětími na těchto odporech.



Úloha 1.3: Paralelní zapojení rezistorů

Úkoly:

1. Pomůcky: napěťový zdroj 5 V, rezistor 100 Ω (2 W), rezistor 470 Ω (2 W), voltmetr, ampérmetr
2. Postup měření (hodnoty запиšte do tabulky):
 - (a) Na montážní desce nepájivých polí sestavte obvod podle obr. 1.3. Zdůvodněte sériové připojení ampérmetru a paralelní zapojení voltmetru (Vnitřní odpor měřidel).
 - (b) Do obvodu připojte reostat k nastavení různých proudů protékajících obvodem.
 - (c) Pro danou sestavu proveďte 10 měření při různých protékajících prouděch (nastavte pomocí reostatu, změřte proud i napětí).
 - (d) Vypočtěte průměrnou hodnotu a chyby měření podle přiloženého návodu k dané úloze.

Vypočtěte výsledný odpor. Musí platit rovnice 1.16.

Provedení úlohy: Změřte výsledný odpor při paralelním zapojení dvou odporů. Zdroj napětí připojte na paralelně zapojené odpory, změřte proudy a napětí a vypočítejte výsledný odpor. Musí platit:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$



Úloha 1.4: Rezistor v obvodě střídavého proudu

Úkoly: napěťový zdroj 5 V, rezistor 100 Ω (2 W), rezistor 470 Ω (2 W), rezistor 10 k Ω (2 W), voltmetr, ampérmetr

Provedení úlohy: Stejná měření, jako v předchozích třech úlohách opakujte se zdrojem střídavého proudu. Získáte stejné hodnoty.

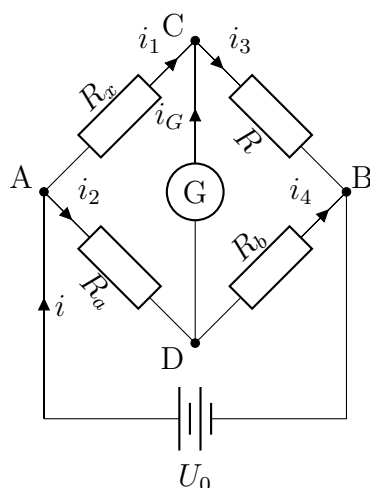
1.1.4 Kontrolní otázky

1. Z čeho se skládají atomy prvků?
2. Co jsou to volné elektrony?
3. Jak se liší jednotlivé atomy?
4. Jak vzniká elektrický náboj tělesa? Co je to elektrické pole? Jak působí elektrické pole?
5. Jak vzniká elektrický proud?
6. Proč se elektrony nepohybují rychlostí světla? Proč se rozsvítí žárovka zmačknutím vypínače ve „stejném“ okamžiku?
7. Proč se elektrony nepohybují rychlostí světla?
8. Vysvětlete rozdíl mezi elektromotorickým napětím a svorkovým napětím naprázdno.
9. Porovnejte směr stejnosměrného proudu se směrem toku elektronů.
10. Co je příčinou elektrického proudu?
11. Na čem závisí velikost proudu ve vodiči?
12. Co je to elektrický odpor a v jakých jednotkách se měří?
13. Vysvětlete, proč se odpor vodiče zvětšuje s rostoucí teplotou?
14. Vyslovte Ohmův zákon.

15. Jaký je výsledný odpor při sériovém zapojení?
16. V elektrickém obvodu máte spotřebič, který vyžaduje pro nastartování řádově desítky ampér, jaký zvolíte zdroj napětí?
17. Jaký je výsledný odpor při paralelním zapojení?
18. V obvodu má být odpor, který má větší výkon než je výkon odporu, který máte k dispozici. Jak si pomůžete?
19. Vyslovte 1. a 2. Kirchhoffův zákon.
20. Čemu se rovná elektrický výkon a jaké jsou jeho jednotky?
21. Jaký je rozdíl mezi stejnosměrným proudem a harmonickým střídavým proudem?
22. Co je to fázor napětí a fázor proudu?
23. Proč je nutné chránit akumulátor před zkratem?

1.1.5 Příklady

1. Akumulátor s kapacitou 35 Ah se má nabíjet proudem $I = 3$ A. Jak dlouho bude trvat nabíjení? ($t = 11,66$ h)
2. Elektrický člunek, jehož elektromotorické napětí je $U_{EMN} = 1,5$ V a vnitřní odpor $R_i = 1,1 \Omega$, je zatížen odporem $R = 3,4 \Omega$. Jak velký proud protéká obvodem a jak velké je svorkové napětí článku? ($I = 0,33$ A, $U = 1,137$ V)
3. Jaký je odpor vlákna žárovky, kterým při napětí $U = 220$ V protéká proud $I = 5$ A? Na jaký výkon musí být použita žárovka? ($R = 44 \Omega$, $P = 1100$ W)
4. Odporem protéká při napětí $U = 250$ V proud $I = 0,003$ A. Jakou hodnotu má odpor a jaký výkon se v něm spotřebuje? ($R = 83,33 \Omega$, $P = 0,75$ W)
5. Při měření odporu se často používá Wheatstonův můstek.



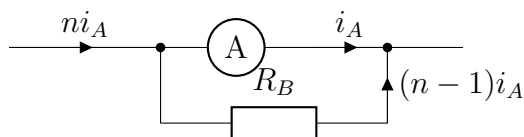
Obrázek 1.5: Wheatstonův můstek.

Hodnoty odporů R , R_a , R_b lze nastavit tak, aby galvanometrem neprocházel elektrický proud ($I_G = 0$). Pak lze pomocí Kirchhoffových zákonů odvodit pro výpočet neznámého odporu R_x vzorec:

$$R_x = R \frac{R_a}{R_b}$$

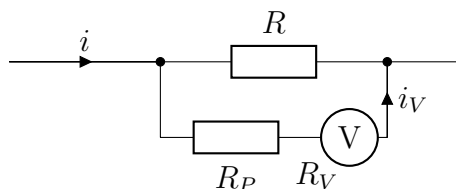
Body C a D mají stejný potenciál, úbytek napětí na R_x se rovná úbytku na R_a a úbytek napětí na R se rovná úbytku na R_b , platí $I_1 R_x = I_2 R_a$, $I_1 R = I_2 R_b$.

6. Měřicí rozsah ampérmetru se zvětšuje bočnickem. Je to odpor, který se připojuje paralelně ke svorkám měřidla. Odvod'te obecný vzorec pro odpor bočnicku pro n -násobné zvětšení měřícího rozsahu přístroje, tedy: $I = nI_A$. ($R_b = \frac{R_A}{n-1}$ pro $n = 10$ je $R_b = \frac{1}{9}R_A$).



Obrázek 1.6: Bočník.

7. Měřicí rozsah voltmetru se zvětšuje předřadným odporem zapojeným do série. Při tom se napětí na svorkách voltmetru zmenší o úbytek napětí na předřadném odporu ($U_V = I_V R_p = nU_V$, $R_p = R_V(n - 1)$).



Obrázek 1.7: Předřadný odpor.

Teoretický základ

Ohmův zákon, Kirchhoffovy zákony. Rozdíl mezi ampérmetrem a voltmetrem. Vnitřní odpor zdroje napětí. Akumulátor a další napěťové zdroje. Funkce restatu. Odpor rezistoru a přenášený výkon.

1.2 Elektrický obvod s kondenzátorem

1.2.1 Kondenzátor v obvodě stejnosměrného proudu

Základní část

Kondenzátor je obvodový prvek, který má schopnost hromadit elektrický náboj. Jako jednoduchý model si vezmeme deskový kondenzátor tvořený dvěma vodivými rovnoběžnými deskami, vzdálenými o délku d , mezi nimi je nevodič (dielektrikum), např. vzduch. Schopnost nahromadit určitý náboj je omezena geometrií kondenzátoru a prostředím mezi deskami. Nahromaděný náboj Q bude záviset přímo úměrně na vloženém napětí U a kapacitě C kondenzátoru.

$$Q = CU \quad (1.19)$$

Kapacita kondenzátoru se měří ve faradech a jejich menších hodnotách mikrofaraďech μF , kde $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$, v nanofaraďech $1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$ a pikofaraďech $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$.

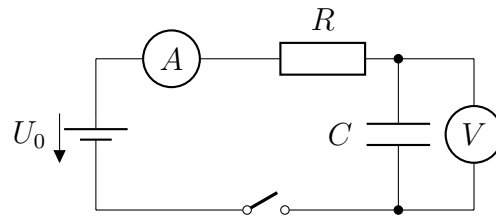
Elektrický proud může procházet pouze při uspořádaném pohybu nosičů náboje. Takovým nosičem je např. elektron. V dielektriku takové volné elektrony nejsou, takže kondenzátorem ustálený proud neprochází. Jak je tomu ale při nabíjení kondenzátoru, tedy v době, kdy se kondenzátor nabíjí? Kdybychom vložili kondenzátor přímo na svorky napěťového zdroje, kondenzátor by se nabíjel přes vnitřní odpor zdroje, který je příliš malý, abychom nabíjení mohli pozorovat na obrazovce osciloskopu. V experimentu ke kondenzátoru připojíme sériově rezistor.



Experiment 1.4: NABÍJECÍ PROUD KONDENZÁTORU

Pomůcky: Stejnoseměrný zdroj 5 V, kondenzátor o kapacitě $8 \mu\text{F}$, rezistor $1 \text{ M}\Omega$, osciloskop, vypínač

Schéma zapojení:



Obrázek 1.8: Nabíjecí proud kondenzátoru.

Proč prochází nabíjecí proud, když mezi deskami nejsou volné elektrony? Dielektrikum (nevodič) předpokládejme, že je tvořen dipólovými molekulami, které mají oddělené kladné a záporné náboje. Bez přítomnosti pole jsou v neuspořádaném tepelném pohybu. Jakmile vložíme elektrické napětí na desky kondenzátoru, vytvoří se mezi nimi elektrické pole, které narůstá (rychlostí světla), takže na každý náboj působí narůstající elektrická síla úměrná vloženému elektrickému poli a dipólové momenty se natáčí do směru elektrického pole. Toto natáčení je uspořádané a představuje zdánlivý pohyb elektrického náboje, tedy elektrický proud. Tento proud se nazývá posuvný nebo Maxwellův nebo také zdánlivý. Nedochozí tedy k volnému pohybu elektrických nábojů, ale k natáčení dipólových momentů. Důležitá je narůstající intenzita elektrického pole. Tedy měnící se elektrické pole způsobí proud. Jakmile se kondenzátor nabije, tedy jakmile nepůsobí elektrické pole změnu natáčení dipólových momentů, proud přestane. Tomuto proudu říkáme nabíjecí proud.

Aby kondenzátorem protékal stálý proud, potřebujeme, aby se měnila velikost a směr elektrického pole na deskách kondenzátoru. To realizujeme vložením zdroje střídavého napětí.

1.2.2 Kondenzátor v obvodu střídavého proudu

Vložením kondenzátoru do obvodu střídavého harmonického proudu, měnícího se podle sinusové nebo kosinusové funkce pro napětí $U = U_m \sin \omega t$, pro proud $I = I_m \cos \omega t$, prochází ustálený elektrický proud.

Řešení pomocí symbolického vyjádření: Kondenzátorem prochází proud, jehož fázor je (fázory jsou zvýrazněny speciálním fontem):

$$\mathbb{I} = I_m e^{j\omega t} \quad (1.20)$$

Fázor napětí na kondenzátoru a fázor vloženého napětí:

$$\mathbb{U} + \mathbb{U}_C = 0$$

Kondenzátorem prochází proud:

$$I_C = \frac{dQ}{dt}$$

Fázor náboje:

$$Q = CU_C$$

Fázor proudu je:

$$I_C = C \frac{dU_C}{dt}$$

Lze tedy psát podle odůvodnění shora uvedeného:

$$dU_C = \frac{1}{C} I_C dt$$

$$U_C = \frac{1}{C} \int I_m e^{j\omega t} dt$$

$$U_C = \frac{1}{j\omega C} I_C = X_C I_C, \quad (1.21)$$

kde

$$X_C = \frac{1}{j\omega C}$$

se nazývá fázor kapacitance.

Podle Eulerova vztahu platí $\frac{1}{j} = -j = e^{-j\frac{\pi}{2}}$. Dosadíme do rovnice 1.21 Hledaný fázor napětí je:

$$U_C = \frac{1}{\omega C} I_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} \quad (1.22)$$

neboli

$$U_C = U_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}, \quad (1.23)$$

kde vrcholová hodnota napětí je:

$$U_m = \frac{1}{\omega C} I_m \quad (1.24)$$

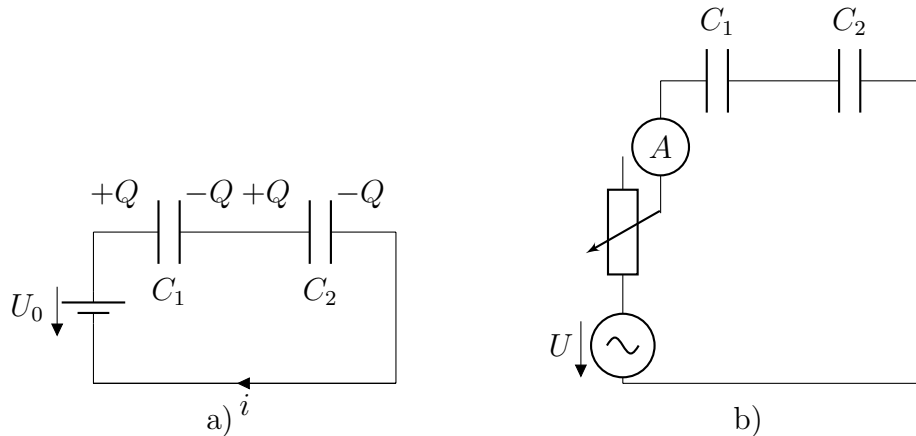
Porovnáním s fázorem proudu se napětí zpožďuje vzhledem k proudu o $\pi/2$. Je stejné frekvence a vrcholová hodnota je $\frac{1}{\omega C}$ násobkem vrcholové hodnoty proudu. Veličina $\frac{1}{\omega C}$ má rozměr odporu a nazývá se kapacitance.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (1.25)$$

1.2.3 Spojování kondenzátorů

Spojování za sebou (sériově)

Dva kondenzátory se spojí do série, jestliže výstupní svorku jednoho spojíme se vstupní svorkou druhého kondenzátoru. Zajímá nás, jaká bude výsledná kapacita, která může nahradit tyto dva kondenzátory? Odvození provedeme z experimentu.



Obrázek 1.9: Zapojení dvou kondenzátorů do série.

Připojíme-li tyto dva sériově zapojené kondenzátory C_1 a C_2 ke zdroji stejnosměrného napětí U , nahromadí se na každém kondenzátoru stejně velký náboj Q . Na desce přilehlé kladnému pólu zdroje kondenzátoru C_1 je náboj $+Q$. Původně nenabitá deska kondenzátoru je připojena na kladný potenciál, takže elektrony z levé desky se přemísťují tak dlouho, až jsou kladný potenciál zdroje a potenciál levé desky vyrovnané. Na druhé desce tohoto kondenzátoru vznikne indukci stejně velký náboj $-Q$ a na levé desce druhého kondenzátoru C_2 v důsledku vodivého spojení náboj $+Q$. Na pravé desce přivrácené k zápornému pólu zdroje se indukují náboj $-Q$ a $+Q$, který se neutralizuje elektrickým nábojem $-Q$ dodaným záporným pólem zdroje. Elektrický zdroj dodal náboj $+Q$ pouze na levou desku kondenzátoru C_1 a neutralizoval indukovaný náboj na pravé desce kondenzátoru C_2 . Je tedy celkový náboj nahromaděný na kondenzátorech spojených za sebou roven Q , to znamená, že je stejný jako náboj na každém kondenzátoru. Vložené napětí U se rozdělí podle kapacit a platí $U = U_1 + U_2$ kde $U_1 = \frac{Q}{C_1}$ a $U_2 = \frac{Q}{C_2}$, takže kapacita kondenzátoru, která nahradí tyto dva kondenzátory, má napětí U . Po dosazení $\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$, po krácení náhradní kapacita má hodnotu $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ neboli:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (1.26)$$

Závěr:

1. Náboj na všech kondenzátorech je stejný.
2. Výsledné napětí je rovno součtu napětí na jednotlivých kondenzátorech.
3. Napětí se rozdělí na jednotlivých kondenzátorech v obráceném poměru ke kapacitám.
4. Převrácená hodnota výsledné kapacity kondenzátorů spojených za sebou se rovná součtu převrácených hodnot kapacit jednotlivých kondenzátorů.

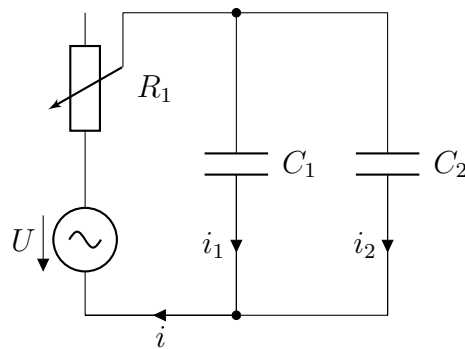
Spojování vedle sebe (paralelně)

Kondenzátory jsou spojeny paralelně, jsou-li vstupní desky všech kondenzátorů spojeny s jedním pólem napájecího zdroje a výstupní desky spojeny s druhým pólem napájecího zdroje. To znamená, že je napětí na všech kondenzátorech stejné a rovná se napětí napájecího zdroje. To znamená, že náboje se rozdělí podle kapacit a platí:

$$Q_1 = C_1U, \quad \text{a} \quad Q_2 = C_2U$$

Celkový náboj dodaný ze zdroje je roven součtu nábojů na jednotlivých kondenzátorech.

$$Q = Q_1 + Q_2$$



Obrázek 1.10: Zapojení dvou kondenzátorů vedle sebe

Chceme-li nahradit toto zapojení dvou kondenzátorů musíme uvážit následující. Při napětí U platí, že $Q = CU$. Dosadíme:

$$CU = C_1U + C_2U$$

Po vykrácení platí:

$$C = C_1 + C_2 \quad (1.27)$$

Závěr:

1. Napětí je na všech kondenzátorech stejné.
2. Výsledný náboj zdroje je roven součtu nábojů na jednotlivých kondenzátorech.
3. Náboje se rozdělí na jednotlivé kondenzátory v přímém poměru k jejich kapacitám.
4. Výsledná kapacita kondenzátorů spojených paralelně se rovná součtu kapacit jednotlivých kondenzátorů.

1.2.4 Laboratorní část

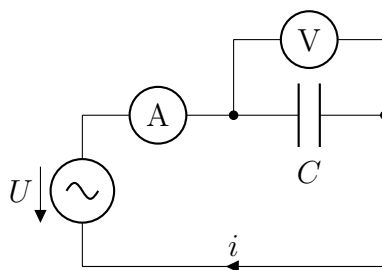


Úloha 1.5: Měření kapacit

Úkoly: Na základě změřených hodnot kapacit z předcházející úlohy, změřte výslednou kapacitu při sériovém zapojení dvou kapacit.

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: napěťový zdroj střídavého proudu 5 V (RC generátor), kondenzátor o kapacitě 8 μF , kondenzátor o kapacitě 4 μF , digitální ampérmetr, digitální voltmetr, vypínač
2. Postup měření (hodnoty запиšte do tabulky):
 - (a) Na montážní desce nepájivých polí sestavte obvod podle uvedeného schématu. Zdůvodněte sériové připojení ampérmetru a paralelní zapojení voltmetru (Vnitřní odpor měřidel).
 - (b) Do obvodu připojte reostat k nastavení různých proudů protékajících obvodem.
 - (c) Pro danou sestavu proveďte 10 měření při různých protékajících prouděch (nastavíme pomocí reostatu). Zdroj napětí připojte na sériově zapojené kondenzátory, změřte proud a napětí.
 - (d) Vypočtete průměrnou hodnotu a chyby měření podle přiloženého návodu k dané úloze.



Obrázek 1.11: Měření kapacit kondenzátorů.

Při odvozování symbolickou metodou jsme poznali, že kondenzátor klade střídavému proudu odpor, který nazýváme kapacitance a je roven $X_C = \frac{1}{\omega C}$. V obvodě změříme efektivní hodnoty střídavého proudu a střídavého napětí a zjistíme kapacitance podle vztahu $U_{ef} = \frac{1}{\omega C} I_{ef}$ a odtud kapacita je rovna:

$$C = \frac{I_{ef}}{\omega U_{ef}} \quad (1.28)$$

kde ω je úhlová sekvence (měříme při frekvencích $f = 50$ Hz, 1 kHz), U_{ef} je efektivní hodnota střídavého harmonického napětí, I_{ef} je efektivní hodnota střídavého harmonického proudu.



Úloha 1.6: Sériové zapojení kondenzátorů

Úkoly: Na základě změřených hodnot kapacit z úlohy 5, změřte výslednou kapacitu při sériovém zapojení dvou kapacit (Musí platit $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$).

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: napěťový zdroj 5 V, reostat 100 Ω , reostat 1200 Ω , kondenzátor o kapacitě 8 μF , kondenzátor o kapacitě 4 μF , digitální ampérmetr, digitální voltmetr, vypínač
2. Postup měření (hodnoty запиšte do tabulky):
 - (a) Na montážní desce nepájivých polí sestavte obvod podle obr. 1.9. Zdůvodněte sériové připojení ampérmetru a paralelní zapojení voltmetru (Vnitřní odpor měřidel).
 - (b) Do obvodu připojte reostat k nastavení různých proudů protékajících obvodem.
 - (c) Pro danou sestavu proveďte 10 měření při různých protékajících prouděch (nastavíme pomocí reostatu). Změřte proud a napětí.
 - (d) Vypočtěte průměrnou hodnotu a chyby měření podle přiloženého návodu k dané úloze. Vypočtěte výslednou kapacitu.



Úloha 1.7: Paralelní zapojení kondenzátorů

Úkoly: Na základě změřených hodnot kapacit z předchozích úloh, změřte výslednou kapacitu při paralelním zapojení dvou kondenzátorů. Zdroj napětí připojte na paralelně zapojené kondenzátory. Změřte proudy a napětí a vypočtěte výslednou kapacitu. (Musí platit $C = C_1 + C_2$.)

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: napěťový zdroj 5 V, reostat 100 Ω , reostat 1200 Ω , kondenzátor o kapacitě 8 μF , kondenzátor o kapacitě 4 μF , digitální ampérmetr, digitální voltmetr, vypínač
2. Provedení úlohy (hodnoty запиšte do tabulky):

- (a) Na montážní desce nepájivých polí sestavte obvod podle obr. 1.10. Zdůvodněte sériové připojení ampérmetru a paralelní zapojení voltmetru (Vnitřní odpor měřidel).
- (b) Do obvodu připojte reostat k nastavení různých proudů protékajících obvodem.
- (c) Pro danou sestavu proved'te 10 měření při různých protékajících prouděch (nastavíte pomocí reostatu). Změřte proudy a napětí. Zdroj napětí připojte na paralelně zapojené kondenzátory. Změřte proudy a napětí a vypočtete výslednou kapacitu.
- (d) Vypočtete průměrnou hodnotu a chyby měření podle přiloženého návodu k dané úloze.

1.2.5 Kontrolní otázky

1. Jak působí elektrické pole na volné náboje a jak působí na dielektrikum?
2. Co je to kondenzátor?
3. Co je to kapacita kondenzátoru?
4. Jaký vztah platí mezi nábojem, kapacitou a napětím na kondenzátoru?
5. Jaké jsou jednotky kapacity kondenzátoru?
6. Jak spojujeme kondenzátory?
7. Jaká je výsledná kapacita kondenzátorů zapojených paralelně?
8. Jaká je výsledná kapacita kondenzátorů zapojených do série?
9. Co je to relativní permitivita dielektrika?
10. Jaké provozní hodnoty jsou uvedeny na kondenzátorech?

1.2.6 Příklady

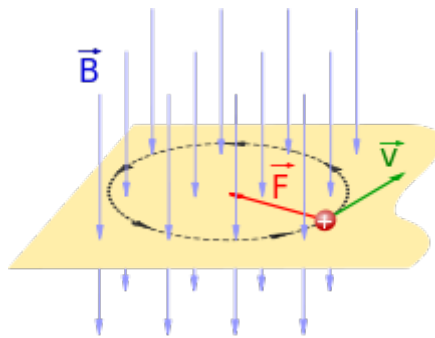
1. Jak veliký je náboj nahromaděný na kondenzátoru kapacity $C = 16 \mu\text{F}$, který je připojený ke zdroji napětí $U = 300 \text{ V}$? ($Q = 4,8 \times 10^{-3} \text{ C}$).
2. Na kondenzátoru jsou tyto hodnoty $C = 1 \mu\text{F}$ a napětí $U = 220 \text{ V}$. Připojíte kondenzátoru k síťovému napětí. Dojde k průrazu dielektrika? (Kondenzátor se nabije na vrcholovou hodnotu, která je větší než efektivní hodnota 220 V .)

1.3 Elektrický obvod s cívkou

1.3.1 Cívka v obvodě stejnosměrného proudu

Základní část

Cívka je obvodový prvek, který v obvodě stejnosměrného proudu se v ustáleném stavu projevuje jak ohmický odpor měděného vodiče, tedy velmi malý odpor, pokud je vodič měděný, krátké délky a běžného průřezu řádově mm^2 , jak v běžné praxi je splněno. Procházející stejnosměrný proud vytvoří uvnitř cívky magnetické pole, o jeho existenci se můžeme snadno přesvědčit nějakým železným předmětem. Magnetické pole se v prostoru projevuje silovými účinky. **Magnetická indukce** je vektorová fyzikální veličina, která vyjadřuje silové účinky magnetického pole na pohybující se částici s nábojem nebo magnetickým dipólovým momentem. Je to hlavní veličina sloužící ke kvantitativnímu popisu magnetického pole. Veličina se označuje písmenem B . Jednotka v soustavě SI je *tesla* značka T.



Obrázek 1.12: Silové působení magnetického pole na pohybující se náboj.

Pohybuje-li se bodový náboj Q rychlostí v v daném místě magnetického pole určeném polohovým vektorem \vec{r} , obecně na něj působí magnetická síla \vec{F} , jejíž velikost závisí kromě jiného i na směru pohybu náboje. Velikost magnetické indukce B v bodě \vec{r} lze definovat jako velikost maximální (maximum přes směr pohybu náboje) síly F_{max} působící na tento náboj, která připadá na jednotkovou hodnotu $Q \cdot v$, tzn.

$$B = \frac{F_{max}}{Q \cdot v}$$

Směr vektoru $\vec{B}(\vec{r})$ je pak definován jako směr kolmý jak ke směru pohybu náboje, tak k působící síle F_{max} .

Intenzita magnetického pole je vektorová veličina popisující míru silových účinků magnetického pole. Na rozdíl od magnetické indukce nezahrnuje vliv vázaných magnetizačních proudů prostředí, ale pouze „vnějších“ zdrojů pole, tedy volných elektrických proudů. Veličina se označuje písmenem H . Jednotka v SI soustavě je ampér na metr, značka A/m. Pro intenzitu stacionárního

magnetického pole buzeného elektrickým proudem je Ampérův zákon, kde integrace probíhá podle délky l libovolně zvolené uzavřené křivky c obemykající volný elektrický proud.

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{vol}$$

Ohmický odpor cívky změříme metodou uvedenou v úloze 1.1. Vztah mezi vektorem magnetické indukce a vektorem intenzity magnetického pole ve vakuu je dán:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

kde μ_0 je permeabilita vakua.

1.3.2 Cívka v obvodě střídavého proudu

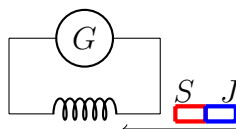
Co nastane, jestliže cívku vložíme do obvodu střídavého proudu? Nejprve však pozorujme experiment, ve kterém magnetické pole vybuzené tyčovým magnetem bude měnit tok indukčních siločar cívkou připojenou k demonstračnímu galvanometru.



Experiment 1.5: INDUKOVANÉ NAPĚTÍ V CÍVCE

Pomůcky: Cívka se 600 závity, tyčový magnet, demonstrační galvanometr

Schéma zapojení:



Obrázek 1.13: Indukované napětí v cívce.

Demonstrační galvanometr bude zaznamenávat napětí, které snímáme na připojené cívce. Jestliže je magnet v klidu, uvnitř cívky žádné napětí nevzniká. Jestliže ale magnet vysunujeme nebo zasunujeme, potom galvanometr ukazuje výchylkou napětí, které vzniká na koncích cívky. Co je příčinou? Magnetické pole kolem magnetu lze charakterizovat pomocí magnetického indukčního toku neboli tokem vektorem magnetické indukce. K přiblížení je vhodná analogie s proudem tekoucí vody. Průtok vody (množství proteklé vody) daným průřezem potrubí je závislý na rychlosti, kterou voda protéká, tedy vektorem rychlosti. Průtok vody je dán vektorem rychlosti procházející daným průřezem. Místo vektoru rychlosti si představme vektor magnetické indukce, který protéká daným průřezem. Tento průchod vektoru magnetické indukce nazveme tokem

vektoru magnetické indukce danou plochou. Označme tento tok Φ , vektor magnetické indukce \vec{B} a dané ploše přiřadíme směr normálovým vektorem, takže plochu můžeme pokládat také za vektor. Průtok vektoru magnetické indukce závisí na směru dopadu na danou plochu, tedy na úhlu, který svírá vektor magnetické indukce \vec{B} a vektor plochy \vec{S} . Magnetický indukční tok je dán pouze svou velikostí, takže je skalární veličinou a jeho velikost je dán skalárním součinem:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos(\varphi) \quad (1.29)$$

kde φ je úhel mezi vektory \vec{B} a \vec{S} . Po tomto delším úvodu se vrátíme k našemu pokusu. Pohybem magnetu se mění magnetický indukční tok závity cívky a tato změna podle Faradayova indukčního zákona je příčinou indukovaného napětí, které zaznamenáváme na galvanometru.

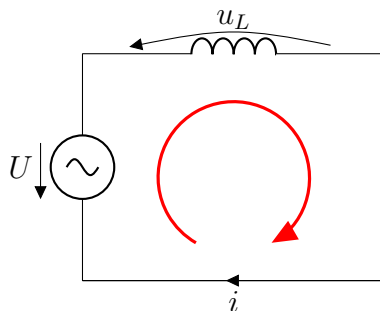
Vložení cívky do obvodu střídavého harmonického proudu, měnícím se podle sinusové nebo kosinusové funkce pro napětí $u = U_m \sin \omega t$, pro proud $i = I_m \cos \omega t$, prochází elektrický proud, který vyvolává proměnné magnetické pole, které v dané cívce indukuje napětí, které se snaží zabránit této změně. Je opačného směru, než vložené okamžité střídavé napětí, a platí:

$$u_L = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1.30)$$

V daném případě cívky v obvodu harmonického proudu je měnícím se magnetický indukční tok určen změnou magnetického pole, a ta závisí na měnícím se proudu, takže indukované napětí je úměrné časové změně okamžité hodnoty střídavého proudu. Konstanta úměrnosti L se nazývá indukčnost obvodu, krátce indukčnost. Pro cívku je možné odvodit, že indukčnost cívky je přibližně rovna:

$$L = \mu \frac{N^2}{l} S \quad ,$$

kde μ je permeabilita prostředí uvnitř cívky (např. železné jádro), N je počet závitů, l je délka cívky, S je průřez cívky a L je indukčnost cívky.



Obrázek 1.14: Idealizované řešení obvodu s čistou indukčností.

1.3.3 Řešení pomocí symbolického vyjádření - idealizovaná cívka

Vyjádríme fázor proudu

$$\mathbb{I} = I_m e^{j\omega t} \quad (1.31)$$

Fázor napětí na cívce a fázor indukovaného napětí

$$\mathbb{U}_i + \mathbb{U}_L = 0, \quad \mathbb{U}_i = -L \frac{d\mathbb{I}}{dt}$$

Lze tedy psát podle odůvodnění shora uvedeného

$$\mathbb{U}_L = -\mathbb{U}_i = L \frac{d\mathbb{I}}{dt} \quad (1.32)$$

Časová derivace fázoru proudu \mathbb{I}

$$\frac{dI_m e^{j\omega t}}{dt} = j\omega I_m e^{j\omega t}$$

Dosadíme do 1.32

$$\mathbb{U}_L = j\omega L \mathbb{I}$$

kde

$$\mathbb{X}_L = j\omega L \quad (1.33)$$

se nazývá fázor indukčnosti.

Podle Eulerova vztahu platí $j = e^{j\frac{\pi}{2}}$. Dosadíme do rovnice 1.32. Hledaný fázor napětí pak je:

$$\mathbb{U}_L = \omega L I_m e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})} = U_m e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (1.34)$$

kde vrcholová hodnota napětí je:

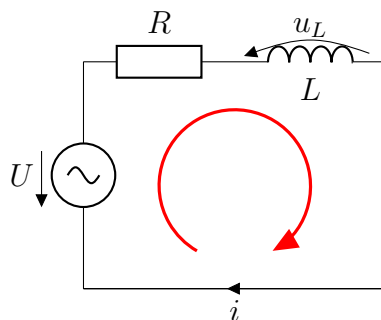
$$U_m = \omega L I_m \quad (1.35)$$

Porovnáním s fázorem proudu napětí předbíhá proud o $\frac{\pi}{2}$, je stejné frekvence a vrcholová hodnota je ωL násobkem vrcholové hodnoty proudu. Veličina ωL má rozměr odporu a nazývá se indukčností.

$$X_L = \omega L \quad (1.36)$$

Řešení pomocí symbolického vyjádření - reálná cívka

V tomto odstavci budeme měřit indukčnost cívky. Reálná cívka je však vždy navinutá z vodiče, který představuje reálný odpor. Při řešení reálnou cívku nahradíme sériovým zapojením odporu a indukčnosti, jak je uvedeno na následujícím obrázku.



Obrázek 1.15: Obvod s reálnou cívkou.

Vyjádríme fázor proudu

$$\mathbb{I} = I_m e^{j\omega t} \quad (1.37)$$

Na ohmickém odporu R je fázor napětí

$$\mathbb{U}_R = R\mathbb{I}$$

Na induktivním odporu je fázor napětí

$$\mathbb{U}_L = j\omega L\mathbb{I}$$

Podle 2. Kirchhoffova zákona

$$\mathbb{U} = \mathbb{U}_R + \mathbb{U}_L = R\mathbb{I} + j\omega L\mathbb{I} = \mathbb{I}(R + j\omega L) = \mathbb{I}\mathbb{Z} \quad , \quad (1.38)$$

kde \mathbb{Z} je fázor impedance.

Fázor impedance.

$$\mathbb{Z} = Z e^{j\varphi} \quad (1.39)$$

kde Z je velikost impedance a φ je fázový posun mezi proudem a napětím (obr. 1.15). Z vlastností komplexních čísel platí, že:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (1.40)$$

přičemž fázový posun je dán poměrem imaginární části a reálné části komplexního čísla.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R} \quad (1.41)$$

Napětí předbíhá proud o φ_0 .

1.3.4 Laboratorní část



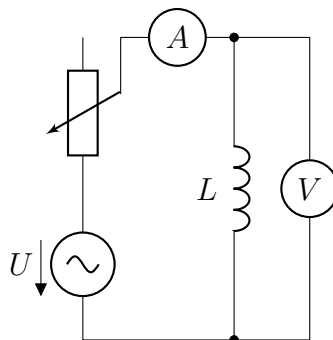
Úloha 1.8: Měření indukčnosti

Úkoly:

1. Změřte ohmický odpor cívky.
2. Z naměřených hodnot proudu a napětí vypočítejte indukčnost daných cívek.

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: napěťový zdroj střídavého proudu 5 V (RC generátor), cívka s počtem závitů 400, bez jádra, s otevřeným jádrem a uzavřeným jádrem, digitální ampérmetr, digitální voltmetr, vypínač
2. Postup měření (hodnoty запиšte do tabulky):
 - (a) Podle úlohy 1 změřte ohmický odpor cívky.
 - (b) Podle schématu zapojení sestavte obvod a změřte příslušné hodnoty proudu a napětí.
 - (c) Vypočtete indukčnosti pro cívku bez jádra, s otevřeným jádrem a uzavřeným jádrem. Porovnejte a zhodnoťte výsledky.



Obrázek 1.16: Měření indukčnosti cívky bez jádra, s otevřeným a uzavřeným jádrem.

Při odvozování symbolickou metodou jsme poznali, že cívka klade střídavému proudu odpor, který nazýváme induktance $X_L = \omega L$ a reálná cívka klade odpor nazývaný impedance, která je rovna $Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$. V obvodě změříme efektivní hodnoty střídavého proudu a střídavého napětí a zjistíme kapacitance podle vztahu $U_{ef} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} I_{ef}$ a odtud indukčnost je rovna:

$$L = \frac{\sqrt{\frac{U_{ef}^2}{I_{ef}^2} - R^2}}{\omega} \quad (1.42)$$

kde ω je úhlová frekvence (měříme při frekvencích $f = 50$ Hz, 1 kHz), U_{ef} je efektivní hodnota střídavého harmonického napětí, I_{ef} je efektivní hodnota střídavého harmonického proudu.

1.3.5 Kontrolní otázky

1. Jak vzniká magnetické pole?
2. Které jednotky se užívají pro kvantitativní popis magnetického pole?
3. Jaký je rozdíl mezi vektorem magnetické indukce \vec{B} a vektorem intenzity magnetického pole \vec{H} ?
4. Co je to magnetický indukční tok? V jakých jednotkách v SI soustavě se měří indukční tok?
5. Jak vzniká indukované elektromotorické napětí (Faradayův indukční zákon)?
6. V čem spočívá elektromagnetická indukce?
7. Vyslovte indukční zákon.
8. Co vyjadřuje Lenzův zákon?
9. Co vzniká při změně proudu ve vodiči?
10. Charakterizujte vlastní indukčnost cívky.
11. Na čem závisí vlastní indukčnost cívky?
12. V jakých jednotkách se měří indukčnost cívky v SI soustavě?
13. K čemu slouží tlumivky? Proč se u tlumivek dělá vzduchová mezera?
14. Odvoďte pomocí symbolické metody vztah pro výpočet vlastní indukčnosti cívky.
15. Charakterizujte fázor napětí, fázor proudu a fázor indukčnosti.
16. Za jakého předpokladu nemusíme uvažovat vliv ohmického odporu?
17. Co je to impedance?

1.3.6 Příklady

1. Cívka s ohmickým odporem $R = 157 \Omega$ a s vlastní indukčností $L = 0,5 \text{ H}$ je připojena k síti $U_{ef} = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Určete
 - (a) impedanci cívky (222Ω)
 - (b) fázový posun mezi svorkovým napětím a proudem v cívce ($\varphi = 45^\circ$)
 - (c) proud v cívce (1 A)
 - (d) indukované elektromotorické napětí (157 V)

(e) úbytek napětí na ohmickém odporu (157 V)

(f) sestrojte vektorový diagram napětí



Shrnutí kapitoly 1

V rámci kapitoly byly shrnuty základní koncepty použití rezistorů, cívek a kondenzátorů v jednoduchých elektrických obvodech. Na praktických experimentálních úlohách a teoretických otázkách bylo ověřeno studentovo pochopení dané problematiky.

Polovodičové diody



Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je podat základní přehled o diodách v jednoduchých elektrických obvodech. Pro pochopení činnosti polovodičových prvků jsou uvedeny pouze elementární představy o podstatě vedení elektrického proudu. Hlubší kvantová teorie, která podrobně vysvětluje příčiny vedení elektrického proudu polovodičovými prvky, se najde v odpovídající literatuře.

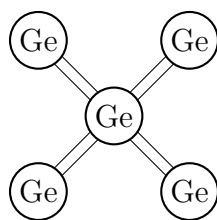


Klíčová slova

Dioda, PN přechod, el. obvod, zdroj napětí, schéma el. obvodu

2.1 Polovodiče typu N a typu P

Základním polovodičovým materiálem jsou krystaly germania nebo křemíku. K seznámení mechanismu vodivosti vezmeme krystal germania, který je čtyřmocný a jednotlivé atomy jsou vázány pevnou elektronovou kovalentní vazbou, jak ukazuje obr. 2.1.

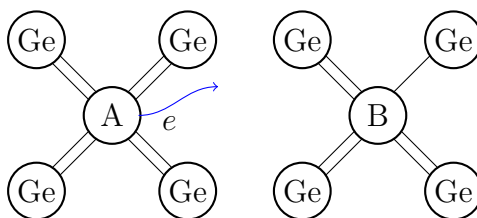


Obrázek 2.1: Krystal germania.

Z hlediska vedení elektrického proudu jsou v těchto atomech důležité valenční a vodivostní pásy, které jsou odděleny zakázaným pásem. Valenční pás je obsazen valenčními elektrony, tedy těmi, které jsou vázány s druhými atomy. Vodivostní pás obsahuje úroveň energií, kde probíhá přenos elektronů. Zakázaný pás je definován šířkou energií, které daný atom nikdy nenabývá. Vazba mezi

atomy germania je za pokojové teploty porušena, takže se uvolní elektron a po něm vznikne tak zvaná díra, které chybí záporný elektron a přisuzujeme jí kladný náboj. Vložením stejnosměrného napětí na krystal se vytvoří elektrické pole, které uvede do uspořádaného pohybu jednak elektrony ve vodivostním pásu proti směru intenzity elektrického pole a jednak díry ve valenčním pásu ve směru elektrického pole. Protéká velmi malý proud, řádově u germania v mikroampérech a u křemíku řádově nanoampéry. Takový proud je technicky nevyužitelný, protože je příliš málo nosičů náboje.

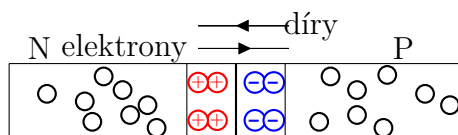
Přidáním pětímocných prvků (např. fosfor, ale užili jsme arzen) do krystalu germania se čtyři elektrony váží s atomy germania a k dispozici se získá jeden elektron ve vodivostním pásu. Dotacemi pětímocných prvků vznikne polovodič typu *N*. Tyto příměsi poskytují dostatek elektronů pro vedení elektrického proudu. Vložením napětí se elektrony pohybují ve vodivostním pásu. Podobně přidáním třímocných prvků (např. bór) není obsazena jedna vazba v krystalu germania, chybí jeden elektron, tím se vytvoří se kladná díra. Vložením napětí pak elektrické pole způsobuje přenos elektronů ve valenčním pásu, což lze vyložit jako uspořádaný pohyb děr v opačném směru, než je směr elektronů. Dotacemi třímocných prvků se vytvoří polovodič typu *P*. V krystalu s příměsí pětímocných prvků jsou majoritními (většinovými) nositeli náboje elektrony a přítomné díry v důsledku vlastní vodivosti krystalu germania minoritními (menšinovými) nositeli elektrického náboje.



Obrázek 2.2: Elektronová a děrová vodivost. Polovodič typu *N* a polovodič typu *P*.

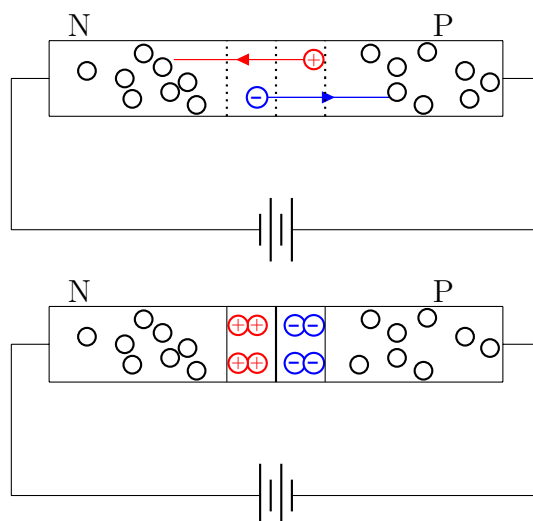
2.1.1 Přechod PN

Co nastane, jestliže se spojí dva typy polovodičů? Spojíme-li polovodič *N* s polovodičem *P* (např. proudovými impulzy), potom na hraniční vrstvě se vytvoří tzv. hradlová vrstva. V krystalu v důsledku velkého množství elektronů v polovodiči *N* a děr v polovodiči *P* dojde k difuznímu proudu, kdy elektrony z okrajové vrstvy přecházejí do polovodiče *P* a díry do polovodiče *N*. V hraniční vrstvě se v polovodiči *N* vytvoří kladně nabitě ionty a v polovodiči *P* záporně nabitě ionty (obr. 2.3).



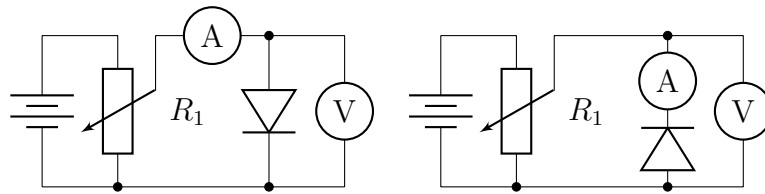
Obrázek 2.3: Přechod PN .

Tato hradlová vrstva ztratila volné nosiče náboje a ionty jsou pevně vázány na krystalovou mříž atomů germania a projevuje se zvýšením odporu. Vložíme-li stejnosměrné napětí polarizované tak, aby elektrické pole působilo na majoritní elektrony v polovodiči N a na majoritní díry v polovodiči P , bude procházet elektrický proud. Procházejícím proudem se zaplaví přechod PN , říkáme, že přechod PN je zapojen v propustném směru. V propustném směru je kladný pól zdroje připojen k polovodiči P a záporný pól k polovodiči N . Směr intenzity elektrického pole je na přechodu PN od kladného k zápornému náboji.



Obrázek 2.4: Zapojení v propustném a závěrném směru.

Přechod PN je využit u polovodičových diod, jejichž základním materiálem je křemík nebo germanium. Polovodič P určuje anodu a polovodič N určuje katodu diod. Podle shora uvedených závěrů polovodičové diody zapojujeme buď v propustném nebo závěrném směru. Vlastnosti diod určíme měřením voltampérových charakteristik (obr. 2.5). Křemíková dioda se otevírá (začne vést elektrický proud) při 0,5 V. Germaniová dioda se otevírá při 0,1 V. Výběr diody se volí pomocí maximálního proudu v propustném směru a maximálního napětí v závěrném směru.



Obrázek 2.5: Schéma zapojení pro voltampérovou charakteristiku diody v propustném a závěrném směru.

2.1.2 Laboratorní část



Úloha 2.1: Měření voltampérové charakteristiky křemíkové diody

Úkoly:

1. Pomůcky: napěťový zdroj stejnosměrného proudu 5 V, reostat 1200 Ω /2 A, křemíková dioda KY 701, digitální ampérmetr, digitální voltmetr, vypínač, katalog polovodičových součástek
2. Postup měření
 - (a) Na montážní desce nepájivého pole sestavte obvod podle schématu na obr. 2.5. Zdůvodněte z hlediska vnitřních odporů zařazení ampérmetru a voltmetru.
 - (b) Změřte závislost procházejícího proudu na vloženém napětí v propustném směru, které měníte pomocí potenciometru. U křemíkové diody v rozsahu od 0 V do 0,5 V jsou proudy velice malé. Měření proveďte od napětí 0,5 V. Hodnoty zapisujeme do tabulky.
 - (c) Nakreslete schéma pro zapojení v propustném a závěrném směru. Zdůvodněte umístění ampérmetru a voltmetru v obou zapojeních.
 - (d) Narýsujte graf naměřených hodnot na milimetrový papír.

Provedení úlohy:

1. Sestavte obvod podle schématu na obr. 2.5. Zdůvodněte z hlediska vnitřních odporů zařazení ampérmetru a voltmetru.
2. Změřte závislost procházejícího proudu na vloženém napětí v propustném směru, které měníte pomocí potenciometru. Hodnoty zapisujeme do tabulky.
3. Narýsujte graf naměřených hodnot na milimetrový papír.

2.1.3 Teoretický základ

Základy pásové teorie, přechod PN , princip funkce diody, průběh voltampérové charakteristiky

2.1.4 Kontrolní otázky

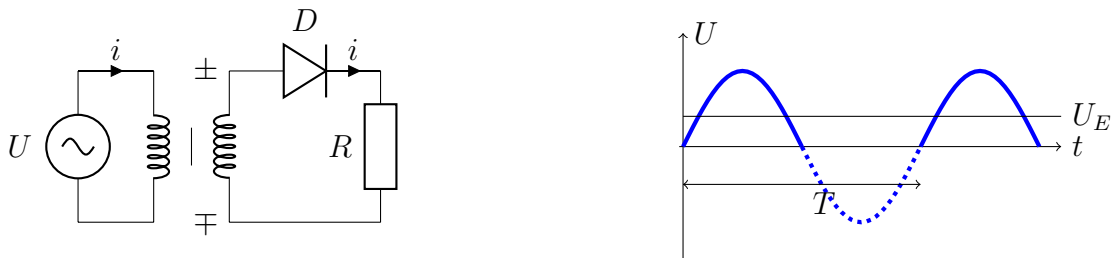
1. Jak zjistíme anodu polovodičové diody? Změřte odpor v propustném a závěrném směru.
2. Proveďte diskusi různých možností zapojení ampérmetru a voltmetru.

2.2 Polovodičové usměrňovače

Polovodičová dioda při zapojení v propustném směru vede elektrický proud, v závěrném směru proud nevede. Tato vlastnost je využita v usměrňovačích harmonického elektrického napětí. Vložíme-li na polovodičovou diodu se zatěžovacím odporem harmonické střídavé napětí, potom v kladných půlvlnách dioda je v propustném směru a obvodem prochází proud. V záporných proud nepropouští a zatěžovacím odporem proud neprochází. Budeme se zabývat pouze usměrňovači síťového transformovaného střídavého napětí s frekvencí 50 Hz.

2.2.1 Jednocestný usměrňovač

U jednocestného usměrňovače se využívá napětí příslušející kladné části periody. Transformované napětí se připojí na polovodičovou diodu se zatěžovacím odporem.

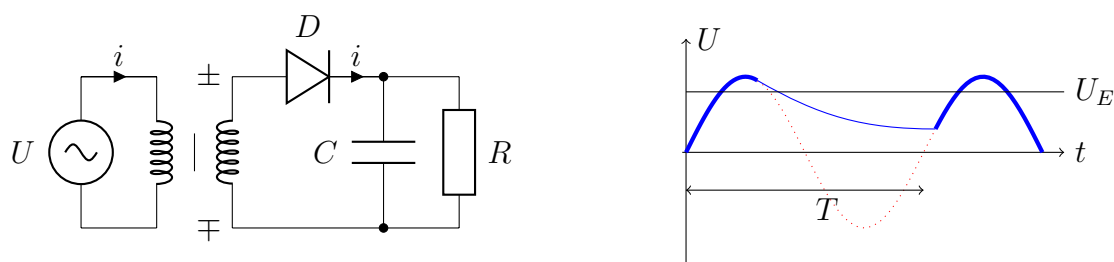


Obrázek 2.6: Schéma zapojení jednocestného usměrňovače a průběh napětí na zatěžovacím odporu, kde u je okamžitá hodnota harmonického napětí T je perioda (doba jednoho kmitu, průběhu), U je stejnosměrná složka.

Z harmonické analýzy vyplývá, že usměrňené napětí lze složit ze stejnosměrné složky a zbytkové střídavé složky, která se skládá z příslušných harmonických napětí, což jsou vyšší harmonické k dané frekvenci charakteristické pro průběh napětí za dobu jedné periody. Kvalita usměrňovače se posuzuje podle stejnosměrné složky, která má být co nejvyšší a zbytkové střídavé složky, která má být co nejnižší. Ideální stejnosměrné napětí (např. snímané z akumulátoru), má konstantní hodnotu v celé periodě a střídavá složka neexistuje. Z obr. 2.6 je patrné, že tuto vlastnost usměrňené napětí nemá. Stejnosměrná složka je průměrná hodnota všech okamžitých hodnot napětí za dobu jedné periody (tuto

hodnotu je možné vypočítat pomocí určitého integrálu). Hodnoty harmonických složek napětí představují zbytkovou střídavou složku, kterou měříme.

Stejnou složku zvýšíme a zbytkovou střídavou složku snížíme paralelním připojením elektrolytického kondenzátoru k zatěžovacímu odporu (obr. 2.7). S větší hodnotou kapacity bude stejnosměrná složka větší a zbytková střídavá složka menší. Stejnou složka se zvětší a střídavá zmenší v důsledku nabíjení kondenzátoru.

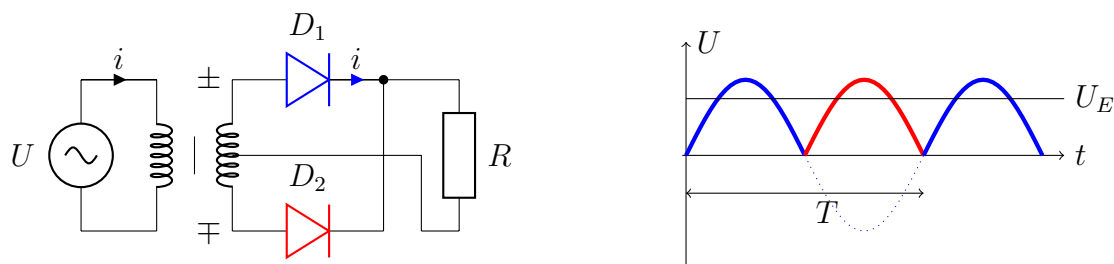


Obrázek 2.7: Jednocestný usměrňovač s vyhlazovacím elektrolytickým kondenzátorem.

S narůstajícím okamžitým napětím na sekundárním vinutí transformátoru úměrně narůstá napětí na diodě, a tím také na kondenzátoru, protože je připojen paralelně. Napětí na kondenzátoru v druhé čtvrtiny periody klesá, ale napětí na kondenzátoru zůstává na vyšší hodnotě. Ke kondenzátoru je však paralelně připojen zatěžovací odpor, takže se kondenzátor začne vybíjet přes tento odpor s časovou konstantou $\tau = RC$ po exponenciální křivce. Čím bude vybíjení pomalejší, tím bude stejnosměrná složka vyšší a střídavá nižší, tedy s většími hodnotami kapacity a odporu.

2.2.2 Dvoucestný usměrňovač

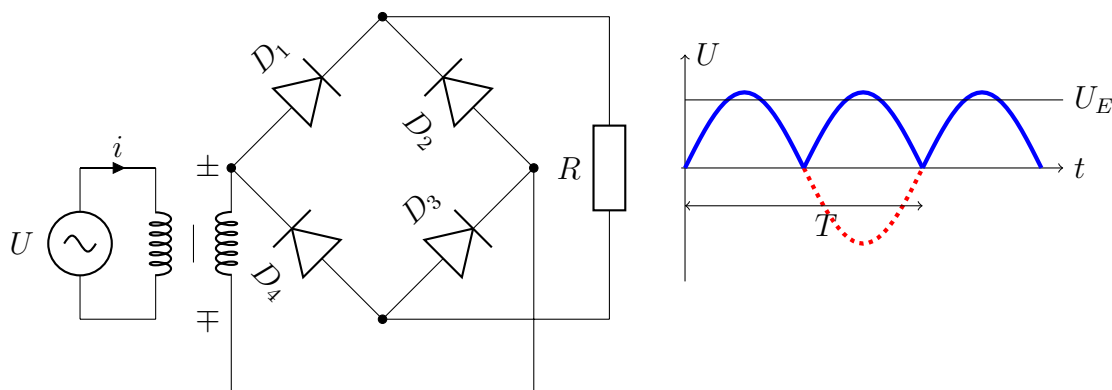
Vylepšení průběhu usměrněného napětí lze dosáhnout pomocí dvoucestného usměrňovače, který využívá obou půlperiod vloženého harmonického střídavého napětí. Stejnou složka je průměrná hodnota okamžitých napětí za dobu jedné periody, protože se využívá obou půlperiod, je tato složka větší.



Obrázek 2.8: Schéma zapojení dvoucestného usměrňovače a průběh napětí na zatěžovacím odporu, kde už okamžitá hodnota harmonického napětí, T je perioda (doba jednoho kmitu, průběhu), U je stejnosměrná složka.

Předpokládejme, že na horním bodě sekundárního vinutí je kladné okamžité napětí. Potom je dioda zapojena v propustném směru a zatěžovacím odporem prochází proud. Jakmile se na sekundárním vinutí změní polarita, tedy kladné napětí je nyní na dolním bodě sekundárního vinutí, potom podle našeho zapojení bude opět dioda zapojena v propustném směru a diodou prochází proud i v druhé polovině periody, jak je uvedeno na obr. 2.8.

Nevýhoda zapojení na obr. 2.8 spočívá v nutnosti děleného sekundárního vinutí transformátoru. V praxi se používá tzv. Grätzovo neboli můstkové zapojení, které také využívá obou polovin periody napětí.



Obrázek 2.9: Schéma zapojení dvoucestného usměrňovače a průběh napětí na zatěžovacím odporu, kde u okamžitá hodnota harmonického napětí, T je perioda (doba jednoho kmitu, průběhu), U je stejnosměrná složka.

S narůstajícím okamžitým napětím na sekundárním vinutí transformátoru úměrně narůstá napětí na diodě a tím také na kondenzátoru, protože je připojen paralelně. Napětí na kondenzátoru v druhé čtvrtiny periody klesá, ale napětí na kondenzátoru zůstává na vyšší hodnotě. Ke kondenzátoru je však paralelně připojen zatěžovací odpor, takže kondenzátor se začne vybíjet přes tento odpor s časovou konstantou $\tau = RC$ po exponenciální křivce. Až do této doby se děj opakuje jako v případě jednocestného usměrňovače. Kondenzátor se však nyní vybíjí po kratší čas, protože v druhé polovině periody začne působit vnější napětí na sekundární vinutí a kondenzátor se při stejné časové konstantě nevybije na nižší hodnotu. Čím bude vybíjení pomalejší, tím bude stejnosměrná složka vyšší a střídavá nižší, tedy s většími hodnotami kapacity a odporu.

2.2.3 Laboratorní část



Úloha 2.2: Měření usměrněného napětí jednocestného usměrňovače

Úkoly:

1. Změřte voltampérovou charakteristiku křemíkové polovodičové diody.
2. Změřte závislost usměrněného napětí na zatěžovacím proudu a závislost zvlnění na zatěžovacím proudu na jednocestném usměrňovači.

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: napěťový zdroj střídavého napětí 5 V , zatěžovací odpor 100 Ω /2 W, křemíková dioda KY 701 , digitální ampérmetr, digitální voltmetr, elektrolytické kondenzátory, vypínač
2. Postup měření:
 - (a) Sestavte obvod podle schématu na obr. 2.6. Zdůvodněte z hlediska vnitřních odporů zařazení ampérmetru a voltmetru. Změřte voltampérovou charakteristiku.
 - (b) Podle schématu na obr. 2.7 sestavte obvod pro snímání zatěžovací charakteristiky. Změřte napětí na zatěžovacím odporu v závislosti bez vloženého elektrolytického kondenzátoru a dále na paralelně připojeném elektrolytickém kondenzátoru. Volte tři hodnoty kapacit. Hodnoty zapisujte do tabulky.
 - (c) Jak se bude měnit střídavá složka?



Úloha 2.3: Měření usměrněného napětí dvoucestného usměrňovače v můstkovém Grätzově zapojení

Úkoly:

1. Změřte závislost usměrněného napětí na zatěžovacím proudu a závislost zvlnění na zatěžovacím proudu na dvoucestném usměrňovači v Grätzově zapojení.

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: napěťový zdroj střídavého napětí 5 V, zatěžovací odpor 100 Ω /2 W, (reostat 1200 Ω /2 A), 4 křemíkové diody KY 701, digitální ampérmetr, digitální voltmetr, elektrolytické kondenzátory, vypínač.
2. Postup měření:
 - (a) Sestavte obvod podle schématu na obr. 2.9. Zdůvodněte z hlediska vnitřních odporů zařazení ampérmetru a voltmetru.
 - (b) Podle schématu na obr. 2.9 sestavte obvod pro snímání zatěžovací charakteristiky. Změřte napětí na zatěžovacím odporu v závislosti bez vloženého elektrolytického kondenzátoru a dále na paralelně připojeném elektrolytickém kondenzátoru. Volte tři hodnoty kapacit. Hodnoty zapisujte do tabulky.
 - (c) Změřte závislost usměrněného napětí na zatěžovacím proudu. V zapojení na obr. 2.9 místo zatěžovacího odporu 100 Ω (2 W) zapojte reostat 1200 Ω /2 A. Postupně měňte elektrolytické kondenzátory a změřte závislost napětí na zatěžovacím proudu.
 - (d) Naměřené hodnoty zapište do grafů.

2.2.4 Teoretický základ

Usměrňovače napětí, jednocestný a dvoucestný usměrňovač, zatěžovací odpor, průběh napětí jednocestného a dvoucestného usměrňovače, závislost průběhu usměrněného napětí na velikosti kapacity elektrolytického kondenzátoru.

2.2.5 Kontrolní otázky

1. Vysvětlete princip činnosti polovodičové diody.
2. Jak se liší germaniová a křemíková dioda?
3. Která dioda má menší vnitřní odpor?

4. K čemu slouží voltampérová charakteristika diody?
5. Nakreslete schéma voltampérové charakteristiky polovodičové diody.
6. Nakreslete schéma jednocestného usměrňovače s polovodičovou diodou.
7. Nakreslete schéma dvoucestného usměrňovače v můstkovém Grätzově zapojení.
8. Zhodnoťte výsledky získané z měření jednocestného a dvoucestného usměrňovače.
9. Jaký vliv má připojení elektrolytického kondenzátoru na průběh stejnosměrné a střídavé složky výstupního napětí?



Shrnutí kapitoly 2

V rámci kapitoly byly shrnuty základní koncepty použití diod v jednoduchých elektrických obvodech. Na praktických experimentálních úlohách a teoretických otázkách bylo ověřeno studentovo pochopení dané problematiky.

Bipolární tranzistory



Cíle kapitoly

Cílem kapitoly je podat základní přehled o tranzistorech a jejich využití v jednoduchých elektrických obvodech a dále na jednoduchých úkolech předvést základní charakteristiky a vlastnosti těchto součástek. V rámci subkapitol jsou předvedena základní zapojení klopných obvodů a je důkladně komentováno jejich zapojení a chování.



Klíčová slova

Tranzistor, *NPN*, *PNP*, klopný obvod, el. obvod, zdroj napětí, schéma el. obvodu

Tranzistory mohou být vyrobeny z germania nebo křemíku. Činnost bipolárního tranzistoru využívá dvou přechodů *PN*. Tranzistory mohou být potom typu *PNP* nebo *NPN*. Výklad a používání budou založeny na tranzistorech typu *NPN*. Polovodič, který je dotován pětimocnými prvky, je typu *N* a nazveme ho emitor, polovodič typu *P* nazveme báze a další polovodič typu *N* nazveme kolektor. Emitor má větší dotaci pětimocných prvků než emitor. Činnost tranzistoru je podmíněna zapojením přechodů. Přechod báze – emitor je zapojena v propustném směru a přechod báze – kolektor v závěrném směru. To znamená u tranzistoru typu *NPN*, emitor, který má větší hustotu volných elektronů než kolektor, je připojen na záporný pól napěťového zdroje, báze na kladný pól zdroje. Přechod báze-kolektor je zapojen v závěrném směru, tedy na bázi je připojen záporný pól a na kolektor kladný pól napěťového zdroje.

Výklad činnosti: Vložením kladného pólu na bázi a záporného na emitor se vytvoří elektrické pole, které působí na volné elektrony. Elektrony působením elektrického pole se dostanou do uspořádaného pohybu a přes přechod báze-emitor jsou jednak zachyceny bázi a vzhledem k závěrnému zapojení báze-kolektor a větším napětím, jsou elektrickým polem mezi kolektorem a bázi přitahovány

kolektorem. Tranzistorem prochází kolektorový proud. Nutnou podmínkou pro vznik kolektorového proudu je bázev proud. Malé změny bázevého proudu vyvolají velké změny proudu kolektorového.

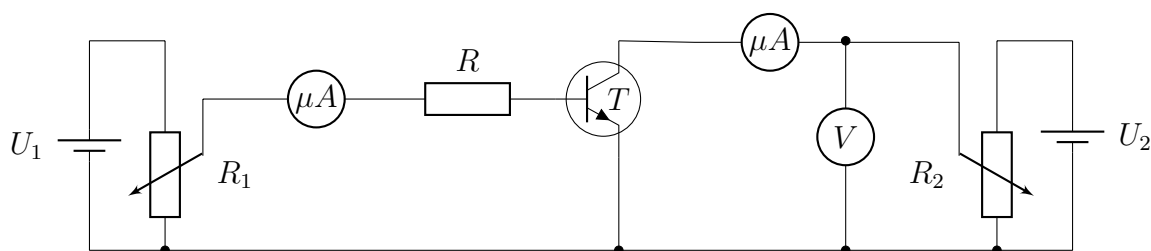


Obrázek 3.1: Schematická značka tranzistoru *NPN* a tranzistoru *PNP*.

U tranzistorů *NPN* jsou majoritními (většinovými) nositeli elektrického náboje elektrony a minoritními (menšinovými) jsou díry. O jejich významu pojednáme později.

3.1 Charakteristiky tranzistorů

Ze schematického zobrazení je patrné, že jedna z elektrod může být společná vstupnímu a výstupnímu obvodu. V laboratořích použijeme nejobvyklejší zapojení se společným emitorem. Jednotlivé tranzistory i stejného typu se značně liší a jejich vlastnosti najdeme změřením voltampérových charakteristik. Pro naše účely postačí změřit výstupní voltampérovou charakteristiku, to je závislost kolektorového proudu na kolektorovém napětí při konstantním proudu báze podle zapojení na obr. 3.2.



Obrázek 3.2: Výstupní voltampérová charakteristika tranzistoru *NPN* se společným emitorem.

U germaniových tranzistorů je otevírací napětí, tj. napětí kdy tranzistor začne vést elektrický proud 0,1 V, u křemíkových 0,5 V.

V zapojení se společným emitorem (podle obr. 3.2) je patrné, že jedno elektrické pole se vytvoří mezi fází a emitorem a druhé silnější mezi kolektorem a emitorem. Pole mezi kolektorem a emitorem musí být silnější než pole mezi bází a emitorem, jak se můžeme snadno přesvědčit, jestliže překreslíme schematické zobrazení na obr. 3.1 z hlediska připojení napěťových zdrojů.

3.1.1 Laboratorní část



Úloha 3.1: Měření výst. voltampérové charakteristiky křemíkového tranzistoru *NPN* se spol. emitorem

Úkoly:

1. Změřte voltampérovou charakteristiku tranzistoru BD 911 v zapojení se společným emitorem pro bázové proudy $50 \mu\text{A}$, $100 \mu\text{A}$, $200 \mu\text{A}$. Kolektorové napětí měňte po 1 V od 0 V do 5 V.

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: regulovatelný zdroj stejnosměrného napětí 5 V (2 kusy), křemíkový tranzistor BD 911, rezistor $4,7 \text{ k}\Omega$, digitální ampérmetr (2 kusy), digitální voltmetr
2. Postup měření: Obvod zapojte na desce nepájivých polí. Naměřené hodnoty vynesete do grafu na milimetrový papír.

Poznámka: Rozmístění volte tak, aby se mohlo využít zobrazení i dalších závislostí, tj. převodní charakteristiky, vstupní charakteristiky.

3.2 Nastavení pracovního bodu

Aplikace s tranzistory vyžadují, aby byly nastaveny klidové podmínky určené stejnosměrnými hodnotami proudů a napětí, jimiž hodnoty určují pracovní bod. Pracovní bod volíme buď podle doporučení z literatury nebo z naměřených statických charakteristik. Dbáme na to, aby byl umístěn v pracovní oblasti vymezené zbytkovým proudem, mezní přímkou, maximálním kolektorovým proudem a napětím a maximální kolektorovou ztrátou. V pracovní oblasti je pracovní bod určen kolektorovým napětím U_{CE} (v zapojení se společným emitorem), kolektorovým proudem I_C , a proudem báze I_B . Při její volbě je nutné přihlížet, aby:

1. Při vložených střídavých signálech nepřešly hodnoty mimo pracovní oblast.
2. Nebyla narušena stabilita provozu při změnách okolních podmínkách.

Klidový pracovní režim tranzistoru může být zadán různými počátečními podmínkami.

1. Je dán pracovní bod a pracovní napětí.
2. Je dán pracovní bod a zatěžovací odpor.

3. Je dán pracovní bod a zesílení apod.

K nastavení pracovního bodu použijeme nejjednodušší zapojení bez teplotní stabilizace. Použijeme jeden z velice jednoduchých způsobů, který spočívá v tom, že v grafu výstupních voltampérových charakteristikách zvolíme kolektorové napětí a bázevý proud. Proud kolektorový už odečteme z vynesných charakteristik.

Hledáme obvodové prvky, kterými realizujeme požadované hodnoty. Schéma zapojení je na obr. 3.3.

Pro nastavení kolektorového proudu hledáme odpor R_C . Z charakteristik jsme našli kolektorový proud, kolektorové napětí a pracujeme s napěťovým zdrojem U_0 . Podle 2. Kirchhoffova zákona sestavíme rovnici:

$$-U_0 + I_C R_C + U_{CE} = 0 \quad (3.1)$$

Odtud

$$R_C = \frac{U_0 - U_{CE}}{I_C} \quad (3.2)$$

K výpočtu odporu do báze pro nastavení bázevého proudu použijeme další oběhovou smyčku, kde chybí údaj pro vstupní napětí U_{BE} . Použijeme křemíkový tranzistor, jehož otevírací napětí je 0,5 V. Pro naše účely zvolíme napětí $U_{BE} = 0,6$ V, jehož hodnota našim podmínkám vyhovuje. Sestavíme rovnici podle 2. Kirchhoffova zákona:

$$-U_0 + I_B R_B + U_{BE} = 0$$

Odtud odpor do báze je:

$$R_B = \frac{U_0 - U_{BE}}{I_B} \quad (3.3)$$

3.2.1 Laboratorní část



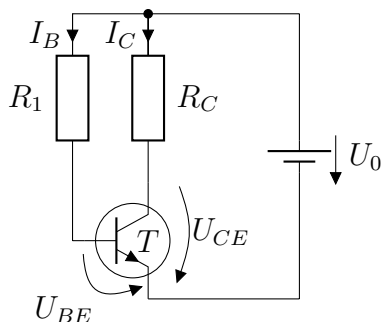
Úloha 3.2: Nastavení pracovního bodu křemíkového tranzistoru *NPN* se společným emitorem

Úkoly:

1. Zdroj stejnosměrného napětí 5 V, křemíkový tranzistor BD 911, vypočítaný kolektorový a bázevý odporu (zaokrouhlete na hodnotu řady E12: 1; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2), digitální ampérmetr (2 kusy), digitální voltmetr
2. Postup měření:
 - (a) Překreslete schéma zapojení s ohledem na připojené měřící přístroje.

- (b) Sestavte obvod. Proměřte napětí zdroje, kolektorový a bázový proud, kolektorové napětí. Tyto hodnoty porovnejte s teoreticky získanými hodnotami. Zdůvodněte odchylky naměřených a z návrhu získanými hodnotami.
- (c) Navrhněte způsob, kterým by se tyto chyby kompenzovaly na minimum.
3. Teoretický základ: Odporů řady E12, význam pracovního bodu, nastavení pracovního bodu, Kirchhoffovy zákony, výstupní charakteristiky, převodní charakteristiky, vstupní charakteristiky, proudová převodní charakteristika, kolektorová ztráta tranzistoru, vykreslení výkonové ztráty do výstupních charakteristik (maximální výkon přenášený v kolektorovém obvodu se najde v katalogu výrobce).

Provedení úlohy:



Obrázek 3.3: Schéma zapojení pro realizaci nastavení pracovního bodu

Pro nastavení kolektorového proudu hledáme odpor R_C . Z charakteristik jsme našli kolektorový proud, kolektorové napětí a pracujeme s napětovým zdrojem U_0 . Podle 2. Kirchhoffova zákona sestavíme rovnici:

$$-U_0 + I_C R_C + U_{CE} = 0 \quad (3.4)$$

Odtud

$$R_C = \frac{U_0 - U_{CE}}{I_C} \quad (3.5)$$

K výpočtu odporu do báze pro nastavení bázového proudu použijeme další oběhovou smyčku, kde chybí údaj pro vstupní napětí U_{BE} . Použijeme křemíkový tranzistor, jehož otvírací napětí je 0,5 V. Pro naše účely zvolíme napětí $U_{BE} = 0,6$ V, jehož hodnota našim podmínkám vyhovuje. Sestavíme rovnici podle 2. Kirchhoffova zákona:

$$-U_0 + I_B R_B + U_{BE} = 0 \quad (3.6)$$

Odtud odpor do báze je:

$$R_B = \frac{U_0 - U_{BE}}{I_B} \quad (3.7)$$

3.2.2 Kontrolní otázky

1. Jaký je rozdíl mezi tranzistorem *NPN* a *PNP*?
2. Nakreslete schéma zapojení ke snímání výstupní charakteristiky tranzistoru *NPN*. Zdůvodněte vhodnost umístění ampérmetru a voltmetru.
3. Jak bychom změřili vstupní charakteristiky?
4. Je nutné měřit statickou proudovou převodní charakteristiku? Jak ji odvodíte?
5. K čemu slouží pracovní bod?
6. Nakreslete schéma zapojení k určení pracovního bodu.
7. Jak je realizováno nastavení pracovního bodu?
8. Co je to maximální kolektorová ztráta?
9. Vyjmenujte některé podmínky nutné k volbě pracovního bodu.
10. Vyslovte Kirchhoffovy zákony.

3.3 Hybridní čtyřpólové rovnice

Při malých proudových a napěťových změnách na kolektoru tranzistoru se může chápat tranzistor jako lineární prvek. Potom je možné užít náhradní zapojení vyšetřované pomocí čtyřpólové teorie. Této teorie se využije při zpracování střídavých harmonických signálů. Je výhodné využívat čtyřpólových rovnic. V zapojeních se společným emitorem využijeme hybridní čtyřpólové rovnice. První rovnice vyjadřuje, jak změna vstupního napětí báze emitor závisí na změně vstupního proudu báze a na změně výstupního napětí kolektor emitor a druhá, jak změna výstupního kolektorového proudu závisí na změnách proudu báze a napětí kolektor-emitor:

$$\Delta U_{BE} = h_{11} \Delta I_B + h_{12} \Delta U_{CE} \quad (3.8)$$

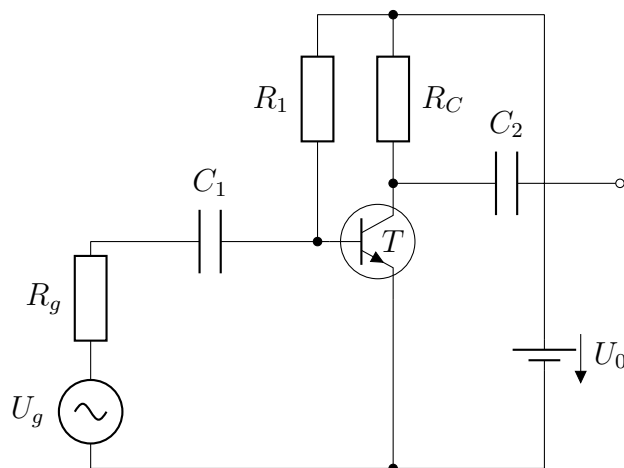
$$\Delta I_C = h_{21} \Delta I_B + h_{22} \Delta U_{CE} \quad (3.9)$$

kde $h_{11} = \left(\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right)_{\Delta U_{CE}=0}$ je vstupní odpor tranzistoru v zapojení se společným emitorem při konstantním kolektorovém napětím, $h_{21} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right)_{\Delta U_{CE}=0}$ je proudový zesilovací činitel tranzistoru v zapojení se společným emitorem při konstantním kolektorovém napětím, $h_{22} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \right)_{\Delta I_B=0}$ je výstupní vodivost

tranzistoru v zapojení se společným emitorem při konstantním proudu báze a $h_{12} = \left(\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}} \right)_{\Delta I_B=0}$ je převodní napěťový převodní koeficient v zapojení se společným emitorem při konstantním proudu báze.

3.4 Napěťový nízkofrekvenční zesilovač malého rozkmitu

Tranzistorový nízkofrekvenční zesilovač signálu malého rozkmitu je navržen na základě změřených výstupních charakteristik. Základními vstupními parametry je napětí napájecího zdroje a z výstupních charakteristik zvolený pracovní bod, tedy kolektorové napětí, proud do báze a z charakteristik odečtený kolektorový proud. Volba pracovního bodu je závislá na velikosti vstupního harmonického napětí tak, aby signál mohl být zesílený bez zkreslení. K výpočtu kolektorového odporu použijeme rovnice 3.5 a pro odpor do báze rovnice 3.7. Oddělení stejnosměrného napětí báze a vstupního harmonického zdroje napětí a oddělení stejnosměrné složky napětí kolektorového od zatěžovacího odporu (impedance) je realizováno pomocí vazebního kondenzátoru (obr. 3.4). Kapacity vazebních kondenzátorů se volí tak, aby na kapacitance vznikly zanedbatelné úbytky napětí vzhledem k vstupní a výstupní impedanci.



Obrázek 3.4: Schéma zapojení nízkofrekvenčního napěťového zesilovače.

V praxi se jen vyjímečně používá jednostupňový zesilovač, protože zpravidla je potřebné přizpůsobení na zdroj signálu a přizpůsobení na použitou zátěž.

3.4.1 Vysvětlení činnosti zesilovače

1. Je možné názorně provést, pomocí charakteristik tranzistoru, jak pracuje tranzistor při zesílení napěťového signálu?
 - (a) Nejprve na milimetrový papír vyneseme naměřené hodnoty funkční závislosti kolektorového proudu na kolektorovém napětí při konstantním proudu do báze (druhá rovnice čtyřpólových rovnic 3.8).

Z funkční závislosti (3.4) napíšeme rovnici přímky:

$$I_C = -\frac{1}{R_C}U_{CE} + \frac{U_0}{R_C} \quad (3.10)$$

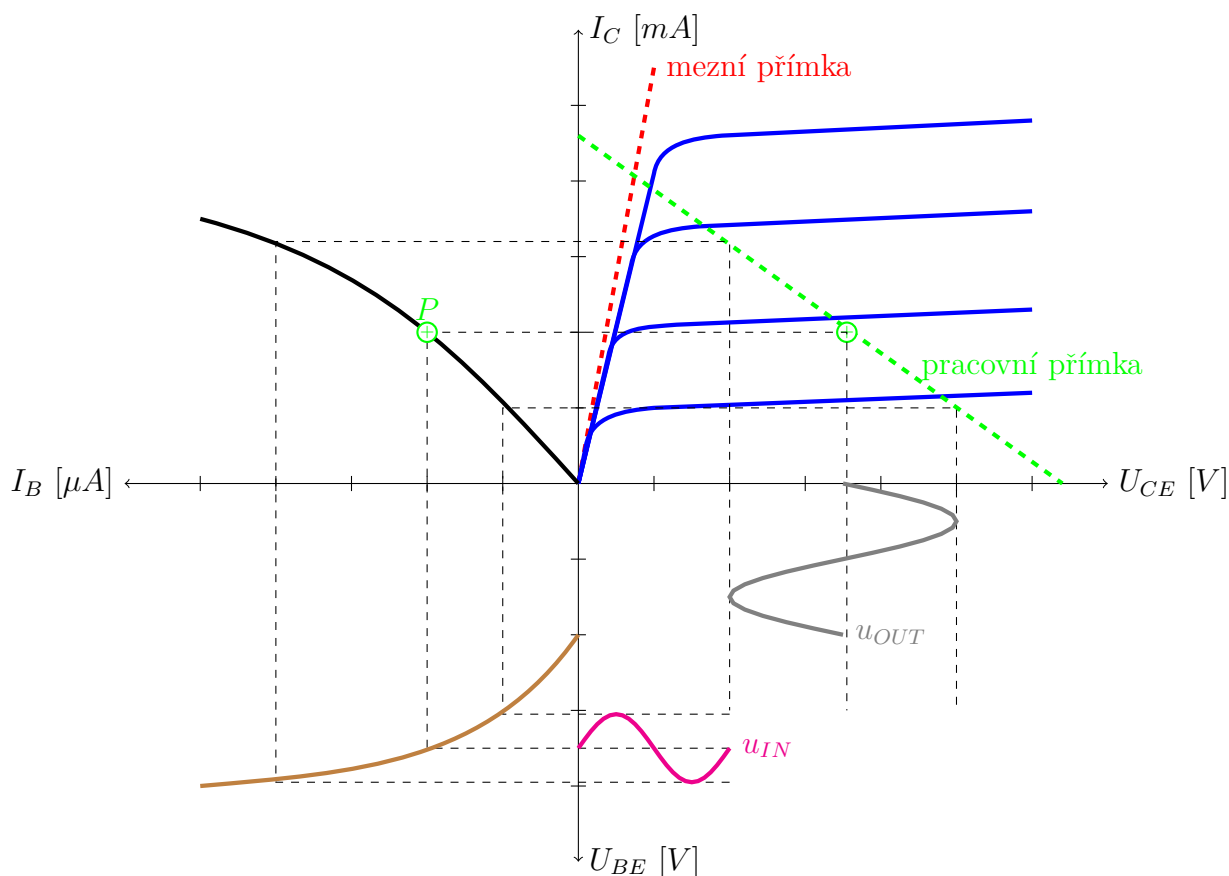
kde $-\frac{1}{R_C}$ je směrnice přímky a $\frac{U_0}{R_C}$ úsek na ose pořadnic. (obr. 3.5). Při naší volbě přímku určíme bodem odpovídající napájecímu napětí a bodem pro zvolený pracovní bod, kterou vyneseme na kvadrantu výstupních charakteristik.

- (b) Do druhého kvadrantu vyneseme závislost kolektorového proudu na proudu báze, tzv. dynamickou proudovou převodní charakteristiku. Zvolíme libovolné měřítko pro proudy do báze a vyneseme odpovídající hodnoty kolektorového proudu ze zatěžovací charakteristiky (průsečíky pracovní přímky a zobrazené charakteristiky). Do této sítě přeneseme pracovní bod.
- (c) Napěťové zesílení porovnává změny kolektorového napětí v závislosti na změnách kolektorového napětí. Třetí kvadrant zobrazuje závislost vstupního proudu do báze na vstupním napětí, potom bychom museli změřit i tuto závislost. V návrhu využijeme toho, že pro křemíkové tranzistory je otevírací napětí 0,5 V a při 0,7 V protéká poměrně velký proud, takže pro další použití vyneseme křivku začínající na 0,5 V, prochází napětím odpovídající hodnotě 0,6 V a končí na napětí 0,7 V. Pro naše účely tato nepřesnost není podstatná. Na tuto křivku přeneseme pracovní bod.
- (d) Přeneseným pracovním bodem na vstupní charakteristice vedeme rovnoběžku s vodorovnou osou, na kterou zobrazíme průběh vstupního napětí s malou amplitudou (volíme 0,05 V) a sledujeme, jak se pohybuje bod po vstupní křivce. Hodnoty vstupního napětí podle naší volby se budou zmenšovat. Sledujme, jak se bude měnit proud do báze. Za tímto účelem sledujme pohyb bodu na převodní charakteristice od klidového pracovního bodu. Zmenšující napětí na vstupu má za následek zmenšující se proud do báze, jak ukazuje průběh na obr. 3.5. Tato změna proudu vyvolá změnu kolektorového proudu a to tak, že se zmenšujícím proudem báze se zmenšuje kolektorový proud. Konečně sledujme tuto změnu, jak se projeví na pracovní přímce. Bod po této přímce se pohybuje do větších hodnot kolektorového napětí. Tímto způsobem můžeme projít průběh celé periody.
- (e) Shrňme-li závěry z předcházejícího odstavce, potom vidíme, že harmonické vstupní napětí je ve fázi s proudem do báze i do kolektoru, ale je v **opačné fázi** než výstupní kolektorové napětí. Z grafu vypočítáním

poměru amplitud výstupního a vstupního napětí lze zjistit napěťové zesílení.

Závěr: napěťový zesilovač obrací fázi a napěťové zesílení je závislé na proudovém zesilovacím činiteli h_{21} a na velikosti kolektorového odporu R_C .

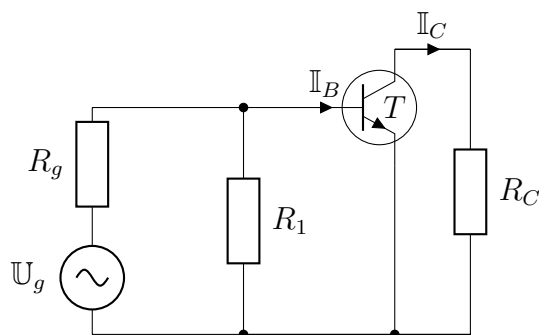
- (f) Zvětšíme-li kolektorový odpor, zvětší se záporná hodnota strmosti přímky, což se projeví posunem přímky k vodorovné ose. Zvolíme pracovní bod o stejném kolektorovém napětí, zmenšením proudu báze, tím se sníží i kolektorový proud, potom z grafického znázornění při stejném vstupním napětí je výsledné kolektorové napětí větší, tedy napěťové zesílení se zvýšilo.



Obrázek 3.5: Vysvětlení činnosti nízkofrekvenčního napěťového zesilovače.

2. Zjednodušené odvození napěťového zesílení

Při odvození napěťového zesílení překreslíme schéma na obr. 3.4 z hlediska střídavého signálu. Vstupní signál pracuje do zátěže paralelního spojení odporu do báze a vstupního odporu tranzistoru h_{11} a tranzistor do paralelního zapojení kolektorového odporu a odporu daném výstupní vodivostí tranzistoru h_{22} (obr. 3.6).



Obrázek 3.6: Náhradní zapojení zesilovače z hlediska střídavého signálu.

V zesilovači volíme vazební odpory tak, aby jejich kapacitance měla velice malý odpor, aby na kapacitě vznikl zanedbatelný úbytek napětí. V náhradním zapojení je neuvažujeme. Z charakteristik tranzistoru je možné zjistit vstupní odpor, který je přibližně $1\text{ k}\Omega$, z převodní charakteristiky proudový zesilovací činitel h_{21} a z výstupních charakteristik hybridní parametr h_{22} . Z hybridních čtyřpólových charakteristik můžeme odvodit náhradní zapojení tranzistoru v zapojení se společným emitorem. Zjednodušené náhradní zapojení je na obr. 3.6. Vstupní obvod neuvažuje parametr h_{12} . Výstupní vodivost je velká a převrácená hodnota výstupního odporu je vysoká a můžeme ji zanedbat vzhledem k odporu R_C . Obdobně odpor pro nastavení bázevého proudu je proti vstupnímu odporu tranzistoru velký a zanedbáme i tuto hodnotu. Potom napěťové zesílení je:

$$A_u = \frac{U_{CE}}{U_{BE}} = \frac{-I_C R_C}{h_{11} I_B} = \frac{-h_{21} I_B R_C}{h_{11} I_B} \quad (3.11)$$

Takže po vykrácení platí pro napěťové zesílení:

$$A_u = \frac{-h_{21} R_C}{h_{11}} \quad (3.12)$$

Z rovnice 3.12 je patrné, že napěťové zesílení závisí na kvalitě tranzistoru s malým vstupním odporem a jeho proudovým zesilovacím činitelem a na velikosti kolektorového odporu.

Zpravidla působí zesilovač do nějaké vnější zátěži, takže tranzistor potom pracuje do paralelním zapojení kolektorového a zatěžovacího odporu. Uvedené zapojení zpravidla nevyhovuje podmínkám v praxi. Existují zapojení, kterými můžeme zajistit kvalitní zpracování vstupního signálu, např. zapojení se zpětnou vazbou, více stupňové zesilovače apod. Tato zapojení nejsou předmětem tohoto úvodu.

Náhradní zapojení z hlediska střídavého signálu.

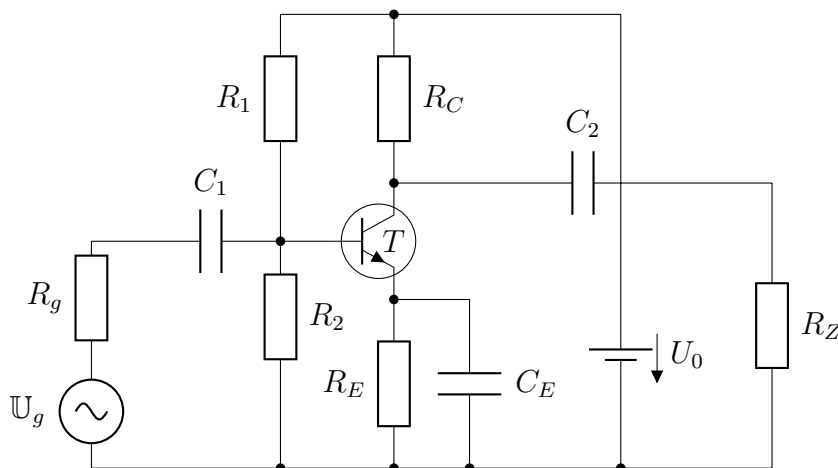
Reálný nízkofrekvenční (dále nf.) zesilovač pracuje do určitého zatěžovacího odporu paralelně připojeného k tranzistoru, jak ukazuje obr. 3.6. Při rozboru volby obvodových prvků nf. zesilovače daného zadání je třeba si uvědomit, že vzhledem k velmi malé hodnotě vnitřního odporu napájecího zdroje a k použitým hodnotám obvodových prvků, jak odpor do báze, tak i kolektorový odpor spolu se zatěžovacím odporem jsou připojeny na nulový potenciál. Signální generátor s napětím U_g pracuje do zatěžovacího odporu, který je paralelní kombinací vstupního odporu tranzistoru určený hybridním parametrem h_{11} a odporu do báze R_B . K této paralelní kombinaci je připojen do série kondenzátor. Požadujeme, aby ztráta vstupního napětí byla co nejmenší. Podmínku splníme, jestliže zvolíme kapacitu vazebního kondenzátoru co možná největší, aby na kapacitanci byl pokud možná nejmenší úbytek napětí. Poznámka: kapacitance je dána $X_C = 1/(\omega C)$. Proveďte diskusi vzájemného vztahu frekvence a kapacity.

Jestliže jsme splnili podmínku nejmenší kapacity, zbývá diskutovat paralelní kombinaci h_{11} a R_B . Vstupní hodnota tranzistoru je přibližně $1\text{ k}\Omega$ a protože odpor do báze souvisí s nastavením pracovního bodu a bývá nejméně řádově větší než vstupní odpor tranzistoru, můžeme při tomto zapojení uzavřít, že při velmi malém vnitřním odporu signálního zdroje pracuje signální zdroj do vstupního odporu, který má poměrně malou hodnotu a představuje neúčinnou výkonovou ztrátu vstupního signálu.

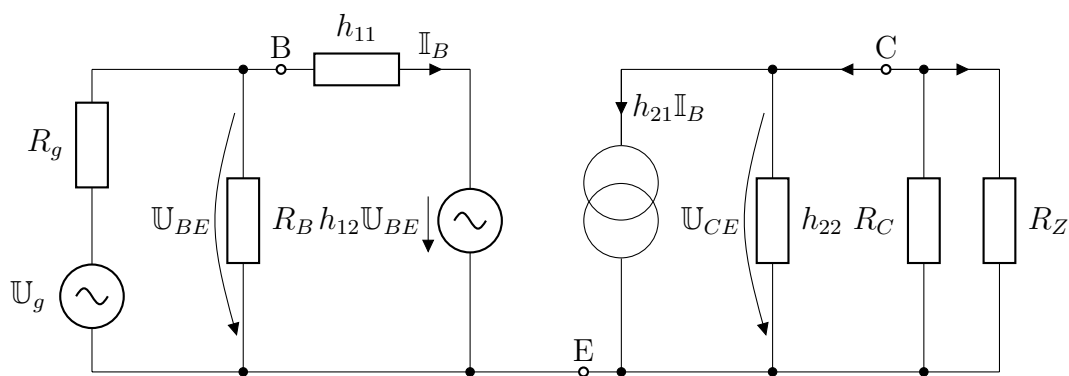
Poznámka: Při malých hodnotách signálního napětí je možné zvýšit vstupní odpor zavedením záporné zpětné vazby. Tento pojem ale není předmětem obsahu našeho textu.

Do jaké zátěže pracuje zesílené výstupní napětí tranzistoru? Podobně jako jsme nebrali v úvahu parametr převodního napětí na vstupu h_{12} , zanedbáme vliv výstupní vodivosti h_{22} , která má velmi malou hodnotu, takže výstupní odpor je velký a je ho možné zanedbat, vzhledem k výsledné hodnotě paralelního zapojení kolektorového a zatěžovacího odporu. K paralelní kombinaci zmíněných odporů je do série připojený vazební kondenzátor C_2 . Požadujeme, aby zesílené napětí pracovalo na paralelní kombinaci odporů, takže úbytek napětí na kapacitance musí být zanedbatelný vzhledem k úbytku napětí na odporech. Toho se dosáhne při zvolené nízké frekvenci větší hodnotou kapacity kondenzátoru. Zbývá diskuse volby kolektorového a zatěžovacího odporu. K dosažení malých tepelných ztrát by měla být výsledná hodnota paralelní kombinace co největší. Kolektorový odpor sloužil nastavení pracovního bodu. Při malých rozkmitech střídavého napětí je možné volit pracovní bod s malými hodnotami kolektorového proudu a malou hodnotou bazového proudu. Pojem „malý“ znamená volit pracovní bod tak, aby zesílený signál nebyl zkreslený, jak můžeme zjistit z grafického znázornění na charakteristikách tranzistoru. Hodnoty para-

lelní kombinace odporů závisí na volbě zatěžovacího odporu. Je patrné, že jako zatěžovací odpor ne zvolíme odpor reproduktoru, jehož impedance je řádově jednotky ohmu. V tomto případě je nutné připojit další výkonový stupeň, o kterém v daném textu nebudeme pojednávat. Z našeho rozboru vyplývá, že diskutujeme nejjednodušší zapojení jednostupňového nízkofrekvenčního zesilovače s malou amplitudou střídavého napětí.



Obrázek 3.7: Jednostupňový zesilovač se zátěží R_Z .



Obrázek 3.8: Náhradní zapojení zesilovače.

3.4.2 Laboratorní část



Úloha 3.3: Měření napěťového zesílení nízkofrekvenčního napěťového zesilovače malého rozkmitu

Úkoly:

1. Pomůcky: zdroj stejnosměrného napětí 5 V, křemíkový tranzistor BD 911, vypočítaný kolektorový a bázový odpor, zdroj nízkofrekvenčního napětí,

vazební kondenzátory o kapacitě $C = 1 \mu\text{F}$ (1 nF, 10 nF, 100 nF), dvou kanálový osciloskop, digitální voltmetr (2 kusy)

2. Postup měření:

- (a) Sestavte obvod podle schématu na obr. 3.4. Změřením kolektorového napětí zkontrolujte nastavení pracovního bodu.
 - (b) Na zdroji nízkofrekvenčního napětí zvolte frekvenci 1 kHz s napětím 0,1 V. Napětí vložte na vstup zesilovače.
 - (c) Změřte vstupní a výstupní napětí a vypočtěte napěťové zesílení.
 - (d) Volte různé kapacity vazebních kondenzátorů a měřte napěťové zesílení.
 - (e) Zobrazte na dvoukanálovém osciloskopu průběh vstupního a výstupního napětí a odečtěte.
3. Teoretický základ: Hybridní čtyřpólové rovnice, význam parametrů h_{21} , h_{11} , h_{12} , h_{22} . Nastavení pracovního bodu z hlediska zpracování střídavého signálu, napěťové zesílení, znázornění výstupního zesíleného signálu v síti charakteristik tranzistoru.

Provedení úlohy:

1. Navrhnete zapojení nízkofrekvenčního napěťového zesilovače.
2. Změřte napěťové zesílení.
3. Na osciloskopu sledujte výstupní a vstupní napětí. Odečtěte velikost napěťového zesílení.

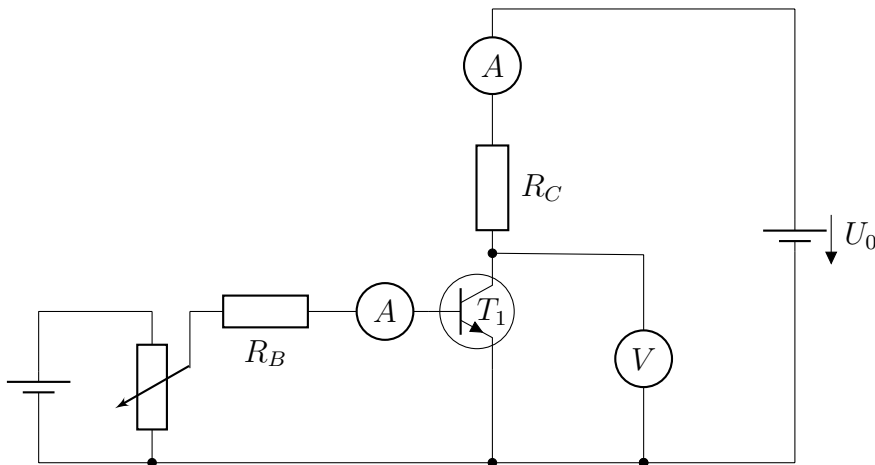
3.4.3 Kontrolní otázky

1. Jaký je význam volby pracovního bodu pro velikost napěťového zesílení?
2. Nakreslete výstupní napětí v síti charakteristik.
3. Co jsou to čtyřpólové rovnice?
4. Jakou závislost vyjadřují hybridní čtyřpólové rovnice?
5. Vysvětlete činnost nízkofrekvenčního napěťového zesilovače.
6. Nakreslete náhradní schéma z hlediska střídavého signálu.
7. Proveďte diskusi hodnot obvodových prvků.
8. Jaký vliv mají vazební kondenzátory na zesílení?

3.5 Tranzistor pracující ve spínacím režimu

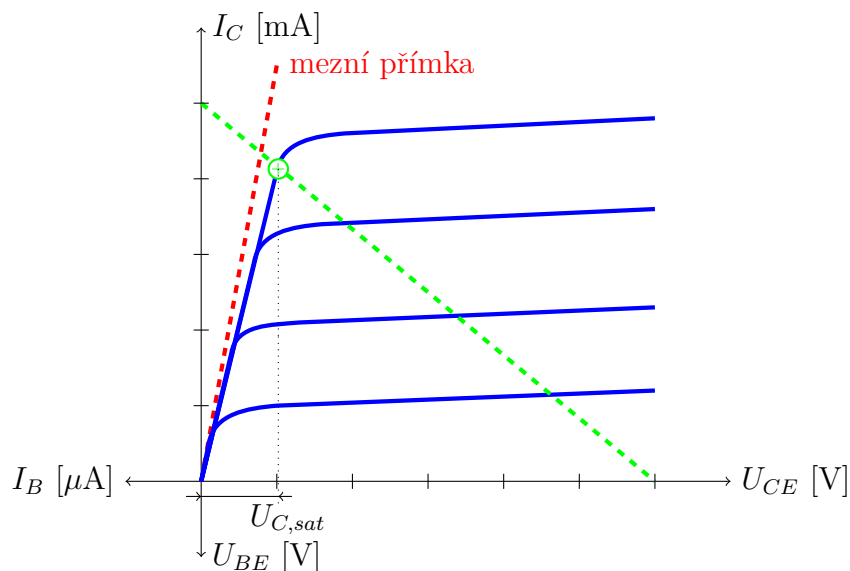
Činnost křemíkového tranzistoru pracujícího ve spínacím režimu ukážeme na tranzistoru typu *NPN* zapojení se společným emitorem. Jestliže tranzistor pracuje ve spínacím režimu, potom musí být jednak uzavřen nebo zcela otevřen. V případě, že je tranzistor uzavřen, tranzistorem neprochází kolektorový proud. Jestliže je otevřen, potom jím prochází maximální možný kolektorový proud a mezi kolektorem a emitorem je saturační kolektorové napětí.

Schéma zapojení je na obr. 3.9. Nastavením bázevého proudu $I_B = 0 \mu\text{A}$ nebo takového proudu, aby napětí mezi bázi a emitorem bylo menší než 0,5 V (u křemíkových tranzistorů otvírací napětí je 0,5 V, u germaniových je otvírací napětí 0,1 V). Obvodem neprochází kolektorový proud, takže kolektorové napětí je rovno napětí zdroje. Při otevření tranzistoru protéká tranzistorem maximální kolektorový proud, a tedy mezi kolektorem a emitorem je minimální tzv. saturační kolektorové napětí.



Obrázek 3.9: Schéma zapojení k ověření činnosti tranzistoru ve spínacím režimu.

Názorné vysvětlení je možné sledovat na změřených výstupních charakteristikách tranzistoru.



Obrázek 3.10: Sledování pracovního bodu tranzistoru na pracovní přímce ve spínacím režimu.

Odvodili jsme rovnici pracovní přímky 3.10, kde volíme parametry: napájecí napětí a kolektorový odpor. Z obrázku je patrné, že při nulovém proudu do báze neprochází kolektorový proud, takže kolektorové napětí je rovno napájecímu napětí. S rostoucím proudem do báze se zvětšuje kolektorový proud a pracovní bod se posouvá podél pracovní přímky k větším kolektorovým proudům a současně se zmenšuje kolektorové napětí. Dalším zvětšováním proudu do báze se pracovní bod umístí v průsečíku pracovní přímky a mezní přímky. Tomuto bodu odpovídá maximální kolektorový proud a saturační kolektorové napětí. V tomto případě je proud satureován a další zvětšování bázevého proudu už nevede ke zvyšování kolektorového proudu.

3.5.1 Laboratorní část



Úloha 3.4: Experimentální ověření spínacího režimu tranzistoru

Úkoly:

1. Na montážním panelu nepájivých polí sestavte obvod podle schématu na obr. 3.9.
2. Změřte maximální proud a kolektorové saturační napětí.

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: zdroj stejnosměrného napětí 5 V (2 kusy), potenciometr $1200 \Omega/0,63 \text{ A}$, ochranný odpor $4\text{k}7 \Omega$, křemíkový tranzistor BD 911, kolektorový odpor $R_C = 120 \Omega (1,2 \text{ k}\Omega)$, digitální voltmetr, digitální ampérmetr (2 kusy)
2. Postup měření:
 - (a) Do výstupních charakteristik vynesete pracovní přímku s hodnotami uvedenými v seznamu pomůcek. Vynesete mezní přímku zajišťující možné hodnoty kolektorového proudu. Průsečík zatěžovací přímky a této mezní přímky určuje maximální proud.
 - (b) Při daném kolektorovém odporu запиšte hodnoty proudů. Posuvným reostatem ověřte teoreticky získané hodnoty maximálního proudu, kdy je tranzistor zcela otevřen. Změřte příslušná saturační kolektorová napětí.
 - (c) Změřte napětí při zcela uzavřeném tranzistoru, kdy neprochází žádný kolektorový proud.
 - (d) Změřením kolektorového napětí sledujte změnu kolektorového napětí od uzavření do otevření tranzistoru. Hodnoty bázevého proudu, kolektorového proudu a kolektorového napětí запиšte do tabulky.
3. Teoretický základ: Význam charakteristik tranzistoru, kdy je tranzistor zcela otevřen a kdy je zcela zavřen.

3.5.2 Kontrolní otázky

1. Nakreslete schéma zapojení ke snímání výstupních charakteristik tranzistoru *NPN*.
2. Závislost kolektorového proudu na kolektorovém napětí určuje rovnici přímky. Odvoďte pomocí Kirchhoffových zákonů ($I_C = (-U_{CE} + U_0)/R_C$). Čím je určena směrnice přímky, co určuje druhý člen rovnice. Jak se projeví hodnoty kolektorového odporu na sklonu přímky?
3. Vysvětlete vznik kolektorového saturačního napětí.
4. Maximální proud musí vyhovovat maximální kolektorové ztrátě, tedy výkonu, který může tranzistor přenášet. Maximální kolektorovou ztrátu najdete v katalogu polovodičových součástek. Ověřte.
5. V jakém vztahu jsou kolektorové napětí, kolektorový proud a proud do báze při uzavřeném a otevřeném tranzistoru?

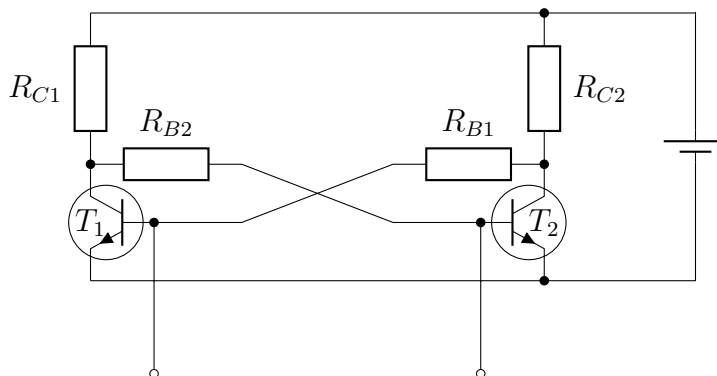
3.6 Klopné obvody

Vlastnosti zcela otevřeného a zcela uzavřeného obvodu tranzistoru jsou využívány v klopných obvodech. Klopné obvody se dělí na bistabilní, monostabilní a astabilní.

3.6.1 Bistabilní klopný obvod

Bistabilní klopný obvod má dva stabilní stavy, ve kterých zůstává libovolně dlouho, pokud do vstupů tranzistorů nepříjde vhodný impuls k překlopení. V případě tranzistorů *NPN* se impuls přivádí na báze tranzistorů a výstupní napětí se odebírá z kolektorů.

Připojením napájecího napětí U_0 některý z tranzistorů vlivem náhodných fluktuací na začátku děje (nejčastěji teplotní nestálost, odlišné zesilovací činitele apod) začne být vodivější než druhý. Předpokládejme, že je to např. tranzistor T_1 .



Obrázek 3.11: Princip činnosti bistabilního klopného obvodu s křemíkovými tranzistory *NPN*.

Narůstající kolektorový proud tranzistoru T_1 zvětšuje úbytek napětí na kolektorovém odporu R_{C1} , takže se kolektorové napětí zmenšuje. Na kolektor tranzistoru T_1 je připojen odpor do báze R_{B2} druhého tranzistoru T_2 , který způsobí, že napětí na jeho bázi poklesne a tento tranzistor se přivře, což se projeví poklesem jeho kolektorového proudu. Na kolektoru tranzistoru T_2 se tím zvýší napětí. Na kolektor tranzistoru T_2 je připojen odpor R_{B1} , přes který se na bázi tranzistoru T_1 přenesou toto zvýšené napětí a tranzistor T_1 se otevře. Volbou obvodových prvků se na kolektoru tranzistoru T_1 objeví saturační napětí U_{1sat} . Toto napětí se přes odpor do báze R_{B2} přenesou na bázi tranzistoru T_2 . Toto napětí je menší než otevírací kolektorové napětí křemíkového tranzistoru (cca 0,5 V), potom kolektorový proud neprotéká a tranzistor T_2 se uzavře. Tranzistor T_2 nevede proud a na jeho kolektoru je napájecí napětí U_0 . Na toto napětí je přes odpor R_{B1} připojena báze T_1 , čímž je tranzistor zcela otevřen.

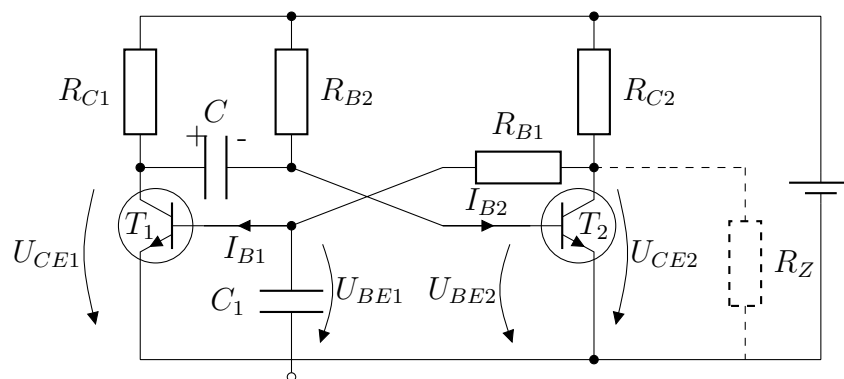
Tento stav trvá až do přivedení spouštěcího impulsu. Výhodnější je přivádět

impulz na otevřený tranzistor, v našem případě na tranzistor T_1 . V tomto případě se snadněji odčerpává saturační náboj z báze a uzavírání a tím i překlápění je rychlejší než v případě, v němž by se otevíral uzavřený tranzistor, který nahromadil větší náboj, a tím by překlápění bylo pomalejší. V případě tranzistoru typu *NPN* se na bázi tranzistoru T_1 přivede záporný impulz. Záporný impulz přivře tranzistor T_1 , čím se zvětší jeho kolektorové napětí. Přes odpor R_{B2} se zvýšení přeneše na bázi tranzistoru T_2 , který se uzavře a jeho kolektorové napětí podpoří uzavření tranzistoru T_1 . Uvedeným způsobem je možné systém překlápět do otevřeného nebo uzavřeného stavu. Připojením spotřebiče, např. žárovky, je možné ovládat rozsvěcování nebo zhasnění žárovky.

3.6.2 Monostabilní klopný obvod

Monostabilní klopný obvod má jeden stabilní stav. Používá se k získání impulzů určité délky. Například k prodloužení nebo zkrácení vstupních impulzů, dále např. k dělení frekvence impulzů, k měření frekvence nebo jako otáčkoměr do auta. Monostabilní klopný obvod je odvozen z bistabilního klopného obvodu nahrazením jedné odporové vazby mezi bází jednoho tranzistoru kapacitní vazbou (obr. 3.12). Obvod má jediný stabilní stav. Do druhého stavu, kvazistabilního, může být přiveden vnějším spouštěcím impulzem a setrvá v něm jen určitou krátkou dobu. Tato doba je určena hodnotami použitých součástek a nezávisí na délce nebo tvaru vstupního impulzu.

Princip činnosti vysvětlíme na základě schématu na obr. 3.12.



Obrázek 3.12: Princip činnosti monostabilního klopného obvodu s křemíkovými tranzistory *NPN*.

Předpokládejme, že v klidovém stavu je tranzistor T_2 ve vodivém a tranzistor T_1 nevodivém stavu, to znamená, že tranzistorem T_2 prochází kolektorový proud a tranzistorem T_1 proud neprochází. K dosažení tohoto stavu je nutné volit správné hodnoty obvodových prvků. Odpor R_{B2} se volí tak, aby tranzistor T_2 v klidovém stavu byl v oblasti nasycení, takže na kolektoru je téměř nulové saturační napětí U_{CE2} . Na toto velice malé napětí je přes odpor R_{B1} připojena

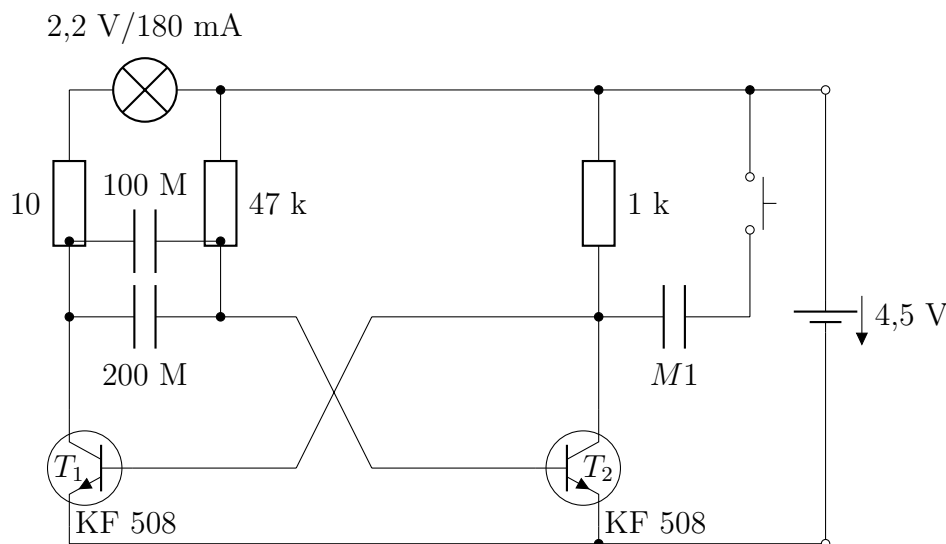
báze tranzistoru T_1 . V důsledku tohoto malého napětí na bázi je tranzistor T_1 uzavřen a neteče proud báze. Klíčovým prvkem pro činnost monostabilního klopného obvodu je kondenzátor C . V dané situaci je kondenzátor C připojen jednak přes odpor R_{C1} na kladný potenciál napájecího zdroje a druhým koncem k bázi tranzistoru T_2 . Napětí na této bázi je velice malé, přibližně 0,5 až 0,7 V a kondenzátor je prakticky připojen na napětí napájecího zdroje, na které se nabíjí.

Tento ustálený stav je možné změnit přivedením kladného impulzu na bázi tranzistoru T_1 . Kladný impulz projde kondenzátorem C_v a způsobí otevření tranzistoru T_1 , kterým protéká maximální přípustný proud. Kolektorové napětí se zmenší na téměř na nulové saturační napětí. V okamžiku, kdy se stane tranzistor T_1 vodivý, kondenzátor C je kladným pólem na nulovém potenciálu zemnicího vodiče a záporným pólem je připojen na bázi tranzistoru T_2 (obr. 3.12), kde je téměř záporné napětí zdroje. Tranzistor T_2 se uzavře. Jeho kolektorové napětí U_{CE2} se zvětší téměř na napětí zdroje U_0 . Na toto kolektorové napětí U_{CE2} je přes odpor R_{B1} připojena báze tranzistoru T_1 , který je tak udržován ve vodivém stavu i po skončení vstupního impulzu. Náboj kondenzátoru C nemůže přejít přes uzavřený tranzistor T_2 a odpor R_{C2} . Na druhé straně je však jedna jeho deska přes otevřený tranzistor T_1 spojena s nulovým potenciálem zemnicího vodiče a druhá přes odpor R_{B2} s kladným pólem zdroje. Tím je splněna podmínka, aby se kondenzátor C nabíjel tak, že deska spojená s bázi tranzistoru T_2 se nabíjí kladně. Jeho náboj roste s časovou konstantou CR_{B2} . Jakmile se kondenzátor nabije na napětí U_{BE2} o hodnotách 0,5 až 0,7 V, tranzistor T_2 se otevře, stane se vodivý. Kolektorové napětí U_{CE2} se zmenší na téměř nulové saturační napětí, takže přestane proud báze tranzistoru T_1 , který se uzavře. V tomto okamžiku se kondenzátor C odpojí záporným pólem od zemnicího vodiče a připojí se ke kolektoru tranzistoru T_1 . Na tomto kolektoru se neobjeví okamžitě napětí zdroje, protože náboj může ještě přecházet na kondenzátor C přes odpor R_{C1} až na plnou hodnotu napájecího napětí U_0 .

Výstupní napětí a tedy i zátěž se připojí ke kolektoru ovládaného tranzistoru kondenzátorem C , tj. v našem případě na tranzistor T_2 . Monostabilní klopný obvod prakticky převede libovolný vstupní impulz o postačující amplitudě k překlopení obvodu na obdélníkový impulz na výstupu s přesně definovanou délkou a amplitudou. Sledujme průběhy napětí v oblasti I (obr. 3.15). Přivedený kladný impulz (obr. 3.15b) otevře tranzistor T_1 . Na bázi T_1 se doštane vrchol vstupního signálu (obr. 3.13c). Tranzistor se otevře, což se projeví poklesem kolektorového napětí U_{CE1} na saturační napětí (obr. 3.15d). Otevření způsobí, že se vlivem záporného potenciálu (vzhledem k nulovému vodiči), desky kondenzátoru přivrácené k bázi tranzistoru T_2 , tento tranzistor okamžitě uzavře, což má za následek strmý bod výstupního napětí. Na kolektoru T_2 je napětí

zdroje (obr. 3.15f), které přes odpor báze R_{B1} udržuje tranzistor T_1 otevřený při saturačním napětí na bázi U_{BE1} (obr. 3.15), i když nepůsobí již vstupní impulz. Báze tranzistoru T_2 (obr. 3.15e) je připojena na uzel s odporem R_{B2} a kondenzátorem C , který se v důsledku připojení na zdroj a zemnicí vodič nabíjí s časovou konstantou $\tau = R_{B2} \cdot C$ (obr. 3.15). Potenciál tohoto uzlu (proti společnému zemnicímu vodiči) se zvyšuje, ale stále je pod úrovní otevření přechodu báze-emitor tranzistoru T_2 .

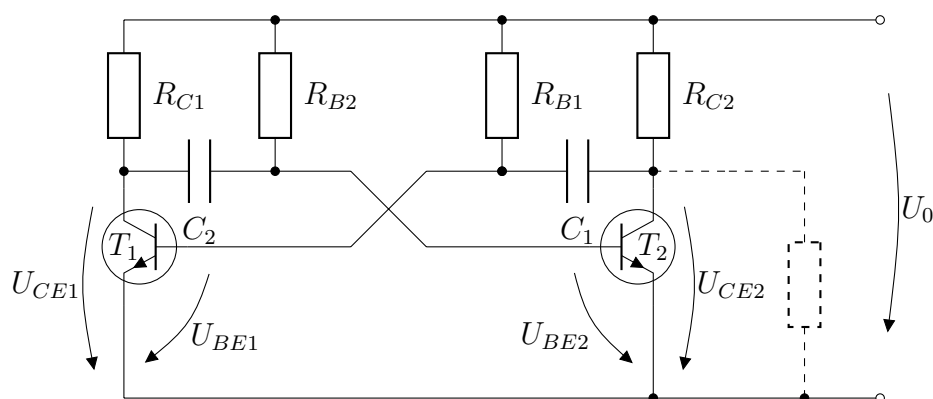
Sledujme průběhy v oblasti II (obr. 3.15). Jakmile dosáhne potenciál hodnoty, kdy se přechod otevře, tranzistor T_2 se stane vodivý a kolektorové napětí tranzistoru T_2 (obr. 3.15f) poklesne na saturační napětí U_{CE2} . Toto napětí působí přes odpor R_{B1} na bázi tranzistoru T_1 a uzavře přechod báze-emitor tohoto tranzistoru, který se stane nevodivý. Překlopením tranzistoru T_2 do stabilního stavu se na bázi tranzistoru T_2 ustálí hodnota saturačního napětí U_{BE2} (obr. 3.15). V důsledku přítomnosti kondenzátoru C kolektorového napětí tranzistoru T_1 nevzroste okamžitě na napětí napájecího zdroje (obr. 3.15d). Kondenzátor C se nyní nabíjí přes odpor R_{C1} (obr. 3.15a) s časovou konstantou $\tau = R_{C1} \cdot C$. Napětí na kolektoru T_1 roste s časovou konstantou τ_1 (obr. 3.15d) na maximální napětí, které se přibližně rovná hodnotě napájecího napětí. Po dosažení maximálního kolektorového napětí se může opět přivést další vstupní impulz a celý děj se opakuje.



Obrázek 3.13: Schéma monostabilního klopného obvodu.

3.6.3 Astabilní klopný obvod

Jedna z možných aplikací spínacího režimu tranzistoru je použití v klopných obvodech. Jako použití v praxi vybereme obvod astabilního klopného obvodu. Stabilní klopný obvod (multivibrátor) generuje pravoúhlé kmity určité frekvence, délky a amplitudy. Základní schéma je na obr. 3.14.



Obrázek 3.14: Astabilní klopný obvod.

Princip činnosti astabilního klopného obvodu s křemíkovými tranzistory *NPN*.

Obvodové prvky jsou zvoleny tak, aby vlivem tepelných změn nebo vlivem nelineárních vlastností tranzistorů se jeden z nich uvedl do vodivého stavu. Předpokládejme, že je to tranzistor T_1 . Volbou obvodových prvků jsou splněny podmínky pro úplné otevření, to znamená, že na kolektoru T_1 bude velice malé saturační kolektorové napětí U_{CEs1} . Bezprostředně po zapnutí napájecího zdroje se přes kolektorové odpory přenesou kladný náboj na desku kondenzátoru přivrácenou ke kolektoru. Na opačné desce se elektrostatickou indukcí vytvoří záporný náboj. Podle našeho předpokladu otevření T_1 je kondenzátor C_2 kladným pólem připojený na nulový zemnicí potenciál a záporným k bázi tranzistoru T_2 . Tranzistor T_2 je tím uzavřen. Na jeho kolektoru se neobjeví okamžitě plné napětí zdroje, protože náboj se také dostává na desku kondenzátoru C_1 přivrácenou ke kolektoru. Napětí na kolektoru tranzistoru T_2 se zvětší na velikost U_0 napájecího zdroje během krátké doby dané nabíjecím kondenzátorem C_1 přes odpor R_{C2} . Obvod je v jednom ze dvou stavů, kde tranzistor T_1 je otevřený, přičemž na jeho kolektoru je téměř nulové saturační napětí a tranzistor T_2 je uzavřený. Na jeho kolektoru je maximální napětí dané napájecím napětím zdroje. K pochopení činnosti je třeba stále sledovat obr. 3.14.

Rozhodující pro činnost astabilního klopného obvodu jsou stavy na kondenzátorech. Kondenzátor C_1 je připojen podle našeho předpokladu jedním koncem na potenciál kolektoru uzavřeného tranzistoru T_2 a druhým na potenciál báze otevřeného tranzistoru T_1 , takže je nabit na napětí $U_0 - U_{BEs}$, kde U_{BEs} je saturační napětí báze. Potenciál báze tranzistoru T_1 je určen průchodem proudu báze odporem R_{B1} . Potenciál kolektoru tranzistoru T_2 je též pevný a je dán uzavřením tranzistoru T_2 . Elektrické pole na kondenzátoru je za tohoto stavu neproměnné a napětí na kondenzátoru se nemění.

Jiná situace je na kondenzátoru C_2 , který je kladným pólem připojen k zápornému zemnicímu vodiči a záporným pólem přes odpor R_{B2} na kladný potenciál zdroje. Náboj na kondenzátoru odtéká a kondenzátor se vybíjí přes

odpor R_{B2} . Napětí na bázi U_{BE2} se postupně stává méně záporné. Po vybití, tedy při nulovém napětí, dochází k nabíjení kondenzátoru, neboť je stále jedním koncem připojen na kladný potenciál zdroje a druhým přes otevřený tranzistor T_1 k nulovému potenciálu napájecího zdroje. Jakmile bude napětí na kondenzátoru C_2 dostatečně kladné, bude též báze tranzistoru T_2 kladná vzhledem k emitoru a tranzistor T_2 se otevře. Napětí na jeho kolektoru U_{CE2} se zmenší na téměř nulové saturační napětí.

Připomeňme si stav na kondenzátoru C_1 do okamžiku otevření tranzistoru T_2 . Kondenzátor C_1 byl nabit tak, že kladný náboj byl na konci přivrácenému ke kolektoru tranzistoru T_2 a záporný na bázi tranzistoru T_1 . Nyní při otevření T_2 je kladným potenciálem připojený na nulový potenciál zemnicího vodiče a záporným na bázi tranzistoru T_1 , který se v důsledku záporného napětí na bázi vzhledem k emitoru uzavře. Napětí na kolektoru tranzistoru T_1 se během nabíjení kondenzátoru C_2 přes odpor R_{C1} zvětší na napětí $U_0 - U_{BEs2}$, které se blíží napětí zdroje. Obvod přešel do druhého kvazistabilního stavu. Kdy tranzistor T_1 je uzavřen, na jeho kolektoru je maximální napětí a tranzistor T_2 je otevřen, na jeho kolektoru je téměř nulové saturační napětí.

Dále se bude děj opakovat s tím rozdílem, že nyní kondenzátor C_1 se bude vybíjet přes odpor R_{B1} a otevřený tranzistor T_2 . Zátěž se připojí buď do kolektorového obvodu nebo paralelně mezi kolektor a emitor.

Oblast I na obr. 3.16 znázorňuje stav otevření tranzistoru T_1 a uzavření tranzistoru T_2 . Na kondenzátoru C_1 je stále napětí (obr. 3.16b). Na bázi otevřeného tranzistoru T_1 je saturační napětí báze U_{BEs1} (obr. 3.16c) a na jeho kolektoru kolektorové saturační napětí U_{CEs1} (obr. 3.16d). Tento stav zůstává nezměněný až do překlopení obvodu. Kondenzátor C_2 se vybíjí přes otevřený tranzistor T_1 s časovou konstantou $\tau_2 = C_2 \cdot R_{B2}$ (obr. 3.16a). Tentýž průběh je na bázi tranzistoru T_2 (obr. 3.16e). Napětí na kolektoru doposud uzavřeného tranzistoru T_2 má konstantní hodnotu U_0 (obr. 3.16f). V okamžiku dostatečné velikosti kladného napětí U_{BE2} dojde k překlopení obvodu, tedy ke změně stavu.

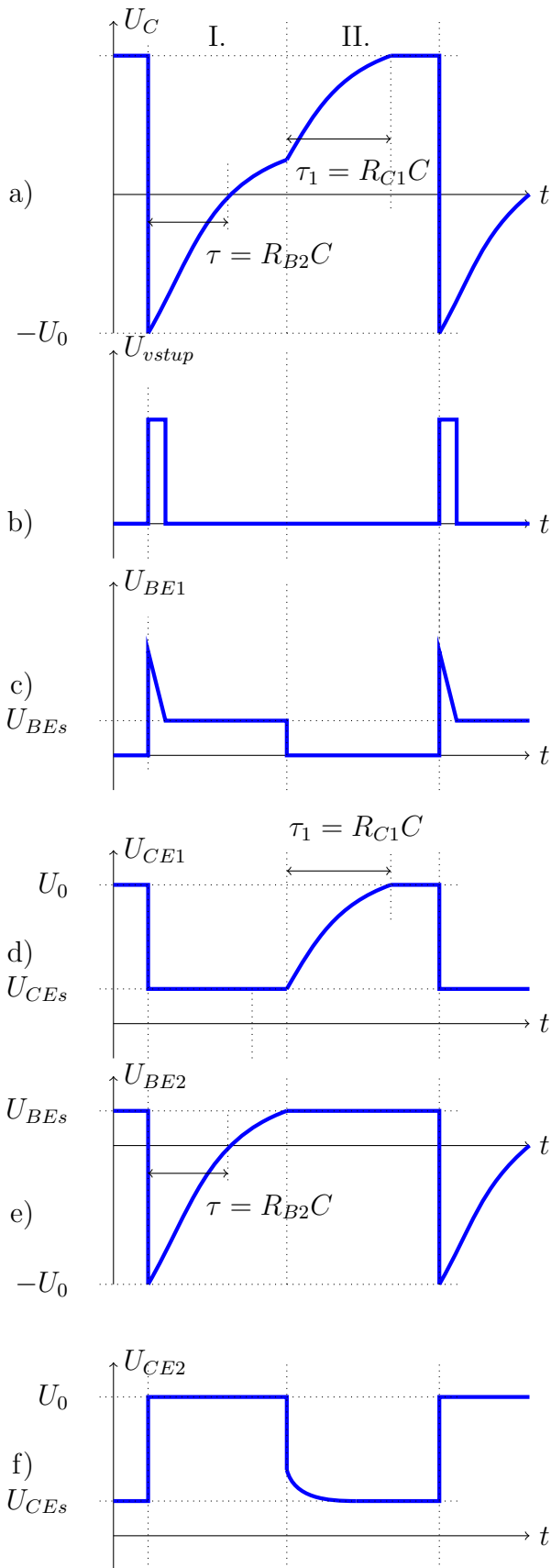
Průběhy napětí po překlopení jsou znázorněny na obr. 3.16 v oblasti II. Na bázi tranzistoru T_2 se ustálí saturační napětí báze U_{BEs2} (obr. 3.16c) a napětí na kolektoru prudce poklesne na hodnotu saturačního napětí kolektoru U_{CEs2} (obr. 3.16f). Současně se také uplatní vliv napětí na kondenzátoru C_1 , který byl v předešlém stavu nabit na napětí zdroje. Otevřením tranzistoru T_2 se projeví záporný potenciál kondenzátoru C_1 na bázi tranzistoru T_1 . Napětí na kondenzátoru C_1 prudce poklesne a zápornou hodnotu vzhledem k nulovému zemnicímu vodiči. (obr. 3.16b). Stejně záporné napětí se objeví samozřejmě také na bázi tranzistoru T_1 (obr. 3.16c) a tranzistor T_1 se uzavře. Kolektorové napětí narůstá s časovou konstantou $\tau_3 = C_1 \cdot R_{C1}$ na maximální hodnotu (obr. 3.16d). Kondenzátor C_2 po dosažení kladného napětí potřebného k otevření tranzis-

toru T_2 se dále nenabíjí přes T_1 , protože se uzavřel. Na napětí zdroje se nabije přes odpor R_{C1} s časovou konstantou $\tau_2 = C_2 \cdot R_{C1}$ (obr. 3.16a). Současně se kondenzátor C_1 vybíjí přes odpor R_{B1} a otevřený tranzistor T_2 s časovou konstantou $\tau_1 = C_1 \cdot R_{B1}$ (obr. 3.16b). Stejný průběh napětí sleduje báze tranzistoru T_1 (obr. 3.16c) a po dosažení určitého kladného napětí tranzistor T_1 se otevře a děj se opakuje.

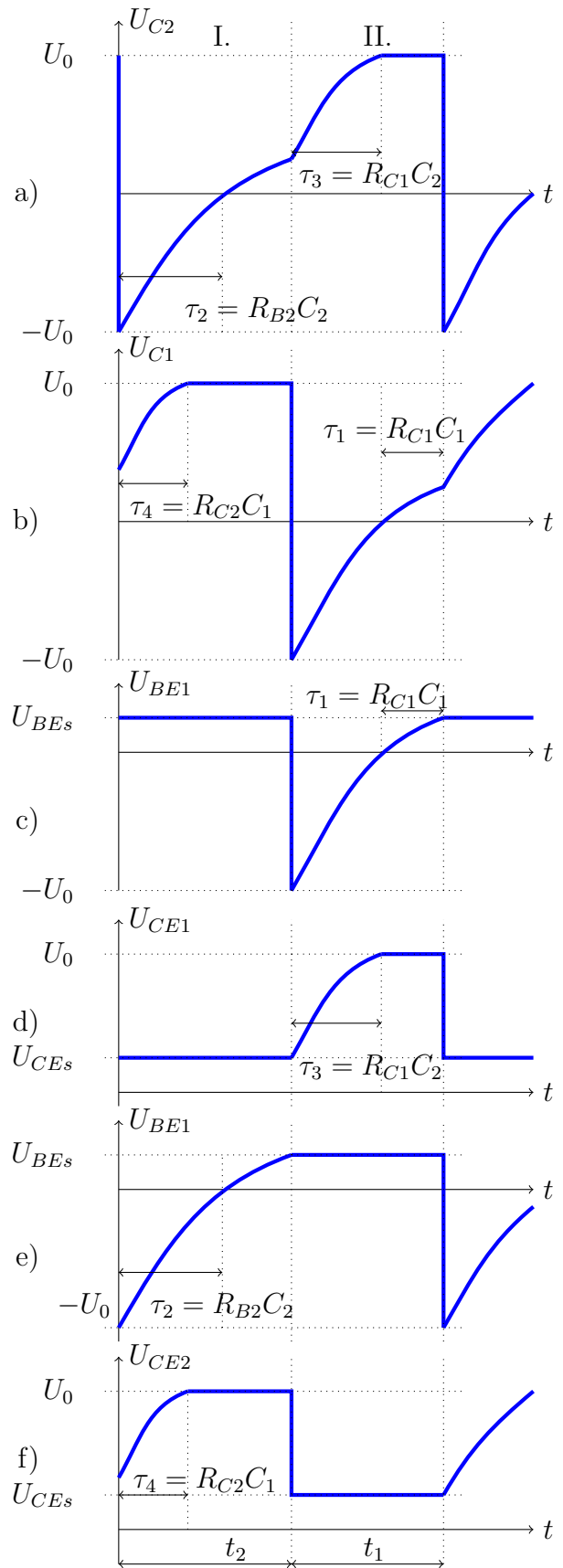
Zkrácené vysvětlení: Potřebný přenos záporného náboje na bázi tranzistoru T_2 není okamžitý, protože potenciál báze a tedy též potenciál záporné desky je také ovlivněn úbytkem napětí na odporu R_{B2} procházejícím bázovým proudem tranzistoru T_2 . Protože kolektorový proud je závislý na proudu do báze, je průběh kolektorového napětí závislý na změnách bázového proudu. Kolektorové napětí tranzistoru T_2 je dáno průběhem napětí na jeho bázi.

Sledujme tedy tento průběh. V okamžiku otevření tranzistoru T_1 je kondenzátor C_2 připojen zápornou deskou (obr.3.9) na bázi T_2 a přes odpor R_{B2} na kladný pól napájecího zdroje U_0 . Kondenzátor C_2 se nabíjí přes odpor R_{B2} na vyšší potenciál vzhledem k původnímu $-U_0$ s časovou konstantou $\tau_2 = R_{B2}C_2$. Po dosažení nulové hodnoty se nabíjí na otevírací napětí tranzistoru T_1 . Tranzistor T_1 se otevírá, takže kondenzátor C_1 kladnou deskou se připojuje k nulovému napětí zdroje a zápornou deskou ovlivňuje potenciál báze tranzistoru T_2 , který se postupně uzavírá a přivrácená deska kondenzátoru ke kolektoru tranzistoru T_2 se odpojuje od zemního nulového potenciálu a přes kolektorový odpor R_{C1} se kondenzátor C_2 dobije na plné napětí zdroje s časovou konstantou $\tau_3 = R_{C1}C_2$.

Shrneme tuto situaci z hlediska stavu na kondenzátorech: Rozhodující pro činnost astabilního klopného obvodu jsou stavy na kondenzátorech. Průběhy na kolektorech obou tranzistorů jsou zobrazeny na obr. 3.16.



Obrázek 3.15: Průběhy kolektorového napětí na tranzistorech monostabilního klopného obvodu. a) na C , b) vstupní impuls, c) na bázi T_1 , d) na kolektoru T_1 , e) na bázi T_2 , f) na kolektoru T_2 .



Obrázek 3.16: Průběhy kolektorového napětí na tranzistorech astabilního klopného obvodu. a) na C_2 , b) na C_1 , c) na bázi T_1 , d) na kolektoru T_1 , e) na bázi T_2 , f) na kolektoru T_2 .

3.6.4 Laboratorní část



Úloha 3.5: Navrhněte tranzistorový blikáč s křemíkovými tranzistory, s žárovkou 2,2 V/180 mA

Úkoly:

1. Změřte čas svícení a zhasnutí žárovky a porovnejte s vypočítanými hodnotami.
2. Zdůvodněte odlišné výsledky.

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: napájecí zdroj stejnosměrného napětí 5 V, žárovka 2,2 V/180 mA, odpory, kondenzátory podle vypočítaných hodnot z návrhu úlohy
2. Postup měření:

(a) Výpočet hodnot obvodových prvků: Kolektorový odpor je dán vztahem $R_{C2} = \frac{U_0 - U_{CEs2}}{I_{C2}} = \frac{5 - 0,2}{180 \times 10^{-3}}$. Odpor žárovky je $R_Z = \frac{U_Z}{I_{C2}}$. Kolektorovému proudu vyhovuje tranzistor BD 911. Z charakteristik jsme zjistili proudový zesilovací činitel nakrátko $h_{21} = 120$. Pro výpočet vezmeme $\beta = 60$. Požadovaný proud báze je:

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta} \quad (3.13)$$

Tomuto proudu odpovídá odpor báze:

$$R_{B2} = \frac{U_0 - U_{BEs2}}{I_{B2}} \quad (3.14)$$

položíme $U_{BEs2} = 0,6$ V a zvolíme kolektorový odpor $R_{C1} = 100 \Omega$

$$I_{C1} = \frac{U_0 - U_{CEs1}}{R_{C1}} \quad (3.15)$$

Vypočítáme

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta} \quad (3.16)$$

Odpor do báze

$$R_{B2} = \frac{U_0 - U_{BEs1}}{I_{B1}} \quad (3.17)$$

Žárovka bude svítit, když bude tranzistor T_2 otevřen, tedy po dobu uzavření tranzistoru T_1 . V tomto základním kurzu se nebudeme zabývat podrobně návrhem hodnot kapacit kondenzátorů. Použijeme kondenzátory $C_2 = 1000 \mu\text{F}$ a $C_1 = 100 \mu\text{F}$.

(b) Změřte dobu svícení a dobu zhasnutí žárovky

3. Teoretický základ: Překlápění obvodů, podstata činnosti tranzistoru ve spínacím režimu, znázornění ve výstupních charakteristikách, dosažení kolektorového saturačního napětí, určení časové konstanty.

3.6.5 Kontrolní otázky

1. Jaký je rozdíl mezi bistabilním, monostabilním a stabilním klopným obvodem?
2. V jaké aplikaci byste užili bistabilní klopný obvod?
3. V jaké aplikaci byste užili monostabilní klopný obvod?
4. V jaké aplikaci byste užili astabilní klopný obvod?
5. Vysvětlete princip činnosti bistabilního klopného obvodu.
6. Vysvětlete princip činnosti monostabilního klopného obvodu
7. Vysvětlete princip činnosti astabilního klopného obvodu.
8. Jakým způsobem dosáhneme kolektorové saturační napětí. Vysvětlete pomocí zatěžovací charakteristiky vynesené ve výstupních charakteristikách.
9. Na čem závisí překlápění obvodu? Kde budeme hledat chyby, když obvod nebude překlápět?
10. Nakreslete schéma bistabilního, monostabilního a astabilního klopného obvodu a vysvětlete užití obvodových prvků.

3.6.6 Příklady

1. Navrhněte tranzistorový blikáč s tranzistorem BD 911 se žárovkou 2,2 V/180 mA, která by se rozsvěcovala jednou za sekundu (2, 4, 6 sekundy) a svítila by vždy po dobu 0,3 sekundy (jedné sekundy).

Návod:

- (a) K návrhu je třeba znát proudový zesilovací činitel nakrátko h_{21} . Najděte ho z převodních proudových charakteristik pro střední část pracovní přímky.

- (b) Vztahy pro výpočet: kolektorový odpor $R_{C2} = (U_0 - U_{CEs2})/I_{C2} = 4,8/180 \cdot 10^{-3}$. Odpor žárovky je:

$$R_Z = U_Z/I_{C2}$$

- (c) Nakreslete schéma zapojení pro případ, že žárovka bude v kolektorovém obvodu tranzistoru T_2 .

Kolektorovému proudu vyhovuje tranzistor BD 911. Z charakteristik jsme zjistili například proudový zesilovací činitel nakrátko $h_{21} = 120$. Pro výpočet vezmeme $\beta = 60$. Požadovaný proud báze je:

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta}$$

Tomuto proudu odpovídá odpor báze:

$$R_{B2} = \frac{U_0 - U_{BEs2}}{I_{B2}} \quad (\text{položíme } U_{BEs2} = 0,6 \text{ V})$$

Zvolíme kolektorový odpor $R_{C1} = 100 \Omega$, dostaneme:

$$I_{C1} = \frac{U_0 - U_{CEs1}}{R_{C1}}$$

Vypočítáme:

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta}$$

Odpor do báze:

$$R_{B1} = \frac{U_0 - U_{BEs1}}{I_{B1}}$$

- (d) Žárovka bude svítit při otevřeném tranzistoru T_2 , to znamená při uzavření tranzistoru T_1 . Tento tranzistor nemusí tedy spínat velké proudy, takže by nemusel tímto tranzistorem procházet tak velký proud. To by znamenalo volit poměrně malý kolektorový proud I_{C1} , který bychom nastavili velkou hodnotou kolektorového odporu R_{C1} . Při vypočítané hodnotě kapacity kondenzátoru C_2 by to však vedlo k velké době náběhu. Náběžná hrana by byla málo strmá. Musí být splněna nerovnost, aby doba náběhu t_3 byla menší nebo rovna době uzavření t_1 tranzistoru T_1 . Tedy:

$$t_3 \leq t_1$$

Tranzistor T_1 je uzavřen po dobu t_1 , kdy svítí žárovka a kdy je otevřen tranzistor T_2 . Doba kmitu $T = t_1 + t_2$. Ze zadání známe frekvenci, počet rozsvícení za sekundu, tj. žárovka se rozsvěcuje vždy za jednu sekundu,

tedy perioda $T = 1/f = 1 \text{ s}$. Odtud vypočítáme dobu zhasnutí t_2 . Odtud:

$$t_2 = T - t_1 = \frac{1}{f} - t_1 = \frac{1}{1} \text{ s} - 0,3 \text{ s} = 0,7 \text{ s}$$

Kapacitu kondenzátoru C_2 vypočítáme podle:

$$C_2 = \frac{t_2}{0,69R_{B2}} = \frac{0,7}{0,69 \cdot 10^3} = 10^{-3} \text{ F} = 1000 \mu\text{F}$$

Dobu náběhu ovlivňuje odpor R_{C1} , přičemž musí platit vztah $t_3 \leq t_1$. Po dosazení za t_3 z rovnice:

$$t_3 = \ln 10 \cdot \tau_3 = 2,3 R_{C1} C_2$$

z nerovnosti $t_3 \leq t_1$, tedy:

$$2,3 R_{C1} C_2 \leq t_1$$

$$R_{C1} \leq \frac{t_1}{2,3 C_2} = \frac{0,3}{2,3 \cdot 10^{-3}} = 130 \Omega$$

Zvolíme $R_{C1} = 82 \Omega$.

Kolektorový proud je potom:

$$I_{C1} = \frac{U_0 - U_{CEs1}}{R_{C1}} = \frac{5 - 0,5}{82} = 55 \text{ mA}$$

Požadovaný proud báze je:

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta} = 1,1 \text{ mA}$$

Odtud odpor do báze

$$R_{B1} = \frac{U_0 - U_{BEs1}}{I_{B1}} = \frac{5 - 0,5}{1,1 \cdot 10^{-3}} = 4,1 \text{ k}\Omega$$

Máme všechny hodnoty pro výpočet kapacity kondenzátoru C_1

$$C_1 = \frac{t_1}{0,69R_{B1}} = \frac{0,3}{0,69 \cdot 4,1 \cdot 10^3} = 106 \mu\text{F}$$

Zvolíme $C_1 = 100 \mu\text{F}$ Pro tuto kapacitu je odpor báze:

$$R_{B1} = \frac{t_1}{0,69C_1} = \frac{0,3}{0,69 \cdot 10^{-4}} = 4348 \Omega$$

Zvolíme pevný odpor $3,9 \text{ k}\Omega$ a odporový trimr 560Ω . Doba náběhu napětí při uzavřeném tranzistoru T_2 musí být také menší než doba uzavření. Tedy:

$$t_4 \leq t_2$$

Dosazením do rovnice

$$t_4 = \ln 10 \cdot \tau_4 = 2,3 R_{C2} C_1 = 2,3 \cdot 22 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0,005 \text{ s}$$

Protože $t_2 = 0,7 \text{ s}$, je tato nerovnost splněna. Tím je návrh ukončen.



Shrnutí kapitoly 3

V rámci kapitoly byly shrnuty základní koncepty použití tranzistorů v jednoduchých elektrických obvodech jakožto po diodách základních polovodičových komponent elektronických zařízení. Na praktických experimentálních úlohách a teoretických otázkách bylo ověřeno studentovo pochopení dané problematiky.

Analogové integrované obvody – operační zesilovače



Cíle kapitoly

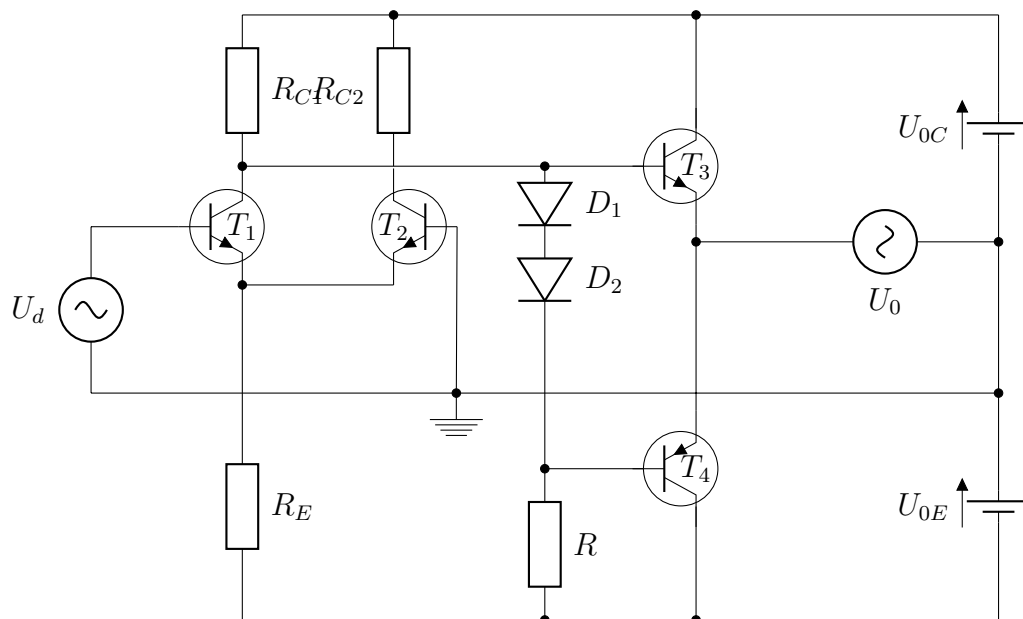
Cílem kapitoly je podat základní přehled o operačních zesilovačích a jejich použití v jednoduchých elektrických obvodech. V textu jsou podrobně komentovány základní zapojení operačního zesilovače a jeho základní vlastnosti.



Klíčová slova

Operační zesilovač, komparátor, sledovač, zesilovač, el. obvod, zdroj napětí, schéma el. obvodu

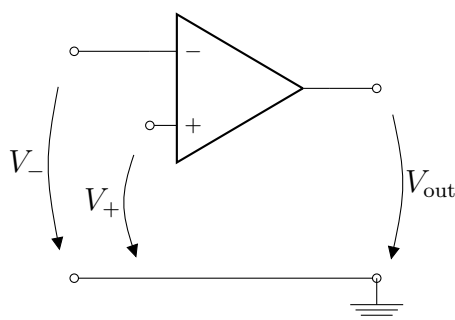
Z analogových integrovaných obvodů byly vybrány aplikace s operačními zesilovači. Operačními zesilovači v integrované podobě je takové uspořádání elektronických prvků, které mají velké napěťové zesílení, velký vstupní odpor a nepatrný výstupní odpor. Hodnoty budou upřesněny v dalším textu. Vstupní signál je veden na vstupy rozdílového zesilovače, který realizuje velký vstupní odpor, řádově megaohmy. Na vstupním rozdílovém zesilovači závisí kvalita operačních zesilovačů. Rozdílový stupeň je na obr. 4.1 realizován tranzistory T_1 a T_2 . Vstupní signál je u reálných operačních zesilovačů zesilován v dalších stupních, které nejsou pro pochopení činnosti podstatné a nejsou zakreslené. Výstupní obvod je realizován výkonovým stupněm s komplementárními tranzistory, tedy tranzistorem typu NPN , na obrázku T_3 , a tranzistorem typu PNP , na obrázku T_4 . Charakteristické je souměrné napájecí napětí. Zjednodušené schéma je uvedeno na obr. 4.1 [4].



Obrázek 4.1: Zjednodušené schéma operačního zesilovače.

Podle obr. 4.1 vstupní napětí U_d vložené na jeden ze vstupních tranzistorů, např. tranzistor T_1 způsobí proudové změny ve vstupním rozdílovém stupni. Následkem toho se změní kolektorové napětí NPN tranzistoru T_1 . Změna se předá na výstup daného stupně. Vloží-li se např. na bázi tranzistoru T_1 kladný potenciál pracovního vstupního signálu, potom tranzistorem T_1 prochází větší kolektorový proud a kolektorové napětí poklesne. Tím se zmenší potenciál báze výkonových tranzistorů, přičemž se uzavře tranzistor T_3 typu NPN a otevře tranzistor T_4 (typ PN). Proud prochází obvodem s měřícím přístrojem, tranzistorem T_4 a zdrojem U_{0E} . Výstupní napětí U_0 je proti zemnímu potenciálu záporné a tedy invertované. Vstup tranzistoru T_1 se nazývá invertující.

Vložení signálního zdroje na tranzistor T_2 se pomocí podobné úvahy dojde k závěru, že výstupní napětí U_0 je proti zemnímu potenciálu kladné a tedy neinvertované. Vstup tranzistoru T_2 se nazývá neinvertující. Podrobné vysvětlení je možné najít v literatuře [4]. Schematická značka operačního zesilovače je uvedena na obr. 4.2, kde číslicí 2 je označen invertující vstup a číslicí 3 neinvertující vstup.



Obrázek 4.2: Schematická značka operačního zesilovače.

Výkonový stupeň je možné chápat jako Wheatstonův můstek. Napájecí napětí U_{0C} a U_{CE} souměrného napáječe tvoří pevné části můstku, výstupní tranzistory T_1 a T_2 představují proměnné části. Mezi oběma částmi se snímá zesílené výstupní napětí. Protože střed napájecího zdroje je spojen se zemnicím vodičem (souměrné napájení), má zesilovač pevnou vazbu k zemnicímu vodiči, k němuž se též vztahuje výstupní napětí operačního zesilovače, jak je vidět se zapojení na obr. 4.2.

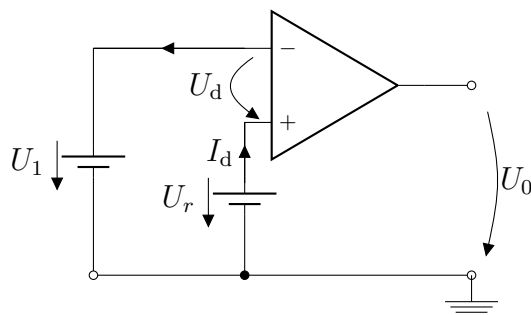
V aplikacích navrhne obvod komparátoru, invertujícího zesilovače a neinvertujícího zesilovače. K snadnějšímu návrhu obvodů budeme předpokládat, že operační zesilovače mají tyto ideální vlastnosti:

1. Napěťové zesílení s otevřenou zpětnovazební smyčkou je $A_{0L} \rightarrow \infty$. Otevření zpětnovazební smyčka znamená, že není přivedeno žádné napětí z výstupu na vstup zesilovače.
2. Vstupní odpor se blíží k nekonečnu, $R_e \rightarrow \infty$.
3. Výstupní odpor je přibližně roven nule, $R_a = 0$.
4. Šířka přenášeného frekvenčního pásma je nekonečná.
5. Jsou-li vstupní napětí sobě rovna, $U_1 = U_2$, výstupní napětí je nulové, $U_0 = 0$. Vzhledem k označení souměrného napájecího napětí U_{0C} a U_{0E} je výstupní napětí značeno U_0 .

4.1 Komparátor

Operační zesilovače je možné využít při porovnávání napětí na jednom vstupu s napětím na druhém vstupu, tzv. referenčním napětím. Obvykle se operační zesilovač jako komparátor zapojuje bez zpětnovazební sítě. Potom se využívá působení vlastního zesílení s otevřenou zpětnovazební smyčkou. Vstupní napětí mikrovoltové úrovně a proudy nanoampérové úrovně jsou schopny plně vybudit

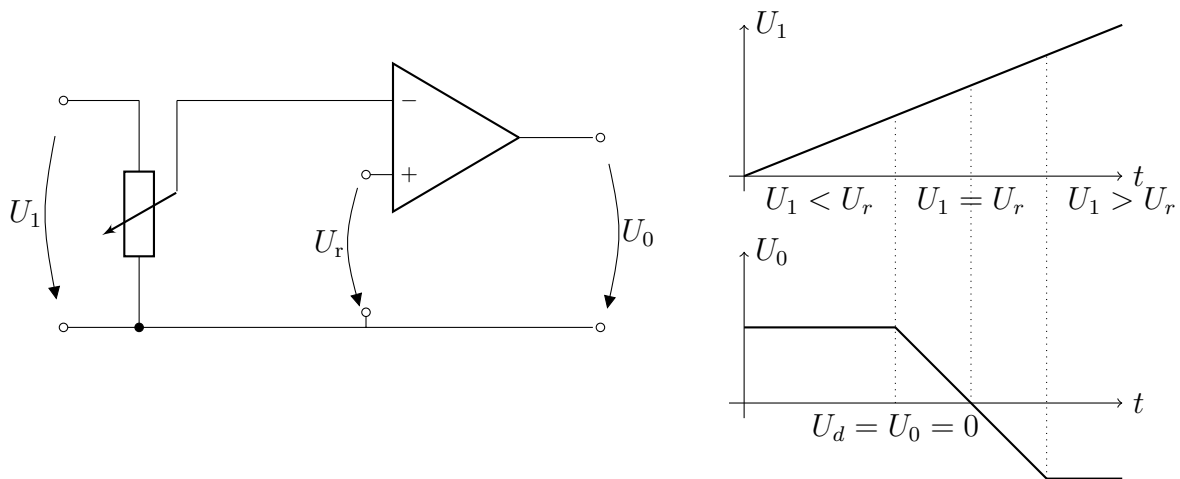
operační zesilovač, to znamená, že na výstupu bude úroveň saturačního (nasyceného) napětí. Polarita výstupního napětí je určena polaritou rozdílového napětí U_d (obr. 4.3).



Obrázek 4.3: Základní zapojení komparátoru.

Činnost komparátoru spočívá na základní vlastnosti operačních zesilovačů, kde mikrovoltová úroveň rozdílového napětí na vstupech vybudí výstup do saturace, to znamená, že výstupní napětí je nasycené v maximální hodnotě. Použijeme-li např. souměrné napájecí napětí ± 15 V, bude výstupní saturační napětí menší o saturační kolektorové napětí výstupních výkonových tranzistorů, které je přibližně 0,7 V, takže saturační napětí je menší o 1,4 V, než je napájecí napětí. Polarita výstupního napětí je určena polaritou rozdílového napětí na plusové, neinvertující vstupní svorce. Například jestliže signální napětí je menší než referenční napětí U_r , bude na plusové svorce operačního zesilovače kladný potenciál. Potom nepatrná část proudu teče vstupním odporem (obr. 4.3). Tento nepatrný rozdílový proud vytvoří na vstupním odporu (řádově megaohmy) úbytek napětí U_d . Toto napětí bude silně zesíleno, takže zesilovač bude silně přebuzen, výstupní napětí se stane nasycené. Dojde tak k saturaci. Protože za uvedených podmínek má plus neinvertující svorka vyšší potenciál než minus invertující svorka, bude výstupní napětí orientováno tak, že vyšší (kladný) potenciál je na výstupní svorce (obr. 4.4).

Ověření závislosti výstupního a vstupního napětí komparátoru: Nastavíme velikost signálního napětí U_1 menší než referenční napětí U_r , potom na plus svorce operačního zesilovače je kladný potenciál a na výstupu bude kladné saturační napětí. Zvyšováním vstupního napětí U_1 , potom pro velice malé napěťové změny se bude zmenšovat výstupní napětí a při určité hodnotě $U_1 > U_r$ se výstupní napětí nastaví do záporné saturace (obr. 4.4).



Obrázek 4.4: Závislost vstupního a výstupního napětí.

4.1.1 Laboratorní část



Úloha 4.1: Ověření nastavení kladné a záporné saturace v závislosti na vstupním napětí.

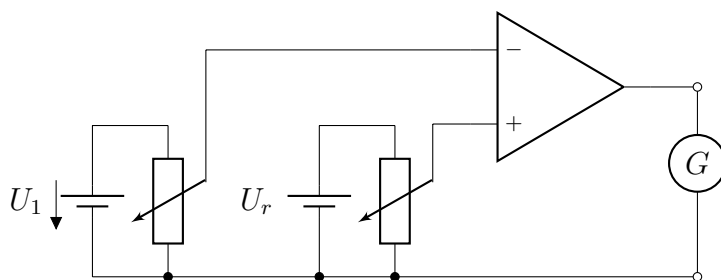
Úkoly:

1. Na základě schématu na obr. 4.3 navrhnete obvod k ověření dosažení kladné a záporné saturace.
2. Ověřte základní vlastnosti napěťového komparátoru. Použijte zapojení na obr. 4.4 a obr. 4.5

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: zdroj souměrného stejnosměrného napětí ± 15 V, operační zesilovač, např. MAA 741, montážní deska s nepájivými vývody, demonstrační galvanometr s nulou uprostřed, stejnosměrné referenční napětí, např. $U_r = 3$ V, signální napětí, např. $U_1 = 4$ V, potenciometr, např. 1200Ω (2 kusy), zdroj harmonického napětí 5 V, osciloskop
2. Postup měření:
 - (a) Na montážním přípravku sestavte komparátor podle schématu na obr. 4.5. Referenční napětí nastavte pomocí potenciometru na určitou hodnotu a změnou signálního napětí na minus vstupu měňte potenciometrem napětí od nulové hodnoty. Na galvanometru s nulou uprostřed sledujte napětí na výstupu komparátoru.

- (b) Změřte vstupní a výstupní napětí a zaznamenejte hodnotu vstupního napětí, kdy dojde k opačné saturaci.
- (c) Porovnejte hodnotu výstupního saturačního napětí s hodnotou napájecího napětí. Podle obr. 4.1 vysvětlete, proč je výstupní napětí menší než napájecí napětí.
- (d) Minus svorku připojte na nulový zemnicí vodič a na plus svorku připojte zdroj sinusového napětí. Na výstup komparátoru připojte osciloskop a sledujte tvar a hodnoty výstupního napětí. Vysvětlete vznik obdélníkového průběhu výstupního napětí. Nakreslete schéma obvodu k přeměně sinusového napětí na obdélníkové napětí. K jakému referenčnímu napětí porovnáváte sinusové napětí? Zvolte referenční napětí např. 1 volt a experiment opakujte. Výsledek zaznamenejte do protokolu.
3. Teoretický základ: vlastnosti operačních zesilovačů, rozdílový stupeň, souměrné napájení, invertující a neinvertující vstup, zjednodušené zapojení operačního zesilovače.



Obrázek 4.5: Závislost vstupního a výstupního napětí.

1. Sestavte obvod podle schématu 4.4
2. Nastavte nulové vstupní signální napětí a sledujte výstupní saturační napětí.
3. Změřte vstupní a výstupní napětí a zaznamenejte hodnotu vstupního napětí, kdy dojde k opačné saturaci.
4. Porovnejte hodnotu výstupního saturačního napětí s hodnotou napájecího napětí, podle obr. 4.1 vysvětlete, proč je výstupní napětí menší než napájecí napětí.

4.1.2 Kontrolní otázky

1. Jaké jsou vlastnosti operačních zesilovačů?

2. Jaký je rozdíl mezi souměrným a nesouměrným napájením. Porovnejte napájení v tranzistorových obvodech s napájením operačního zesilovače.
3. Vysvětlete činnost rozdílového stupně na zjednodušeném schématu operačního zesilovače.
4. Vyjmenujte vlastnosti ideálního operačního zesilovače.
5. Co je to komparátor?
6. Nakreslete základní schéma komparátoru s operačním zesilovačem.
7. Nakreslete schéma zapojení k ověření nastavení kladné a záporné saturace.
8. Nakreslete schéma zapojení komparátoru k přeměně sinusového napětí na napětí obdélníkového průběhu.
9. Jaké jsou vstupní proudy operačních zesilovačů?
10. Čím je omezena velikost výstupního zatěžovacího proudu komparátoru?

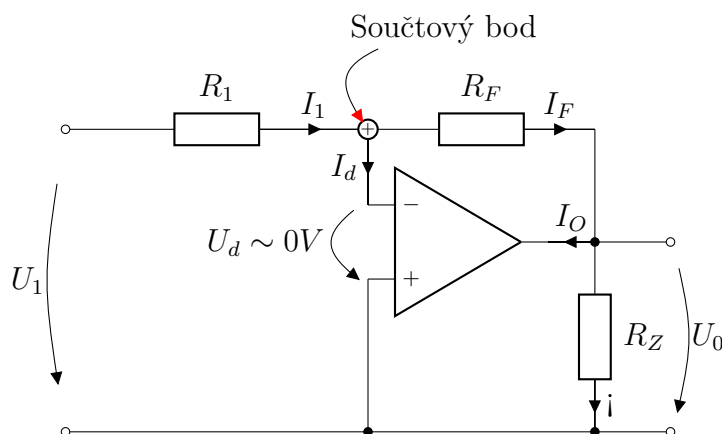
4.2 Invertující zesilovač

Vnitřní struktura operačních zesilovačů (obr. 4.1) umožňuje použití dvou základních zapojení, kde výstupní napětí je opačné nebo stejné orientace jako vstupní napětí. Zesilovače mohou zesilovat stejnosměrné i střídavé napětí. Zesílení harmonických napětí je omezeno frekvenční charakteristikou. Při vložení signálního stejnosměrného nebo střídavého napětí na invertující vstup rozdílového stupně se na výstupu objeví napětí v opačné fázi (opačného znaménka). Vložení signálního napětí na druhý, neinvertující vstup bude na výstupu napětí stejné fáze (stejného znaménka). V našich aplikacích budeme používat zápornou zpětnou vazbu. To znamená, že část výstupního napětí se přivede zpět na invertující vstup. Tento přenos se provede pomocí zpětnovazební smyčky. Připojením zpětnovazební smyčky na invertující vstup se realizuje přivedení signálu v opačné fázi vzhledem k budícímu vstupnímu napětí. Toto zapojení snižuje zesílení, avšak vzhledem k možnostem zavedení silné záporné vazby se stabilizuje činnost zesilovače a zlepšují se vlastnosti zesilovacího stupně. Tuto silnou zápornou zpětnou vazbu si můžeme dovolit vzhledem k značně velkému zesílení operačního zesilovače s otevřenou zpětnovazební smyčkou. Připomeňme, že ideální operační zesilovač má toto zesílení nekonečné. Reálný operační zesilovač má toto zesílení až 10^5 i větší.

Poznámka: Přivedením části výstupního napětí na neinvertující vstup nemění fázi a představuje tedy kladnou zpětnou vazbu, která zvětšuje zesílení, což se využije při generování napěťových průběhů.

Operační síť, tedy vnějšími obvodovými prvky (např. rezistory), je určena funkce, popř. vlastnosti celkového zapojení. Operační zesilovače slouží jako regulační člen. Prvky operační sítě mohou být lineární, například rezistory a kondenzátory, tak i nelineární (např. diody). Závěry v následujících kapitolách platí pro stejnosměrná napětí a napětí velmi nízké frekvence.

Základní charakteristikou invertujícího zesilovače je připojení signálního napětí na invertující (minus) vstupní svorku operačního zesilovače a připojení neinvertujícího (plus) vstupu na společný zemnicí vodič (obr. 4.6). Protože se jedná o zesilovač se zápornou zpětnou vazbou, je zpětnovazební prvek připojen z výstupu na invertující vstup.



Obrázek 4.6: Invertující zesilovač.

Budeme předpokládat, že se použije ideální operační zesilovač. To znamená, že zesílení s otevřenou zpětnovazební smyčkou se blíží k nekonečnu a v důsledku značně velké hodnoty vstupního odporu teče operačním zesilovačem zanedbatelný proud, to znamená přibližně platí $I_d = 0$, $U_d = 0$. Za těchto předpokladů činnost invertujícího zesilovače nezávisí na operačním zesilovači a zesílení s uzavřenou zpětnovazební smyčkou je určeno pouze odpory operační sítě.

Vysvětleme si tuto zvláštní vlastnost charakteristickou pro operační zesilovače v oblasti, kdy nejsou v saturaci. V okamžiku zapojení signálního napětí U_1 se na výstupu operačního zesilovače vytvoří přechodný proměnný zdroj napětí, který se ustálí na hodnotě U_0 . Toto napětí je výsledkem zesílení operačního zesilovače nepatrného napětí mezi jeho vstupními rozdílovými svorkami. Výstupní napětí vybudí zpětnovazebním odporem R_F proud I_F , který se nastaví na takovou hodnotu, že v důsledku $I_d = 0$ je v součtovém bodě stejný jako budící proud I_1 . Výstupní napětí U_0 se nastaví tak, že se ustálí na přesně definované hodnotě určené pouze odporovou operační sítí invertujícího zapojení. K výpočtu použijeme Kirchhoffových zákonů. Podle zapojení na obr. 4.6 vzhledem k referenčnímu zemnicímu nulovému potenciálu je polarita U_1 daná

reálným zapojením signálního zdroje. Podle zvolené polarity signálního napětí je směr proudu od plusové svorky do součtového bodu. Ze vstupní smyčky platí: $-U_1 + I_1 R_1 + U_d = 0$ protože $U_d = 0$, platí:

$$I_1 = \frac{U_1}{R} \quad (4.1)$$

Z prvního Kirchhoffova zákona platí pro proudy v součtovém bodě $I_1 = I_d + I_F$, kde I_F je zpětnovazební proud. Vzhledem k $I_d = 0$ platí $I_1 = I_F$. Proud I_1 je stejného směru jako proud I_F . Zpětnovazební proud I_F je buzen napětím na výstupu. Vzájemný vztah vyjádříme pomocí 2. Kirchhoffova zákona. Směr výstupního napětí zvolíme vzhledem k referenčnímu nulovému potenciálu, jak je uvedeno čárkovaně na obr. 4.6. K výpočtu použijeme výstupní smyčku, jejíž směr zvolíme ve směru proudu I_F : $-U_d + I_F R_F + U_0 = 0$. Odtud vzhledem k předpokladu $U_d = 0$ proud

$$I_F = \frac{-U_0}{R_F} \quad (4.2)$$

Vzhledem k rovnosti $I_1 = I_F$ pro výstupní napětí platí:

$$U_0 = -\frac{R_F}{R_1} U_1 \quad (4.3)$$

Výstupní napětí je opačného směru, než je vstupní napětí. Skutečný směr je tedy opačný než zvolený směr (na obr. 4.6 vyznačený plnou čarou). V uvedeném vztahu je R_F zpětnovazební odpor, odpor R_1 směřující do součtového bodu zahrnuje vnitřní odpor signálního zdroje. Pro rozdílové napětí $U_d \cong 0$, tedy napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem je v podstatě nulové. V důsledku toho je součtový bod na nulovém zemnicím potenciálu, nazýváme ho „virtuální zem“. Vzhledem k uzemněnému součtovému bodu neprotéká rozdílovým stupněm proud a odpory R_1 a R_F protéká stejný proud. Napětí je stejně orientované jako směr proudů $I_F = I_1$. Jeden konec zpětnovazebního odporu R_F je přes součtový bod na zemnicím potenciálu, na kterém je také jeden konec zatěžovacího odporu. Směr proudu $I_F = I_1$ vytvoří na odporu R_F úbytek napětí tak orientovaný, že záporný pól je na společném konci odporů R_F a R_z a výstupní svorky operačního zesilovače. Odtud plyne, jestliže vstupní napětí U_1 je kladné, je výstupní napětí U_0 záporné a naopak. Výstupní napětí je tedy invertované.

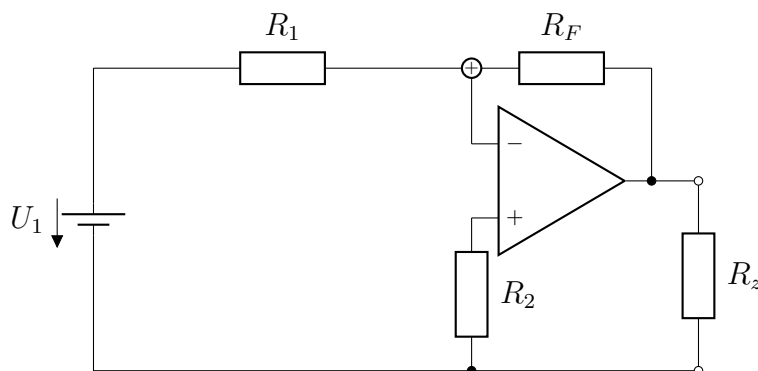
Napěťové zesílení invertujícího zesilovače je dáno poměrem výstupního napětí ke vstupnímu napětí, takže:

$$A_{CL} = \frac{U_0}{U_1} = -\frac{R_F}{R_1} \quad (4.4)$$

Kde A_{CL} je napěťové zesílení uzavřenou zpětnovazební smyčkou (close loop).

Použité zapojení vylepšíme zařazením rezistoru do větve s neinvertujícím vstupem, který kompenzuje chybová napětí. Jeho hodnota je rovna paralelní kombinaci odporů R_1 a R_F

$$R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.5)$$



Obrázek 4.7: Reálné zapojení invertujícího zesilovače

Vstupní odpor invertujícího zesilovače je závislý na protékajícím proudu, který protéká signálním zdrojem. Vzhledem k tomu, že součtový bod je na nulovém zemnicím potenciálu, je vstupní odpor R_1 ve větvi se signálním zdrojem. Potom platí:

$$R_e = \frac{U_1}{I_1} = R_1$$

Kde R_e je vstupní odpor. K udržení vysokého vstupního odporu by měla být hodnota odporu R_1 rovna nebo větší než je odpor o velikosti $10 \text{ k}\Omega$.

4.2.1 Laboratorní část



Úloha 4.2: Invertující zesilovač

Úkoly:

1. Navrhněte invertující zesilovač s operačním zesilovačem MAA 741 s optimálně volenými obvodovými prvky pro zesílení stejnosměrného signálního napětí hodnoty $U_1 = 0,1 \text{ V}$. Na výstupu se zatěžovacím odporem $R_z = 10 \text{ k}\Omega$ je požadováno napětí $U_O = 10 \text{ V}$. (Další možné kombinace $U_1 = 0,2 \text{ V}$ a $U_O = 2 \text{ V}$ atd. podle vlastní volby).
2. Zvolte napěťové zesílení s uzavřenou zpětnovazební smyčkou $A_{CL} = 10$, napětí zvolte $U_1 = 0,1 \text{ V}$, odpor $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, vypočtete zpětnovazební odpor R_F .

3. Najděte maximální možné zesílení a hodnotu odporu R_F při daných vstupních hodnotách.

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: zdroj souměrného stejnosměrného napětí ± 15 V, operační zesilovač, např. MAA 741, montážní deska s nepájivými vývody, baterie 4,5 V jako signální napětí, potenciometr např.: $1,2\text{ k}\Omega$ (2 kusy), zdroj harmonického napětí (transformátor), voltmetry na stejnosměrné napětí (2 kusy), nf generátor, nízkofrekvenční voltmetr
2. Postup měření:
 - (a) Na montážním přípravku nepájivých polí sestavte obvod podle schématu na obr. 4.7
 - (b) Podle zadání v úloze 1 změřte vstupní a výstupní napětí.
 - (c) Ověřte výpočet z úkolu 3.
 - (d) Překreslete schéma zapojení se střídavým vstupním napětím. Pro navržený zesilovač experimentálně zjistěte zesílení pro střídavý signál o frekvenci 50 Hz.
 - (e) Změřte závislost zesílení na frekvenci vstupního signálního napětí. Vstupní napětí zvolte $U_1 = 0,1$ V, zpracujte graficky.
 - (f) Výsledky zapisujte do tabulky.
3. Teoretický základ: Vlastnosti ideálního operačního zesilovače, podstata invertujícího zesilovače, význam součtového bodu, zesílení s otevřenou a uzavřenou zpětnovazební smyčkou, proč závisí napěťové zesílení s uzavřenou zpětnovazební smyčkou pouze na hodnotách obvodových prvků, frekvenční omezení.

4.2.2 Kontrolní otázky

1. Jaké jsou vlastnosti ideálního operačního zesilovače?
2. Podle čeho poznáme invertující zesilovač?
3. Jaké je možné zesílení s uzavřenou zpětnovazební smyčkou? Čím je omezené?
4. Čím je určen vstupní odpor invertujícího zesilovače? Proč?
5. Odvoďte vztah pro napěťové zesílení invertujícího zesilovače s danými odpory obvodových prvků.

6. Nakreslete schéma zapojení invertujícího zesilovače stejnosměrného napětí.
7. Zdrojový signál by měl pracovat do většího odporu. Jak tuto podmínku splníme?
8. Čím je omezena volba výstupního zatěžovacího odporu?
9. Jakou úlohu v zapojení invertujícího zesilovače má rezistor zapojený mezi neinvertující vstup a nulový zemnicí vodič?

4.2.3 Příklady

1. Navrhněte invertující zesilovač se vstupním odporem $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$. Diskutujte případ, kdy $U_1 = 1 \text{ V}$. Uvažte maximální hodnotu výstupního napětí omezenou saturačním napětím.
2. Najděte maximální vstupní napětí, při kterém ještě nedojde k saturaci.

4.3 Neinvertující zesilovač

Podobně také pro neinvertující zesilovač platí vstupní podmínky jako pro invertující zesilovač. Předpokládejme opět, že operační zesilovače mají tyto ideální vlastnosti:

1. Napěťové zesílení s otevřenou zpětnovazební smyčkou je $A_{0L} \rightarrow \infty$. Otevření zpětnovazební smyčky znamená, že není přivedeno žádné napětí z výstupu na vstup zesilovače.
2. Vstupní odpor se blíží k nekonečnu, $R_e \rightarrow \infty$.
3. Výstupní odpor je přibližně roven nule, $R_a = 0$.
4. Šířka přenášeného frekvenčního pásma je nekonečná.
5. Jsou-li vstupní napětí sobě rovna, $U_1 = U_2$, výstupní napětí je nulové, $U_0 = 0$. Vzhledem k označení souměrného napájecího napětí U_{0C} a U_{0E} je výstupní napětí značeno U_0 .

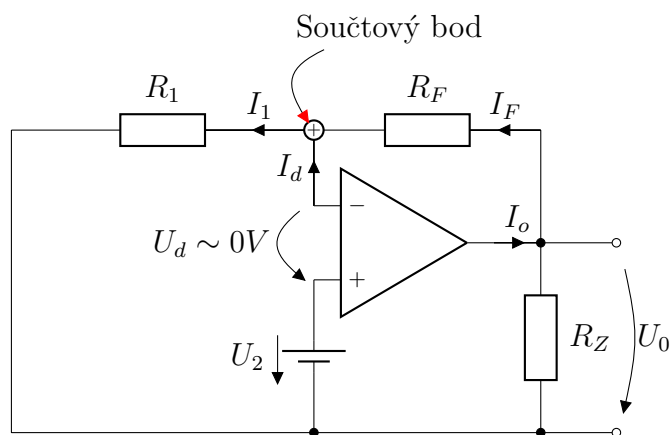
Omezíme se pouze na odvození napěťového zesílení. Oba zesilovače se liší v zapojení a sice v umístění signálního zdroje napětí. Zatímco u invertujícího zesilovače je signální napětí U_1 připojené na invertující (minus) vstup, je u neinvertujícího zesilovače zdroj U_2 připojen na neinvertující (plus) vstup (obr. 4.8). Předpokládejme, že vstupní napětí U_2 má uzemněný záporný pól zdroje a kladným pólem je připojen na neinvertující vstup. Proud prochází velkým vstupním odporem a malé vstupní napětí vybudí výstupní napětí, jehož hodnota závisí, jak jsme již uvedli, na odporech operační sítě. V součtovém bodě se

setkávají proud procházející odporem ve vstupní smyčce a zpětnovazební proud generovaný z výstupu operačního zesilovače. V uvažovaném zapojení se jedná opět o zapojení se silnou zápornou zpětnou vazbou, která nutí operační zesilovač do stavu, v němž se rozdílové napětí U_d nastaví na nulovou hodnotu. Ve vstupní smyčce proud I_1 prochází od součtového bodu k nulovému zemnímu potenciálu. Podle 1. Kirchhoffova zákona:

$$-U_2 + U_d + I_1 R_1 = 0 \quad (4.6)$$

a odtud za zvolených předpokladů platí:

$$I_1 = \frac{U_2}{R_1} \quad (4.7)$$



Obrázek 4.8: Neinvertující zesilovač.

Do součtového bodu vstupuje proud z rozdílového zesilovače a generovaný proud z výstupu operačního zesilovače. Z uzlu v součtovém bodě vystupuje proud ve vstupní smyčce. Z 1. Kirchhoffova zákona platí:

$$I_1 = I_d + I_F \quad (4.8)$$

takže

$$I_1 = I_F \quad (4.9)$$

Pro zpětnovazební smyčku platí podle 2. Kirchhoffova zákona:

$$-U_0 + I_F R_F + I_1 R_1 = 0 \quad (4.10)$$

Odtud

$$I_F = \frac{U_0}{R_1 + R_F} \quad (4.11)$$

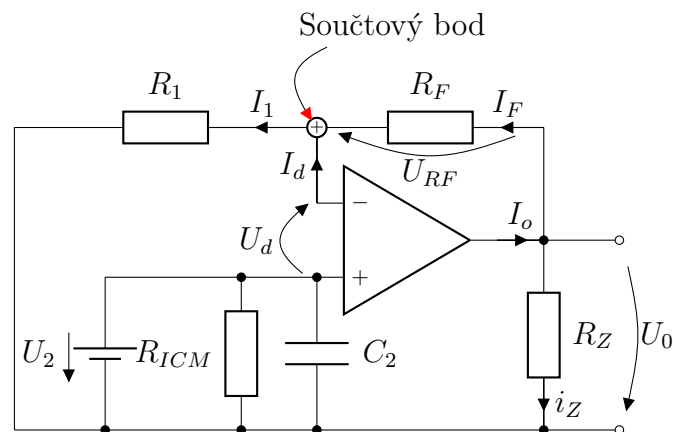
Po dosazení a úpravě:

$$U_0 = \frac{R_1 + R_F}{R_1} U_2 \quad (4.12)$$

Napěťové zesílení neinvertujícího zesilovače je dáno poměrem výstupního napětí ke vstupnímu napětí, takže:

$$A_{CL} = \frac{U_0}{U_2} = \frac{R_1 + R_F}{R_1} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad (4.13)$$

Invertující zesilovač pro některé aplikace má poměrně malý vstupní odpor, na kterém vzniká nežádoucí ztráta energie vstupního signálu. Jak je tomu v případě neinvertujícího zesilovače? Stejnoseměrný nebo střídavý napěťový zdroj o velikosti napětí U_2 , jehož orientace je uvedena na obr. 4.9, je zatížen vstupním proudem. Velikost tohoto vstupního proudu závisí na vstupní impedanci (u stejnosměrného zdroje na odporu), kterou tvoří paralelní zapojení vstupního odporu R_{iCM} a vstupní kapacity C_2 . Zabývejme se pouze zesílením stejnosměrného napětí.

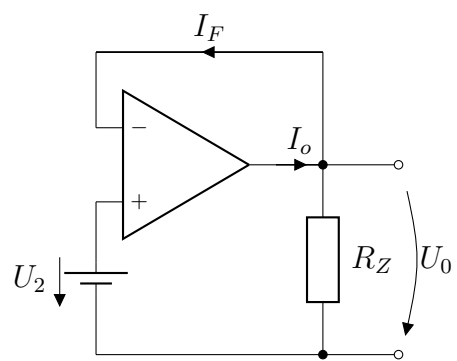


Obrázek 4.9: Vstupní odpor a vstupní impedance neinvertujícího zesilovače.

Pro součtový bod platí, jak bylo již uvažováno, že jsou oba vstupy na stejných potenciálech a platí $U_2 = U_1$. Proud I_1 protéká odporem R_1 ve směru od vyššího potenciálu k zemnicímu nulovému vodiči. Vzhledem k $I_d = 0$ zpětnovazební proud I_F teče do součtového bodu a vytváří úbytek napětí $U_{RF} = I_1 R_F$ (obr. 4.9). Vyšší potenciál je v bodě, kde jsou připojeny zpětnovazební a zatěžovací odpor k výstupu operačního zesilovače. Výstupní napětí má tedy orientaci od výstupní svorky k zemnicímu vodiči.

Závěr: Má stejnou orientaci jako vstupní signální napětí.

Zvláštním případem neinvertujícího zesilovače je tzv. napěťový sledovač, v němž výstupní svorka je zkratována s invertující vstupem (obr. 4.10). Dosadíme-li do rovnice (4.13), kde platí $R_1 \rightarrow \infty$ a $R_F = 0$, potom zesílení je rovno 1. Napětí na výstupní svorce přesně sleduje vstupní napětí. Výhodou napěťového sledovače je možnost oddělit signální zdroj od zátěže, neboť vstupní odpor je přibližně $R_e \rightarrow \infty$ a výstupní odpor přibližně $R_a = 0$. Toto zapojení se také nazývá zesilovač s jednotkovým ziskem, nebo oddělovací zesilovač, nebo izolační zesilovač, nebo impedanční měnič.



Obrázek 4.10: Napěťový sledovač.

4.3.1 Laboratorní část



Úloha 4.3: Neinvertující zesilovač

Úkoly:

1. Sestavte obvod podle schématu 4.8.
2. Změřte vstupní a výstupní napětí.
3. Najděte maximální možné zesílení a hodnotu odporu R_F při daných vstupních hodnotách.

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: zdroj souměrného stejnosměrného napětí ± 15 V, operační zesilovač, např. MAA 741, montážní deska s nepájivými vývody, baterie 4,5 V jako signální napětí, potenciometr, např. 1,2 k Ω (2 kusy), zdroj harmonického napětí (transformátor), voltmetry na stejnosměrná napětí (2 kusy), nf generátor, nízkofrekvenční voltmetr
2. Postup měření:
 - (a) Na montážním přípravku nepájivých polí sestavte obvod podle schématu na obr. 4.8.
 - (b) Podle zadání v úloze 1 změřte vstupní a výstupní napětí.
 - (c) Ověřte výpočet z bodu 3.
 - (d) Překreslete schéma zapojení se střídavým vstupním napětím. Pro navržený zesilovač experimentálně zjistěte zesílení pro střídavý signál o frekvenci 50 Hz.
 - (e) Změřte závislost zesílení na frekvenci vstupního signálního napětí. Vstupní napětí zvolte $U_1 = 0,1$ V, zpracujte graficky.
 - (f) Výsledky zapisujte do tabulky.



Úloha 4.4: Napěťový sledovač

Úkoly: Ověřte činnost napěťového sledovače

Provedení úlohy:

1. Pomůcky: zdroj souměrného stejnosměrného napětí ± 15 V, operační zesilovač, např. MAA 741, montážní deska s nepájivými vývody, signální napětí zvolte $U_2 = 0,1$ V (1 V; 5 V; 10 V), voltmetry na stejnosměrné napětí (2 kusy)
2. Postup měření:
 - (a) Sestavte obvod podle schématu na obr. 4.10.
 - (b) Změřte vstupní a výstupní napětí.
3. Teoretický základ: vlastnosti ideálního operačního zesilovače, podstata neinvertujícího zesilovače, význam součtového bodu, zesílení s otevřenou a uzavřenou zpětnovazební smyčkou, proč závisí napěťové zesílení s uzavřenou zpětnovazební smyčkou pouze na hodnotách obvodových prvků, frekvenční omezení.

4.3.2 Kontrolní otázky

1. Jaké jsou vlastnosti ideálního operačního zesilovače?
2. Podle čeho poznáme neinvertující zesilovač?
3. Jaké je možné zesílení s uzavřenou zpětnovazební smyčkou? Čím je omezené?
4. Čím je určen vstupní odpor neinvertujícího zesilovače? Proč?
5. Odvoďte vztah pro napěťové zesílení neinvertujícího zesilovače s danými odpory obvodových prvků.
6. Nakreslete schéma zapojení neinvertujícího zesilovače stejnosměrného napětí.
7. Do jakého vstupního odporu pracuje zdrojový signál?
8. Porovnejte vlastnosti invertujícího a neinvertujícího zesilovače.
9. Nakreslete schéma napěťového sledovače. Jaká je výhoda použití napěťového sledovače?

4.3.3 Příklady

1. Navrhněte neinvertující zesilovač podle vlastního zadání. Diskutujte případ, kdy $U_1 = 1$ V. Uvažte maximální hodnotu výstupního napětí omezenou saturačním napětím.

2. Najděte maximální vstupní napětí, při kterém ještě nedojde k saturaci.



Shrnutí kapitoly 4

V rámci kapitoly byly shrnuty základní koncepty použití operačních zesilovačů v obvodech jako základní uplatnění jsou uvažovány zapojení jako komparátor, invertující / neinvertující zesilovač či sledovače. Na praktických experimentálních úlohách a teoretických otázkách bylo ověřeno studentovo pochopení dané problematiky.



Použitá literatura a další zdroje

1. H. Römish: Berechnung von Verstärkerschaltungen, G.B.Teubner Stuttgart 1974
2. S. Holenda a K.Jurkovič: Tranzistory v teorii a praxi, SNTL Bratislava 1962
3. J. Čermák a K. Jurkovič: Návrh a konstrukce nízkofrekvenčních tranzistorových zesilovačů, SNTL, Praha 1972
4. J. Budínský: Nízkofrekvenční tranzistorové zesilovače, SNTL Praha 1964
5. J. Stránský a kol.: Polovodičová technika I, SNTL/ALFA, Praha 1973
6. J. Stránský a kol.: Polovodičová technika I, SNTL/ALFA, Praha 1973
7. J. Čermák: Kurz polovodičové techniky, SNTL Praha 1976
8. R. Burmeister: Elektronik 1,2, Pädagogischen Hochschule Potsdam 1976
9. S .L. Dart: American Journal of Physics 42 (1975,3)
10. V. Chalupa-T.Šimek: Elektronické systémy II. ČVUT Praha 1977
11. Příruční katalog elektronek, obrazovek, polovodičových prvků Tesla, Tesla Rožnov 1981
12. T. Šurina: Polovodičová elektronika, SNTL Praha 1968
13. F. Fiala: Tranzistorové klopné obvody, Sborník PF. Ústí n.L. 1981
14. F. Fiala: Speciální praktikum z elektroniky I, II a III, Pedagogická fakulta v Ústí n.L..1982.1985
15. R. F. Coughlin - F. Driscoll: Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits, New York 1972
16. J. G. Grame: Applications of Operational Amplifiers, New York 1973
17. J. G. Grame, G. E. Tobey a L. P. Huslsman: Operational Amplifiers. Design and Application, Mc Grow-Hill Book Copany, New York 1971
18. D. Hirshmann: Operationverstärker-Anwendung, Francis-Verlag. Mümchem 1978

Dodatek

A.1 Zpracování výsledků měření (experimentální část)

Několik poznámek pro zpracování naměřených hodnot.

1. Označme soubor naměřených hodnot x_1, x_2, \dots, x_n , určíme **aritmetický průměr**

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

2. Směrodatná odchylka jednoho měření (standardní odchylka)

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Zjistíme, zda se některá z naměřených hodnot x_i neodchyluje od \bar{x} o více než $k \cdot s$, což je tzv. mezní chyba. Pro $n^3 > 10$ se zpravidla volí $k = 3$. Nastane-li takový případ, ze souboru nevhodné hodnoty vyloučíme. Samozřejmě musíme znovu vypočítat \bar{x} a s .

3. Dále určíme směrodatnou odchylku aritmetického průměru souboru n měření

$$s(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

4. Vypočítané \bar{x} a $s(\bar{x})$ a zaokrouhlíme.
5. Výsledek měření zapíšeme ve tvaru:

$$x = \bar{x} \pm 3 s(\bar{x})$$

Popřípadě uvedeme relativní mezní chybu

$$d = \frac{3s(\bar{x})}{\bar{x}} \quad \text{nebo} \quad d = \frac{3s(\bar{x})}{\bar{x}} \cdot 100 \%$$

Někdy je možné užít jednodušší způsob:

Místo směrodatné odchyly aritmetického průměru $s(\bar{x})$ používá průměrná odchylna

$$D(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})$$

Výsledek se pak zapíše:

$$x = \bar{x} \pm D(x)$$

Podíl průměrné odchyly a aritmetického průměru určuje tzv. **průměrnou relativní odchylnu**:

$$dx = \frac{\Delta x}{\bar{x}}.$$

Seznam experimentů

1.1	Ověření Ohmova zákona	10
1.2	Vliv proudu na odporový drát	12
1.3	Odvození vlastností sériového zapojení odporů	13
1.4	Nabíjecí proud kondenzátoru	22
1.5	Indukované napětí v cívce	32

Seznam úloh

1.1	Měření odporů	17
1.2	Sériové zapojení odporů	17
1.3	Paralelní zapojení rezistorů	18
1.4	Rezistor v obvodě střídavého proudu	19
1.5	Měření kapacit	27
1.6	Sériové zapojení kondenzátorů	29
1.7	Paralelní zapojení kondenzátorů	29
1.8	Měření indukčnosti	35
2.1	Měření voltampérové charakteristiky křemíkové diody	43
2.2	Měření usměrněného napětí jednocestného usměrňovače	46
2.3	Měření usměrněného napětí dvoucestného usměrňovače v můstkovém Grätzově zapojení	48
3.1	Měření výst. voltampérové charakteristiky křemíkového tranzistoru <i>NPN</i> se spol. emitorem	52
3.2	Nastavení pracovního bodu křemíkového tranzistoru <i>NPN</i> se společným emitorem	53
3.3	Měření napěťového zesílení nízkofrekvenčního napěťového zesilovače malého rozkmitu	61
3.4	Experimentální ověření spínacího režimu tranzistoru	64
3.5	Navrhněte tranzistorový blikáč s křemíkovými tranzistory, s žárovkou 2,2 V/180 mA	74

4.1	Ověření nastavení kladné a záporné saturace v závislosti na vstupním napětí.	83
4.2	Invertující zesilovač	88
4.3	Neinvertující zesilovač	94
4.4	Napěťový sledovač	94

Tento výukový materiál vznikl v rámci projektu
CZ.1.07/2.2.00/29.0023
**„Univerzitní centrum podpory
pro studenty se specifickými vzdělávacími potřebami“**,
spolufinancovaného Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky.