

VYSOKOŠKOLSKÉ SKRIPTÁ

Matematicko-fyzikálna fakulta Univerzity Komenského

Peter Kohaut, František Kundracik

ŠPECIÁLNE PRAKTIKUM Z ELEKTRONIKY I

2003

UNIVERZITA KOMENSKÉHO BRATISLAVA

© RNDr. Peter Kohaut, doc. RNDr. František Kundracik, PhD. 2003

Recenzenti: doc. RNDr. Svetozár Kalavský, CSc.,
doc. RNDr. Andrej Jaroševič, CSc.

Za odbornú a jazykovú stránku týchto vysokoškolských skrípt zodpovedajú autori.

ISBN 80-223-0744-0

OBSAH

Úvod	5
Niektoré vlastnosti elektronických obvodov a meracích prístrojov	7
1 Základné pojmy	7
2 Základné vlastnosti elektronických obvodov	10
3 Základné pojmy teórie elektronických obvodov	12
4 Základy teórie lineárnych elektronických obvodov	14
4.1 Kirchhoffove rovnice	15
4.2 Topologické pojmy	16
4.3 Metóda slučkových prúdov	17
4.4 Metóda uzlových napätí	17
4.5 Symbolicko-komplexné zobrazenie	18
4.6 Zovšeobecnený Ohmov zákon a Kirchhoffove rovnice v symbolicko-komplexnom zobrazení ...	21
4.7 Maticový zápis rovníc elektronického obvodu	22
4.8 Théveninova veta (princíp náhradného zdroja)	23
4.9 Charakteristiky obvodov v ustálenom stave	25
4.10 Prechodové charakteristiky	26
4.11 Grafické zobrazovanie charakteristík	29
4.11.1 Normovanie	29
4.11.2 Logaritmické stupnice	29
4.11.3 Poznámky ku grafickým zobrazeniam	31
5 Základné prístroje v praxi	33
5.1 Elektronické voltmetre	33
5.1.1 Jednosmerné elektronické voltmetre	33
5.1.2 Striedavé elektronické voltmetre	35
5.2 Zdroje	39
5.2.1 Napájacie jednosmerné zdroje	39
5.2.2 Zdroje signálu	40
5.3 Osciloskop	42
5.3.1 Obrazovka	42
5.3.2 Citlivosť	43
5.3.3 Zosilňovače	44
5.3.4 Časová základňa	44
5.3.5 Synchronizácia	45

5.3.6	Laboratórne osciloskopy	47
5.3.7	Príprava osciloskopu na meranie	47
	Základné merania v elektronike	50
6	Niekoľko praktických rád	50
7	Merania s osciloskopom.....	52
7.1	Meranie napätia	52
7.2	Meranie kmitočtu	53
7.3	Meranie funkcionálnych závislostí	54
7.3.1	Meranie voltampérových charakteristík	54
7.3.2	Meranie prenosových charakteristík	56
7.3.3	Meranie dynamických charakteristík	57
7.3.4	Meranie prechodovej charakteristiky	57
8	Kremíkové diódy	59
8.1	Usmerňovače	60
8.2	Stabilizátor napätia so Zenerovou diódou.....	65
9	Operačné zosilňovače	68
9.1	Lineárne použitia operačných zosilňovačov	71
9.1.1	Invertujúci zosilňovač	71
9.1.2	Neinvertujúci zosilňovač	73
9.1.3	Sčítavací zosilňovač	74
9.1.4	Rozdielový zosilňovač	75
9.2	Nelineárne použitie operačných zosilňovačov	76
9.2.1	Komparátor	76
9.2.2	Komparátor s hysterézou	78
9.2.3	Multivibrátor	79
9.2.4	Generátory tvarových priebehov	81
9.3	Nelineárne obvody s operačným zosilňovačom	85
10	Tranzistory	86
10.1	Tranzistor v zapojení so spoločným emitorom	89
10.1.1	Zosilňovač napätia a odporovou záťažou.....	89
10.1.2	Selektívny zosilňovač	93
10.1.3	Oscilátor	94
10.2	Tranzistor v zapojení so spoločným kolektorom	96
10.2.1	Emitorový sledovač	97
10.2.2	Regulovaný zdroj stabilizovaného napätia	97
10.3	Tranzistor v spínacom režime	98
10.3.1	Multivibrátor	99
10.3.2	Klopny obvod	100
	Dodatky	102
	Úlohy	108
	Cvičenia	111
	Literatúra	114

ÚVOD

Učebný text „Špeciálne praktikum z elektroniky I.“ je určený študentom učiteľského štúdia MFM UK a PFUK. Je rozdelený na dve časti. Prvá – teoreticky zameraná – dopĺňa prednášku z elektroniky a zhrňuje základné poznatky potrebné pre prácu v praxi. Táto časť textu slúži len na osvieženie pamäte, preto sú k hlbšiemu štúdiu uvedené priebežne odkazy na literatúru.

Druhá časť – praktická – obsahuje stručný opis a výklad činnosti elektronických prístrojov používaných pri praktických cvičeniach a jednoduchých elektronických obvodov, ktorých vlastností sa budú sledovať a merať.

Zámerom autorov je naučiť budúcich učiteľov navrhnuť jednoduché elektronické obvody a zistiť ich správanie sa. Tomu je podriadený výber zapojení obvodov, ktoré sami osebe majú praktické použitie a ich kombináciou možno stavať jednoduché demonštračné prístroje. Elektronika je v súčasnosti taký dynamický odbor, že je vhodnejšie zvládnuť všeobecné metódy vyšetrovania obvodov, čo autori textu uprednostňujú, ako venovať sa podrobnému rozboru pomerne malého počtu toho času moderných obvodov.

Praktické cvičenia sú vedené frontálnym systémom, t. j. všetci študenti cvičia rovnaké úlohy v poradí podľa ich náročnosti tak, ako sú uvedené v častiach „Úlohy“ a „Cvičenia“. Počet predložených úloh a cvičení je taký rozsiahly, že len skúsený elektronik ich môže odcvičiť v plnom rozsahu. Tento systém umožňuje vyučujúcemu venovať sa študentom individuálne podľa ich schopností a zručností. Šikovnejší, resp. v elektronike skúsenejší študenti môžu cvičiť rýchlejšie alebo s náročnejším obsahom.

V návodoch nie sú obsiahnuté úlohy, ktoré sa týkajú číslicových obvodov. Tieto sú náplňou pripravovaného II. dielu.

Časť prvá

NIEKTORÉ VLASTNOSTI ELEKTRONICKÝCH OBVODOV A MERACÍCH PRÍSTROJOV

1 ZÁKLADNÉ POJMY

Vyšetrovaním fyzikálnej sústavy sa snažíme získať informácie o jej stave a chovaní sa. Veličina, ktorá obsahuje hľadanú informáciu, sa nazýva **signál**. Signál možno reprezentovať fyzikálne a matematicky opísať (sústavou rovníc). Pomocou vhodných prevodníkov sa dá ľubovoľný signál premeniť na elektrickú veličinu – elektrický signál. Elektronika sa zaoberá prevodom, prenosom a uschovaním informácie zakódovanej vo forme elektromagnetických veličín.

Na prenos a spracovanie elektrických signálov slúžia elektronické systémy, čo sú fyzikálne sústavy, v ktorých môžu prebiehať elektromagnetické javy. Štúdium elektronických systémov sa spravidla obmedzuje len na podstatné vlastnosti, ktoré sú rozhodujúce pre skúmaní jav. Tým sa reálny systém zjednodušuje, idealizuje a je nahradený jednoduchším systémom – *modelom*.

Elektronický systém je sústava jednoduchých častí pospájaných medzi sebou tak, že nimi môžu tiecť elektrické prúdy. Za model elektronického systému je preto vhodné voliť takú sústavu, v ktorej sa elektromagnetické javy dajú vyjadriť pomocou elektrických prúdov a napätí. Takýto model sa nazýva *elektronický obvod* (ďalej skrátene obvod).

Základnou časťou elektronického obvodu je **ideálny prvok**, ktorý možno definovať ako matematický model fyzikálneho javu využívajúceho zákony pohybu nosičov náboja vo vákuu, v plyne a v pevných látkach. Ideálny prvok elektronického obvodu možno fyzikálne charakterizovať jedinou veličinou – *parametrom*. Reálny prvok elektronického systému je zložený z viacerých ideálnych prvkov.

Prvok, ktorého vlastnosti sú charakterizované parametrom nezávisiacim od napätia na ňom, ani od prúdu ním prechádzajúceho, sa nazýva *lineárny* prvok. Ak parameter, charakterizujúci prvok, závisí od napätia na ňom alebo prúdu tečúceho cez prvok, ide o *nelineárny* prvok. *Parametrický* prvok je charakterizovaný veličinou, ktorá je funkciou nejakého ďalšieho parametra (času, teploty, tlaku a pod.).

Vžilo sa delenie ideálnych prvkov na aktívne a pasívne. Aktívne prvky sú zdrojom elektrickej energie a jestvujú dva typy:

Ideálny zdroj napätia udržuje na svojich svorkách napätie, ktoré nezávisí od veľkosti výkonu dodávaného zdrojom do obvodu. Jeho parametrom je napätie zdroja (elektromotorické napätie).

Ideálny zdroj prúdu dodáva do obvodu prúd, ktorý nezávisí od výkonu dodávaného zdrojom do obvodu. Jeho parametrom je prúd zdroja.

V teórii obvodov sa zdroje ešte delia na nezávislé (autonómne) a riadené (neautonómne). Parametre riadených zdrojov sú funkciami napätí alebo prúdov v inej časti obvodu.

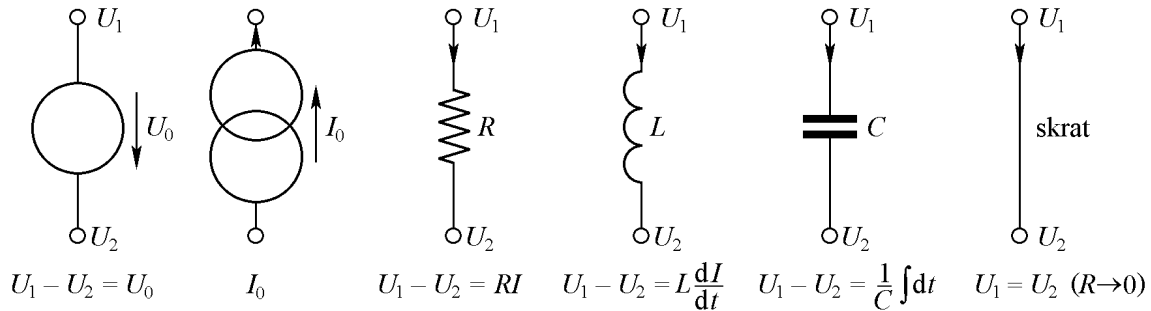
Pasívne ideálne prvky sú:

Ideálny odpor – spotrebováva elektrickú energiu tým, že ju nevratne mení na tepelnú. Parametrom je elektrický odpor definovaný vzťahom $R = u/i$ (Ohmov zákon), kde u je napätie na odpore a i je prúd, ktorý odporom preteká. Parameter $G = 1/R$ sa nazýva vodivosť a tiež jednoznačne charakterizuje odpor.

Ideálny kondenzátor – je zásobníkom energie elektrického poľa, ktoré je sústredené len v objeme kondenzátora. Túto energiu môže kondenzátor bez strát prijímať a odovzdávať. Parametrom je kapacita definovaná vzťahom $C = q/u$, kde q je náboj kladnej elektródy kondenzátora a u je napätie na ňom.

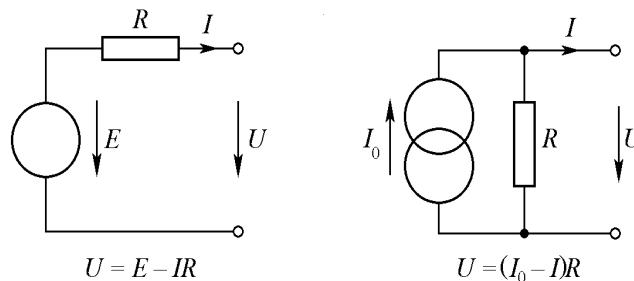
Ideálna cievka – je zásobníkom energie magnetického poľa, ktoré je sústredené len v objeme cievky. Túto energiu môže cievka bez strát prijímať a odovzdávať. Parametrom je indukčnosť definovaná vzťahom $L = \Phi/i$, kde Φ je magnetický indukčný tok cievky a i je prúd, ktorý ňou preteká. Napätie na cievke je $u = d\Phi/dt$.

Topologickým obrazom matematického modelu je *schéma*. Prvky obvodu sa v schéme kreslia dohovorenými značkami, ktoré udávajú druh prvku a počet svoriek, ktorými sa prvok zapája do obvodu (obr. 1).



Obr. 1

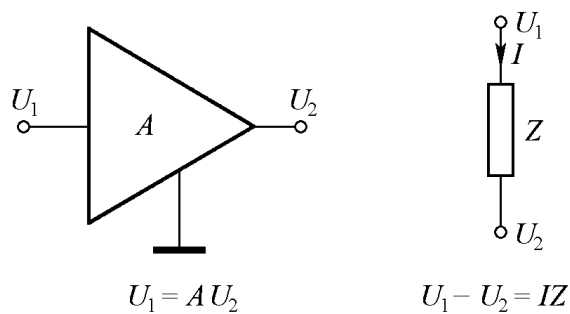
Ten istý objekt môže mať viacero modelov, a preto aj viacero schém. Napríklad reálny zdroj elektrickej energie môže byť modelovaný zdrojom napätia alebo zdrojom prúdu. Matematické modely reálneho zdroja a ich schémy sú na obr. 2. Porovnanie oboch matematických modelov poskytuje vzťah $E = I_0 R$, ktorý umožňuje prechod od jedného modelu zdroja k druhému. Oba sú rovnocenné, pretože oba opisujú hodnotu svorkového napätia tohože reálneho zdroja. Šípka, ktorá udáva smer napätia, smeruje od miesta s vyšším potenciálom k miestu s nižším potenciálom. Šípka, ktorá udáva smer prúdu, má smer pohybu kladného náboja.



Obr. 2

Úloha 1. Meraním na plochej batérii 3 R 12 sme zistili, že napätie naprázdno je 4,8 V. Pri zaťažení prúdom 3 A kleslo svorkové napätie na 1,2 V. Určte parametre modelov napät'ového a prúdového zdroja meranej batérie.

Príkladom, že model je len idealizáciou a zjednodušením reálneho systému, sú schematické značky zosilňovača a impedancie (obr. 3). Schematická značka zosilňovača je zobrazením idealizovaného modelu zosilňovača, ktorého vstupný odpor ($R_i \rightarrow \infty$) a výstupný odpor ($R_o \rightarrow 0$) možno zanedbať. V praxi sa schematická značka pre impedanciu používa aj pre odpor. Formálne vyzerá matematický model pre impedanciu rovnako, treba si však uvedomiť, že v impedancii sú skryté aj indukčnosť aj kapacita.

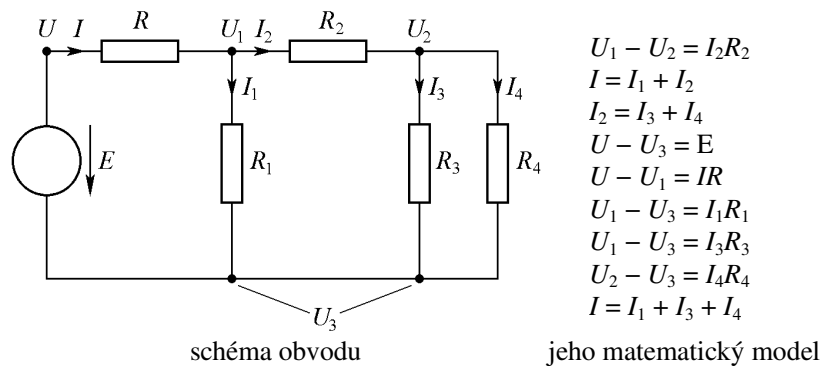


Obr. 3

2 ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI ELEKTRONICKÝCH OBVODOV [1] kap. 2

Elektronický obvod je fyzicky realizovaný alebo realizovateľný útvar. Tento útvar je opísaný sústavou rovníc. Schéma elektronického obvodu je topologickým zobrazením sústavy rovníc. Skladá sa zo súboru schematických značiek prvkov. Miesto styku dvoch alebo viacerých prvkov sa nazýva uzol obvodu[†].

[†]**Poznámka:** Pojem uzla pre miesto styku dvoch prvkov môže niekto považovať za nie šťastnú definíciu. Prúd sa v tomto mieste nerozvetvuje a okrem mechanicko-elektronického spoja sa takto definovaný uzol ničím nevyznačuje. Pri analýze obvodu, hlavne pri metóde uzlových napätí a pri použití Théveninovej vety, zjednodušuje takto zavedený uzol zostavovanie rovníc bez (niekedy) prácného prechodu od modelu napät'ového zdroja k modelu prúdového zdroja. V úvahách, kde nás potenciál uzla dvoch prvkov nezaujíma, ho možno bez následkov vypustiť.



Obr. 4

V schéme obvodu uzol zobrazuje potenciál. Časť obvodu, ktorá leží medzi dvomi susednými uzlami, sa nazýva **vetva obvodu**. V schéme obvodu vetva zobrazuje prúd. Smer prúdu sa v schéme zobrazuje šípkou (obr. 1 až 4). Voľbou začiatočného a koncového uzla sa vetva stáva **orientovanou**. Smer prúdu sa môže s časom meniť, preto orientácia vetvy nemusí súhlasiť vždy so smerom prúdu. Ak v danom časovom okamžiku smer prúdu súhlasí s orientáciou vetvy, hovoríme o *kladnej* okamžitej hodnote *vetvového prúdu*. V opačnom prípade hovoríme o *zápornej* okamžitej hodnote *vetvového prúdu* – skrátene o kladnom alebo zápornom prúde. Rozdiel potenciálov uzlov vetvy sa nazýva *vetvové napätie* a pravidlá o polarite vetvového napätia sú rovnaké ako pri vetvových prúdoch.

Stav elektronického obvodu je úplne určený, ak sú známe potenciály všetkých uzlov a všetky vetvové prúdy. Na jednoznačný opis stavu *lineárneho* elektronického obvodu stačí poznať menší počet veličín. Napr. stačí poznať iba potenciály všetkých uzlov (kap. 4.3, 4.4).

Činnosť elektronických obvodov spočíva v:

1. zmene mierky – zosilnenie, zoslabenie,
2. vykonaní matematickej operácie alebo funkcie – +, ×, log, d/dt atď.,
3. vykonaní logickej operácie alebo funkcie – AND, OR, NOT atď.,
4. premene jedného parametra na iný – $U \rightarrow I, I \rightarrow f$ atď.,
5. oddelení niektorých spektrálnych zložiek – filtrácia,
6. zmene spektra – zmiešavanie, modulácia, usmernenie atď.,
7. zmene tvaru signálu – komparácie, obmedzenie atď.,
8. generácii rôznych časových priebehov.

Vstupný signál je elektrická veličina, ktorá má byť elektronickým obvodom spracovaná a vstupuje doňho prostredníctvom **vstupu**, čo je dvojica uzlov elektronického obvodu. **Výstupný signál** je elektrická veličina, ktorá je výsledkom spracovania signálu elektronickým obvodom a vystupuje z neho inou dvojicou uzlov nazývanou **výstup**.

Časti elektronických obvodov, ktoré vykonávajú elementárne operácie sú stupne. Súbor stupňov, v ktorom spracovávaný signál postupuje od vstupu k výstupu elektronického obvodu je **kanál priameho prenosu**. Z ľubovoľnej časti kanála priameho prenosu sa môže časť signálu viesť **kanálom spätnej väzby** späť, smerom k vstupu kanála priameho prenosu do jeho ľubovoľnej časti. V reálnych elektronických obvodoch sa to deje vždy prostredníctvom parazitných väzieb, môže mať i nepriaznivé účinky na vlastnosti a stav elektronického obvodu.

3 ZÁKLADNÉ POJMY TEÓRIE ELEKTRONICKÝCH OBVODOV [1] kap. 2.3

Úlohou teórie obvodov je:

1. **Analýza** – predpovedá správanie sa obvodu. Zo známej fyzikálnej a topologickej štruktúry obvodu treba určiť potenciály uzlov a vetvové prúdy. Zo známych potenciálov a prúdov možno určiť vzájomné vzťahy niektorých vybraných dvojíc. To postačuje na stanovenie obvodových funkcií, ktoré v praxi dostatočne opisujú stav obvodu.

Prenosová funkcia – udáva súvis medzi odozvou obvodu (výstupným signálom) na pôsobenie na obvod (vstupným signálom). Vyjadruje vzťah medzi príčinou a následkom.

Imitančná funkcia – udáva vzťah medzi napätím a prúdom na vstupe resp. výstupe. Napr. vstupná impedancia $Z_i = U_i/I_i$ alebo výstupná admitancia $Y_o = I_o/U_o$.

2. **Syntéza** – navrhovanie fyzikálnej a topologickej štruktúry obvodu tak aby mal požadované vlastnosti. Syntéza nadväzuje na metódy analýzy, ale obecné je obtiažnejšie a riešenie nemusí mať vôbec alebo nie je jednoznačné.

3. **Ohraničená syntéza a identifikácia obvodu** – o fyzikálnej a topologickej štruktúre obvodu a obvodových funkciách existujú neúplné údaje. Treba určiť chýbajúce dáta tak, aby bola známa úplná štruktúra obvodu a jeho vlastnosti.

Metódy analýzy sú dobre rozpracované pre lineárne obvody s konštantnými hodnotami parametrov prvkov. Otvorené problémy zostávajú u parametrických a nelineárnych obvodov. Naproti tomu metódy syntézy sú rozpracované len pre niektoré lineárne obvody. Syntéza ostatných obvodov zatiaľ nie je rozvinutá.

Podľa časového priebehu odozvy možno pracovný režim elektronických obvodov rozdeliť na:

1. **Ustálený stav** – všetky napätia a prúdy sú periodickými funkciami času. Špeciálnym prípadom je jednosmerný ustálený stav – hodnoty prúdov a napätí sa s časom nemenia.

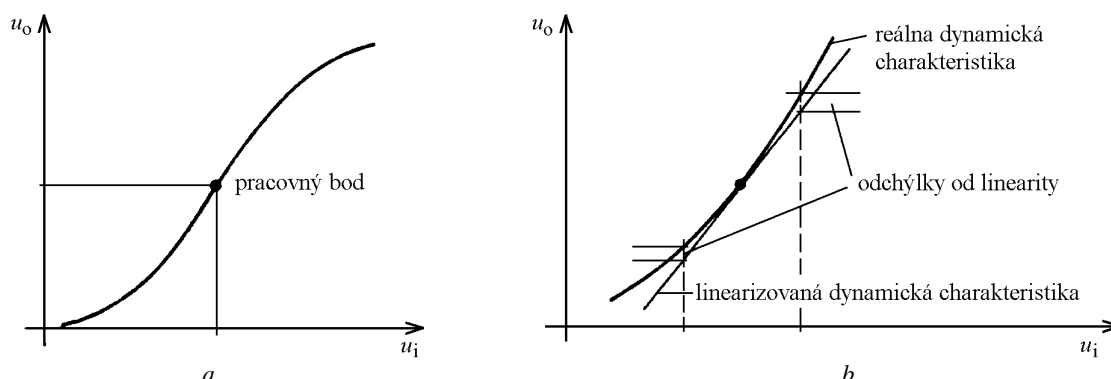
2. **Prechodový stav** – nastáva pri prechode z jedného ustáleného stavu do iného ustáleného stavu. Napätňové a prúdové odozvy nie sú periodickými funkciami času.

Ustálený stav je vlastne idealizácia, pretože nastáva až po „nekonečne dlhej dobe“ – keď zanikne prechodový jav. V praxi sa uspokojujeme s konečnou dobou, po ktorej sú príspevky od prechodových javov zanedbateľne malé, a potom daný stav považujeme za ustálený.

Periodické funkcie času (signály) možno Fourierovým rozvojom ([2] kap. 2.1) vyjadriť ako súčet harmonických zložiek – diskrétné spektrum signálu. Preto je výhodné vyšetřovať tzv. kmitočtové odozvy – vyšetřujeme závislosti amplitúd a fáz napätí a prúdov od kmitočtu.

Neperiodické signály majú spojité kmitočtové spektrum. Vyšetřovanie kmitočtovej odozvy vedie na Fourierovu transformáciu ([2] kap. 2.2). Pri neperiodických dejoch je výhodnejšie vyšetřovať obvody v časovej oblasti, čo vedie na Laplaceovu, alebo Laplace-Carsonovu transformáciu. Dôsledné využívanie týchto troch integrálnych transformácií, hlavne spätných (inverzných) transformácií, je podmienené dobrou znalosťou teórie funkcií komplexnej premennej ([2] kap. 8.3, [3]).

Reálne prvky a obvody sú všeobecne nelineárne. Napr. reálny prvok – odpor – sa prechodom prúdu zohrieva, čím sa mení veľkosť jeho elektrického odporu, teda parameter charakterizujúci prvok je funkciou prúdu.



Obr. 5

Ak je vstupný signál nulový, elektronický obvod je v ustálenom stave, vetvami tečú ustálené prúdy, uzly majú ustálené potenciály. Tieto prúdy a potenciály charakterizujú **pracovný bod**. Po privedení nenulového signálu a zaniknutí prechodových javov sa obvod dostane do iného ustáleného stavu, vetvami tečú iné ustálené prúdy, uzly majú iné ustálené potenciály. Dôležitou charakteristikou obvodu je **dynamická charakteristika**, čo je funkčná závislosť veľkosti dvoch vybraných veličín. Napr. závislosť veľkosti U_o , výstupného napätia od veľkosti U_i vstupného napätia $U_o = f(U_i)$ (obr. 5a).

Pre účely analýzy treba často elektronický obvod idealizovať – **linearizovať**. V praxi to znamená obmedziť sa na také veľkosti napätí a prúdov, pri ktorých možno vplyvy nelinearít zanedbať a považovať jednotlivé prvky a celý obvod za lineárny (obr. 5b).

4 ZÁKLADY TEÓRIE LINEÁRNYCH OBVODOV

Lineárne elektronické obvody sú opísané sústavou lineárnych diferenciálnych rovníc s konštantnými koeficientmi a pravou stranou typu $y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + a_2 y^{(n-2)} + \dots + a_{(n-1)} y^{(1)} + a_n y = F$. a_1, a_2, \dots, a_n sú vyjadrené pomocou parametrov R, L, C prvkov obvodu; F je známa funkcia času – vstupný signál; $y^{(k)}$ je k -ta derivácia hľadanej funkcie času (výstupnej veličiny, resp. časovej odozvy) podľa času. Z teórie diferenciálnych rovníc vyplýva, že ak y_1, y_2, \dots, y_m (v obvode odozvy) sú riešeniami uvedenej diferenciálnej rovnice pre rôzne pravé strany F_1, F_2, \dots, F_m , tak pre pravú stranu (v obvode vstupný signál) $F = F_1 + F_2 + \dots + F_m$ bude riešením $y = y_1 + y_2 + \dots + y_m$. Z tejto vlastnosti riešenia diferenciálnych rovníc vyplýva pre lineárne elektronické obvody **princíp superpozície**. Jedna z jeho možných formulácií je: Nech na lineárny obvod pôsobí signál, ktorý je súčtom viacerých zložiek (signálov). Výsledná odozva je súčtom čiastkových odoziev na jednotlivé zložky vstupného signálu.

Na základe princípu superpozície možno skúmať správanie sa a stav obvodu zvlášť pre jednosmerné signály a zvlášť pre striedavé signály.

Pre nelineárne obvody princíp superpozície neplatí. Napr. nech na nelineárnom odpore $R(i)$ je pre jeden signál odozva $u_1 = k \cdot i_1^2$, pre druhý signál $u_2 = k \cdot i_2^2$. Pre súčet signálov je odozva $k \cdot (i_1 + i_2)^2 = k \cdot (i_1^2 + i_2^2 + 2i_1 i_2) \neq k \cdot (i_1^2 + i_2^2)$

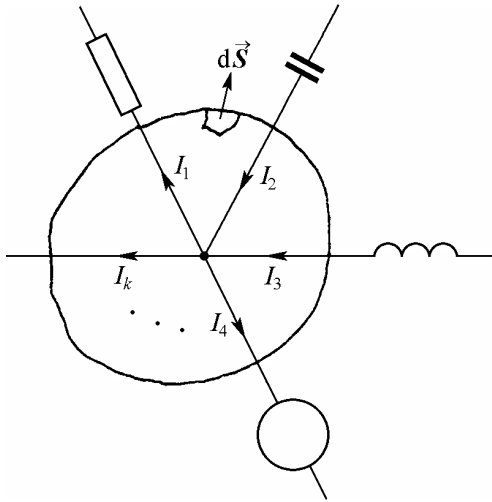
V lineárnych obvodoch so sústredenými parametrami možno vlnové deje zanedbať, t. j. doba, za ktorú sa elektromagnetické vlny dostanú z jedného uzla do druhého, je zanedbateľne krátka oproti perióde ustálených napätí a prúdov. Inak povedané: ľubovoľný rozmer elektrického obvodu so sústredenými parametrami je zanedbateľne malý voči vlnovej dĺžke elektromagnetických vln prislúchajúcich spracovávanému signálu. V takom prípade hovoríme o *kvázistacionárnych poliach* a prúdoch. Veličiny charakterizujúce elektromagnetické pole aj prúdy sú síce funkciami času, ale platia pre ne vzťahy $\text{div} \mathbf{i}(t) = 0$, $\text{rot} \mathbf{E}(t) = 0$ (platné všade **mimo** objem prvkov). Inak povedané: prúdy sú rozložené rovnomerne cez prierez i dĺžku vodičov a z vonkajších magnetických polí sa do obvodu neindukujú žiadne prúdy.

V týchto návodoch budeme vždy považovať polia a prúdy za kvázistacionárne a obvody za obvody so sústredenými parametrami.

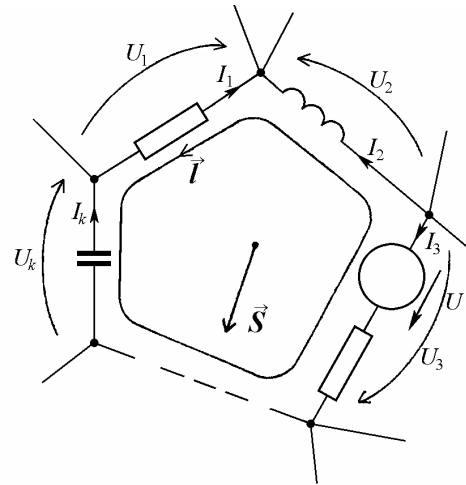
Z ďalších vlastností riešenia diferenciálnych rovníc obvodu a zákona zachovania energie možno odvodiť viacero princípov a teorém. Napr. princíp kompenzácie, princíp reciprocity, princíp duality, teoréma Théveninova (Nortonova), Cohnova, Tellegenova. Vhodné použitie týchto poučiek vedie k rýchlemu a pohodlnému riešeniu zadanej úlohy. Vhodnosť použitia je však podmienená bohatou praxou v počítačskom riešení obvodov. Pre dobré riešenie úloh z obvodov netreba poznať všetky poučky, ale treba ovládať dobre najzákladnejšie postupy a metódy [1] kap. 7.

4.1 Kirchhoffove pravidlá (zákony) [1] kap. 3

Ľubovoľný z uzlov obvodu obklopmo myslenu uzavretou orientovanou plochou S (obr. 6). Cez časť plochy dS vyteká zvnútra von prúd $i \cdot dS$ ($i \neq 0$ len v mieste vodiča). Celkový vytekajúci prúd je $\oint_S i \cdot dS = \sum_{m=1}^k I_m$. Podľa Gauss-Ostrogradského vety je $\oint_S i \cdot dS = \int_V \text{div } i \, d\tau$, kde V je objem uzavretý plochou S . Pre kvázistacionárne prúdy je $\text{div } i = 0$, takže $\oint_S i \cdot dS = 0$ a teda $\sum_{m=1}^k I_m = 0$. To je 1. Kirchhoffov zákon alebo lepšie: *Kirchhoffovo pravidlo pre prúdy*.



Obr. 6



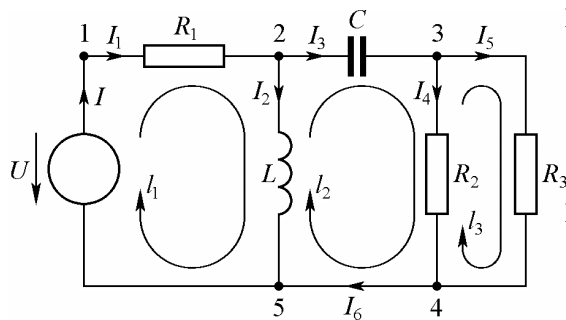
Obr. 7

Poznámka: Obyčajne sa prúdy, ktoré do uzla vtekajú, považujú za kladné a tie, ktoré z uzla vytekajú za záporné.

Zoberme ľubovoľných k uzlov, ktoré sú vetvami spojené do uzavretej slučky (obr. 7). Preložme cez tieto uzly a vetvy uzavretú orientovanú čiaru l a počítajme pozdĺž nej $\oint_l E \cdot dl$. Čiaru l môžeme rozdeliť na úseky tvorené jednotlivými vetvami. $\int E \cdot dl$ pozdĺž jednej vetvy je rovný vetvovému napätiu. Vetvové napätie je kladné, ak jeho smer súhlasí so smerom orientovanej čiary. Ak sú smery opačné, je vetvové napätie záporné. Integrál pozdĺž uzavretej orientovanej čiary je teda rovný súčtu vetvových napätí $\sum_{m=1}^k U_m$.

Podľa Stokesovej vety je $\oint_l E \cdot dl = \int_S \text{rot } E \cdot dS$, kde S je orientovaná plocha obkľúčená orientovanou uzavretou čiarou l . Pre kvázistacionárne polia je $\text{rot } E = 0$, takže $\sum_{m=1}^k U_m = 0$. To je 2. Kirchhoffov zákon alebo lepšie: *Kirchhoffovo pravidlo pre napätia*.

Pomocou Kirchhoffových pravidiel s použitím Ohmovho zákona a definícií kapacity a koeficientov indukčnosti môžeme zostaviť rovnice matematického modelu obvodu (obr. 8).



Kirchhoffovo pravidlo pre prúdy (uzly):

1. $I - I_1 = 0$
2. $I_1 - I_2 - I_3 = 0$
3. $I_3 - I_4 - I_5 = 0$
4. $I_4 + I_5 - I_6 = 0$
5. $I_2 + I_6 - I = 0$

Kirchhoffovo pravidlo pre napätia (slučky):

1. $-U + I_1 R_1 + L(dI_2/dt) = 0$
2. $-L(dI_2/dt) + (1/C) \int I_3 dt + I_4 R_2 = 0$
3. $-I_4 R_2 + I_5 R_3 = 0$

Obr. 8

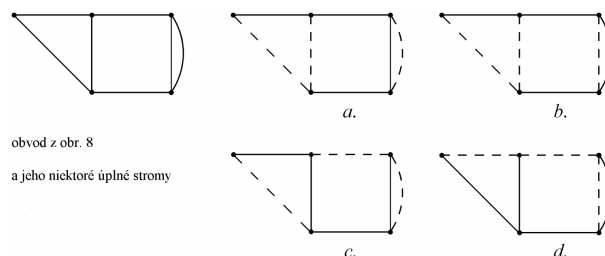
To je osem rovníc pre sedem neznámych prúdov. Rovnicu pre 5. uzol však dostaneme, ak odčítame od seba rovnice pre 1. až 4. uzol, takže jednu z rovníc pre uzly môžeme zo súboru vypustiť. Riešením sústavy zvyšných siedmich rovníc nájdeme veľkosti prúdov.

Slučky sme mohli vybrať aj inak a viac ako tri. Napr. cez uzly 1 – 2 – 3 – cez R_2 – 4 – 5 – 1, alebo 1 – 2 – 3 – cez R_3 – 4 – 5 – 1, alebo 2 – 3 cez R_3 – 4 – 5 – 2. Tým by sme ale dostali ešte väčší počet rovníc. Je zrejmé, že každá sústava viac ako siedmich rovníc bude vždy lineárne závislá. Ako vybrať správny počet vhodných rovníc si ukážeme v nasledujúcej kapitole.

4.2 Topologické pojmy

Z predošlého príkladu vyplynulo, že rovnice vyplývajúce z Kirchhoffových pravidiel sú lineárne závislé. Preto netreba aplikovať Kirchhoffove pravidlá na všetky uzly a všetky slučky, ale len na niektoré. Z praktického hľadiska je výhodné určiť najprv tieto uzly a slučky.

Majme obvod s n uzlami a m vetvami. Známe sú hodnoty parametrov prvkov. Hľadáme prúdy vo všetkých vetvách, teda hodnoty i_1, i_2, \dots, i_m . To znamená, že riešenie musíme hľadať na základe m lineárne nezávislých rovníc. Pomocou Kirchhoffovho pravidla pre prúdy možno napísať n rovníc pre n uzlov. Tieto sú však lineárne závislé. Prečo? Stačí si predstaviť, že týchto n homogénnych rovníc sčítame. Na ľavej strane sa každý prúd vyskytuje so znamienkom plus aj so znamienkom mínus, pretože iste do nejakého uzla vteká a z nejakého uzla vyteká. Výsledkom súčtu rovníc je $0 = 0$. Teda rovnice sú lineárne závislé a možno z nich získať práve $n - 1$ nezávislých rovníc. Potrebujeme ešte $m - n + 1$ nezávislých rovníc.



obvod z obr. 8
a jeho niektoré úplné stromy

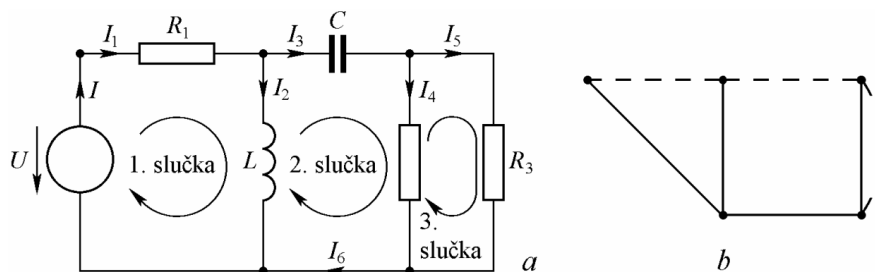
Obr. 9

Môžeme ich získať pomocou Kirchhoffovho pravidla pre napätia takýmto postupom: spojíme navzájom **všetky** uzly $n - 1$ ľubovoľne vybranými vetvami tak, aby netvorili uzavretú slučku. Tomuto

súboru vetiev sa hovorí **úplný strom**. Úplných stromov môže byť viacero (obr. 9). Vetvy v počte $m - n + 1$, ktoré nepatria do úplného stromu, sú **nezávislé vetvy**. Pridaním ktorejkoľvek nezávislej vetvy k úplnému stromu vznikne uzavretá slučka, na ktorú možno použiť Kirchhoffovo pravidlo pre napätia. Získaných $m - n + 1$ rovníc je nezávislých, pretože každá z nich zahrňuje nejakú nezávislú vetvu, ktorú nezahrňuje žiadna iná rovnica. [1] str. 170 – 175.

4.3.1 Metóda slučkových prúdov [1] kap. 6.4

Touto metódou sa zníži počet rovníc tým, že sa počítajú iba prúdy nezávislých vetiev, ktorých je $m - n + 1$, čo je menej ako m . Pri zostavovaní rovníc podľa Kirchhoffovho pravidla pre napätia predpokladáme, že prúd nezávislej vetvy tečie celou slučkou, ktorá obsahuje uvažovanú nezávislú vetvu. Závislé vetvy sú spoločné pre dve alebo viac slučiek a podľa princípu superpozície prúd v závislej vetve je súčtom prúdov slučiek, ktorým je vetva spoločná.



Obr. 10

Príklad (obr. 10): Úplný strom volíme podľa obr. 10b. Slučkové prúdy sú I_1, I_3, I_5 . S použitím Kirchhoffovho pravidla pre napätia môžeme napísať tri rovnice pre tri neznáme slučkové prúdy.

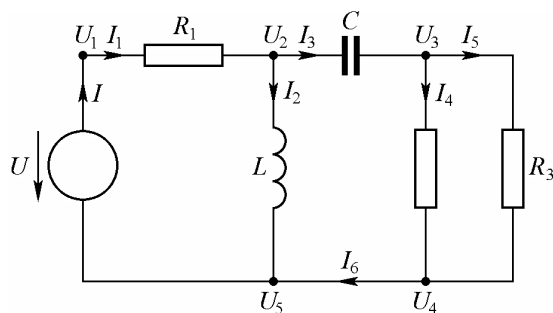
1. slučka $-U + I_1 R_1 + L \frac{d(I_1 - I_3)}{dt} = 0$
2. slučka $L \frac{d(I_3 - I_1)}{dt} + \frac{1}{C} \int I_3 dt + K + (I_3 - I_5) R_2 = 0$
3. slučka $-(I_3 - I_5) R_2 + I_5 R_3 = 0$

4.4 Metóda uzlových napätí [1] kap. 6.5

Všeobecne má každý uzol v obvode iný potenciál. Z potenciálov uzlov možno určiť vetvové napätia a z nich vetvové prúdy. Na analýzu obvodov s n uzlami preto stačí určiť n uzlových potenciálov. Avšak rovnice vyplývajúce z Kirchhoffovho pravidla pre prúdy pre všetkých n uzlov sú lineárne závislé (kap. 4.2), preto z nich možno jednu vynechať. Tým zostane podmienka pre veľkosť potenciálu vynechaného uzla voľná. Volíme tento potenciál rovný nule a uzol nazveme **referenčný**. Potenciály ostatných uzlov sú potom číselne rovné napätiu uzlov voči referenčnému uzlu.

Vetvové prúdy vyjadríme pomocou uzlových napätí a Kirchhoffovo pravidlo pre prúdy použité na obvod nám umožní zostaviť $n - 1$ rovníc pre $n - 1$ uzlových napätí.

Príklad (obr. 11): Potenciál referenčného uzla volíme rovný nule a za referenčný uzol zvolíme uzol 5, teda $U_5 = 0$. S použitím Kirchhoffovho pravidla pre prúdy môžeme napísať štyri rovnice pre štyri neznáme uzlové napätia.

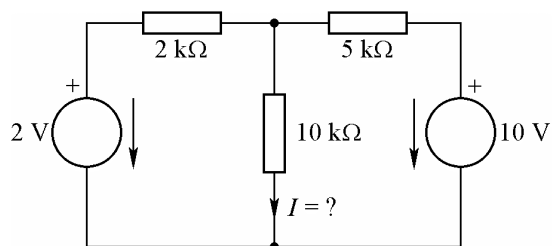


Obr. 11

1. uzol $U_1 = U$
2. uzol $\frac{U_1 - U_2}{R_1} - \frac{1}{L} \int U_2 dt + K - \frac{d(U_2 - U_3)}{dt} = 0$
3. uzol $C \frac{d(U_2 - U_3)}{dt} - \frac{U_3 - U_4}{R_2} - \frac{U_3 - U_4}{R_3} = 0$
4. uzol – medzi uzlami 4. a 5. je skrat, prúd I_6 bude mať konečnú hodnotu len pre $U_4 - U_5 = 0$

Napätie zdroja U je známe, teda z rovnice pre 1. uzol je známe i napätie $U_1 = U$. Pretože podľa rovnice pre 4. uzol je $U_4 = U_5 = 0$, problém sa zúžil na riešenie dvoch rovníc pre 2. a 3. uzol pre dve neznáme napätia U_2 a U_3 . Z týchto dvoch napätí možno určiť ľubovoľný vetvový prúd.

Úloha 2. Metódami Kirchoffových rovníc, slučkových prúdov a uzlových napätí (každou samostatne) vypočítajte prúd I v obvode na obr. 12.

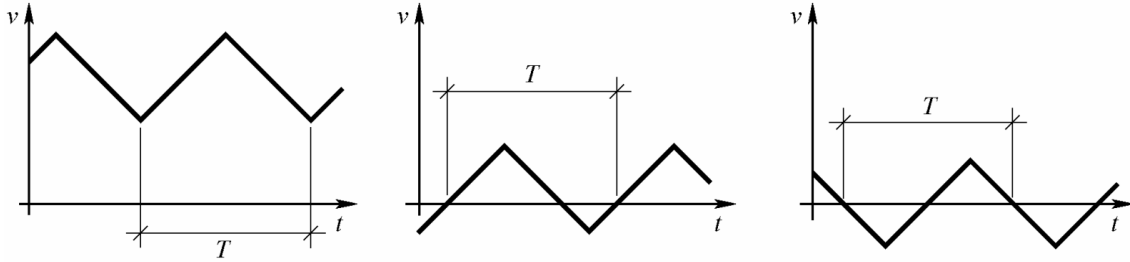


Obr. 12

4.5 Symbolicko-komplexné zobrazenie [1] kap. 4.2

Metódy uzlových napätí a slučkových prúdov síce umožnia znížiť počet rovníc, ale tie naďalej zostávajú integrálno-diferenciálnymi rovnicami. Tieto sa dajú jednoduchými transformáciami premeniť na sústavu lineárnych diferenciálnych rovníc s konštantnými koeficientmi, s pravou stranou, ale riešenie problému sa tým zjednoduší iba čiastočne. Integrálnymi transformáciami (Fourierovou, Laplaceovou, Carsonovou) možno túto sústavu diferenciálnych rovníc premeniť na sústavu algebraických rovníc. Spätné transformácie však vyžadujú od riešiteľa dobrú znalosť teórie analytických funkcií.

V elektronike nás najčastejšie zaujímajú ustálené stavy v elektronických obvodoch. V ustálenom stave sú všetky napätia a prúdy periodickými funkciami času. Pre periodickú veličinu platí vzťah: $u(t + T) = u(t)$, kde čas T sa nazýva perióda.



Obr. 13

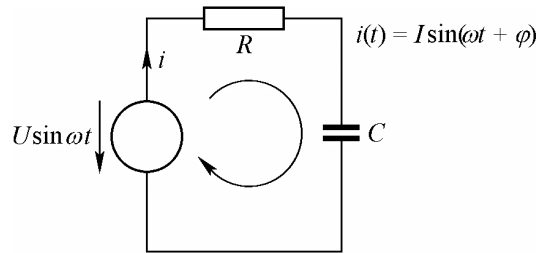
Periodická veličina, ktorá nemení svoju polaritu, sa nazýva *pulzujúca* (obr. 13a). Špeciálnym prípadom periodických veličín sú *jednosmerné veličiny*, ktorých veľkosť sa s časom nemení.

Periodické veličiny, ktoré menia behom cyklu polaritu (obr. 13b) sa nazývajú *kmitavé veličiny*. Špeciálnym prípadom sú **striedavé veličiny**, ktorých stredná hodnota za celistvý násobok periódy je nulová (obr. 13c).

Z kmitavých veličín majú v elektronike význačné postavenie striedavé veličiny opísané harmonickými funkciami času – $v = V \sin(\omega t + \varphi)$ alebo $w = V \cos(\omega t + \varphi)$. Ľahko sa generujú, matematické operácie s harmonickými funkciami sú pomerne jednoduché a ľubovoľné periodické funkcie možno vyjadriť práve súčtom harmonických veličín ([2] kap. 2.1).

V praxi sa preto najčastejšie ustálený stav elektronického obvodu vyšetruje pre harmonické veličiny – **harmonický ustálený stav**. Zmene podliehajú amplitúdy V a fázové uhly φ . Kmitočet zostáva konštantný.

Aj keď sú matematické operácie s harmonickými funkciami pomerne jednoduché, predsa len sú pre bežnú prax ťažkopádne a prácne.



Obr. 14

Príklad: Počítajme prúd v obvode z obr. 14 v ustálenom stave. Podľa Kirchoffovho pravidla pre napätia môžeme napísať jedinou rovnicu $-U \sin(\omega t + \varphi) + iR + (1/C) \int i dt + K = 0$, V ustálenom stave tečie obvodom harmonický prúd $i(t) = I \sin(\omega t + \varphi)$. Aj napätie na kondenzátore je harmonickou funkciou času, preto je $K = 0$. Po úprave oboch rovníc dostaneme vzťah:

$$IR \sin(\omega t + \varphi) - \frac{I}{\omega C} \cos(\omega t + \varphi) = U \sin(\omega t + \varphi)$$

z ktorého po intenzívnom asi 10 minútovom počítaní dostaneme vzťahy

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}}, \quad \text{tg } \varphi = \frac{1}{\omega RC}$$

Pre zložitejšie obvody by riešenie trvalo oveľa dlhšie. Zjednodušenie prináša **symbolicko-komplexné zobrazenie** harmonických veličín. Každý veličine $u(t) = V \sin(\omega t + \varphi)$ alebo $u(t) = V \cos(\omega t + \varphi)$

priradíme práve jednu komplexnú veličinu $V \exp j(\omega t + \varphi)$ nazývanú **komplexor** harmonickej veličiny. Komplexoru spätne priradíme harmonickú funkciu $u(t) = \text{Im}\{V \exp j(\omega t + \varphi)\}$ alebo $u(t) = \text{Re}\{V \exp j(\omega t + \varphi)\}$.

Komplexor môžeme písať v tvare $V e^{j\varphi} e^{j\omega t} = \mathbf{v} e^{j\omega t}$, čím sme zaviedli komplexnú veličinu $\mathbf{v} = V e^{j\varphi}$ nazývanú *komplexná amplitúda harmonickej veličiny* alebo skrátene **fázor**. Fázor budeme v tomto učebnom texte vždy označovať tučnou kurzívou (podobne ako vektory).

Z fázoru môžeme určiť φ a V , pretože

$$\mathbf{v} = V(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad \text{a} \quad \varphi = \arctg \frac{\text{Im}\{\mathbf{v}\}}{\text{Re}\{\mathbf{v}\}}$$

Pre ďalšie použitie je dôležité poznať niektoré vlastnosti komplexorov a fázorov. Je jedno či priradíme komplexor funkcii \sin alebo \cos . Ak je komplexor priradený funkcii $u(t) = V \sin(\omega t + \varphi)$, tak fázor funkcie $u(t) = V \cos(\omega t + \varphi)$ je už definovaný, pretože platí $V \cos(\omega t + \varphi) = V \sin(\omega t + \varphi + \pi/2)$, preto je $\mathbf{w} = j\mathbf{v}$.

1. Fázor reálneho čísla k je samo číslo; $k = k e^{j0} = k$.
2. Funkcii $k \cdot u(t) = kV \sin(\omega t + \varphi)$, kde k je reálne číslo, priradíme komplexor $(kV e^{j\varphi}) e^{j\omega t} = k(V e^{j\varphi}) e^{j\omega t}$. Teda fázor funkcie kv je $k\mathbf{v}$.
3. Funkciám $v_1(t) = V_1 \cos(\omega t + \varphi)$ a $v_2(t) = V_2 \cos(\omega t + \varphi)$ priradíme komplexory $V_1 e^{j\varphi_1} e^{j\omega t}$ a $V_2 e^{j\varphi_2} e^{j\omega t}$. Ich súčet je $(V_1 e^{j\varphi_1} + V_2 e^{j\varphi_2}) e^{j\omega t}$, teda fázor súčtu $v_1 + v_2$ je rovný súčtu fázorov $\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2$.
4. Ak sú funkcie rovnaké $v_1 = v_2$, teda $v_1 - v_2 = 0$. Podľa vlastnosti 3. pre fázor rozdielu platí $v_1 - v_2 = \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2 = 0$, a teda sú rovnaké aj ich fázory $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_2$.
5. Ak $u(t) = V \sin(\omega t + \varphi)$. Pre deriváciu funkcie platí $\frac{dv(t)}{dt} = \omega V \cos(\omega t + \varphi) = \omega V \sin(\omega t + \varphi + \pi/2)$.

Komplexor priradený derivácii veličiny podľa času je $[\omega V \exp j(\varphi + \pi/2)] e^{j\omega t} = (j\omega V e^{j\varphi}) e^{j\omega t}$. Teda pre fázor derivácie funkcie v je $j\omega\mathbf{v}$.

6. Nech $u(t) = V \cos(\omega t + \varphi)$, potom integrál $u(t) = \int u(t) dt = \frac{V}{\omega} \sin(\omega t + \varphi) = \frac{V}{\omega} \cos(\omega t + \varphi - \pi/2) + K$; K volíme tak, aby $u(t)$ bola harmonickou funkciou času. Zanedbávame prechodové javy, lebo nás zaujíma ustálený stav. Preto je $K = 0$. Funkcii $u(t)$ priradíme komplexor $[\frac{V}{\omega} \exp j(\varphi + \pi/2)] e^{j\omega t} = (\frac{V}{j\omega} e^{j\varphi}) e^{j\omega t}$.

Teda fázor integrálu funkcie v je $\frac{\mathbf{v}}{j\omega}$.

Vlastnosti 5. a 6. umožňujú pomocou symbolicko-komplexného zobrazenia premeniť integrálno-diferenciálne rovnice opisujúce obvod na algebraické rovnice riešiteľné v obore komplexných čísel. V rovniciach vystupuje násobiteľ $e^{j\omega t}$, ktorým možno rovnice predeliť, takže ďalej stačí počítať iba s fázormi.

Príklad: Riešme obvod z obr. 14 pomocou symbolicko-komplexného zobrazenia. Obrazom rovnice vyplývajúcej z Kirchoffovho pravidla pre napätia je $-U + RI + I/j\omega C = 0$. Z obrazu vyplývajú vzťahy:

$$\mathbf{I} = \frac{U}{R + \frac{1}{j\omega C}}; \quad \text{Im}\{\mathbf{I}\} = \frac{U}{\omega C \left[R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2} \right]}; \quad \text{Re}\{\mathbf{I}\} = \frac{UR}{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}},$$

a teda $\varphi = \arctg(1/\omega RC)$. Prúd v obvode môžeme vyjadriť spätným priradením funkcie ku komplexoru $\mathbf{I} e^{j\omega t}$:

$$I(t) = |\mathbf{I}| \sin\left(\omega t + \arctg \frac{1}{\omega RC}\right) = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}} \sin\left(\omega t + \arctg \frac{1}{\omega RC}\right),$$

čo zodpovedá predošlému výsledku.

4.6 Zovšeobecnený Ohmov zákon a Kirchhoffove rovnice v symbolicko-komplexnom zobrazení [1] kap. 4.3

Symbolicko-komplexné zobrazenie zovšeobecneného Ohmovho zákona $U = ZI$ resp. $I = YU$, kde Z a Y sú imitančné funkcie, a to Z – impedancia, Y – admitancia (kap. 3), je $U = ZI$ resp. $I = YU$.

Konkrétne pre odpor $U = RI = RI$ ($Z_R = R$),

pre cievku $U = L \frac{dI}{dt} = j\omega LI$ ($Z_L = j\omega L$),

pre kondenzátor $U = \frac{1}{C} \int I dt + K = \frac{1}{j\omega C} I$ ($Z_C = \frac{1}{j\omega C}$, $K = 0$)

Výrazy $Z = U/I$, resp. $Y = I/U$ sa nazývajú *komplexná impedancia*, resp. *komplexná admitancia*.

Pre Kirchhoffove pravidlá môžeme na základe 3. vlastnosti fázorov písať

$$\sum_{m=1}^k I_m = 0; \quad \sum_{m=1}^k U_m = 0$$

Podobne môžeme pracovať s fázormi napätí a prúdov v metódach slučkových prúdov a uzlových napätí.

Príklad: Riešme metódou uzlových napätí obvod z obr. 11. Stačí písať obrazy rovníc pre 2. a 3. uzol, pretože $U_1 = U$ a $U_4 = U_5 = 0$.

$$\frac{U - U_2}{R_1} - \frac{U_2}{j\omega L} - j\omega C(U_2 - U_3) = 0$$

$$j\omega C(U_2 - U_3) - \frac{U_3}{R_2} - \frac{U_3}{R_3} = 0$$

To je sústava dvoch rovníc pre neznáme U_2 a U_3 v oblasti komplexných čísel, teda riešiteľná algebraickými metódami.

Podobne môžeme riešiť obvod z obr. 10 metódou slučkových prúdov v symbolicko-komplexnom zobrazení.

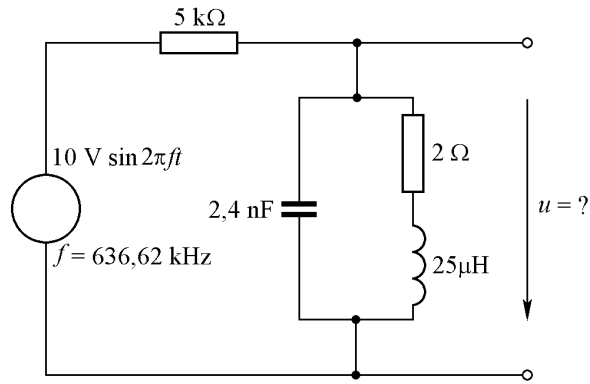
$$-U + I_1 R_1 + j\omega L(I_1 - I_3) = 0$$

$$j\omega L(I_3 - I_1) - \frac{1}{j\omega C} I_3 - R_2(I_3 - I_5) = 0$$

$$-R_2(I_3 - I_5) + R_3 I_5 = 0$$

S fázormi napätí a prúdov pracujeme podobne ako s napätiami a prúdmi. Impedancie cievok a kondenzátorov nahradíme ich komplexnými impedanciami $j\omega L$ a $1/j\omega C$. Odpor R zostáva bez zmeny. V praxi sa pri ručnom zápise vzťahov často upúšťa aj od označenia fázoru veličiny a namiesto o fázore prúdu a fázore napätia sa hovorí o prúde a napätí. Pri presnom vyjadrovaní však nesmieme zabúdať na význam použitých symbolov.

Úloha 3. Vypočítajte napätie u v zapojení podľa obr. 15.



Obr. 15

4.7 Maticový zápis rovníc elektronického obvodu [4]

Sústavy rovníc z predošlého príkladu môžeme zapísať po malej úprave v tvare:

Pre uzlové napätia

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right) U_2 - j\omega C U_3 &= \frac{U}{R_1} \\ -j\omega C U_2 + \left(j\omega C + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) U_3 &= 0 \end{aligned}$$

alebo v maticovom tvare

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C & -j\omega C \\ -j\omega C & j\omega C + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{U}{R_1} \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{skrátene } (\mathbf{Y}) \cdot (\mathbf{U}) = (\mathbf{I}).$$

V praxi, aby sme ušetrili čas, už nepíšeme rovnice pre uzly, ale zapisujeme výrazy rovno do maticového tvaru. Postup je nasledovný:

1. napäťové modely zdrojov zameníme prúdovými modelmi zdrojov (kap. 1, obr. 2),
2. zvolíme si vhodné referenčné uzol a jeho potenciál položíme rovný nule,
3. očísľujeme ostatných $n - 1$ uzlov. Číslo uzla znamená súčasne index uzlového napätia,
4. zapíšeme prvky Y_{rs} matice takto:
 - ak $r = s$, tak prvok Y_{rr} je súčet všetkých komplexných admitancií, ktoré sú pripojené do uzla r
 - ak $r \neq s$, tak prvok Y_{rs} je komplexná admitancia so **záporným znamienkom**, ktorá spája uzly r a s .
5. Pravá strana r -tej rovnice (r -tý riadok matice prúdu) obsahuje súčet fázorov prúdov zdrojov pripojených do uzla r (vtekajúce so znamienkom plus, vytekajúce so znamienkom mínus).

Pre slučkové prúdy

$$\begin{aligned} (R_1 + j\omega L)I_1 - & & j\omega L \cdot I_3 + & & 0 = U \\ -j\omega L I_1 + (j\omega L + 1/j\omega C + R_2) \cdot I_3 - & & R_2 I_5 = 0 \\ 0 - & & R_2 \cdot I_3 + (R_2 + R_3) I_5 = 0 \end{aligned}$$

alebo v maticovom tvare

$$\begin{pmatrix} R_1 + j\omega L & -j\omega L & 0 \\ -j\omega L & j\omega L + 1/j\omega C + R_2 & -R_2 \\ 0 & -R_2 & R_2 + R_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{skrátene } (\mathbf{Z}) \cdot (\mathbf{I}) = (\mathbf{U}).$$

Praktický postup zápisu:

1. všetky modely zdrojov volíme ako napäťové modely,
2. vyberieme vhodné nezávislé slučky, označíme si ich orientáciu a očísľujeme. Čísla slučiek súčasne znamenajú indexy slučkových prúdov,

3. zapíšeme prvky \mathbf{Z}_r takto:

– ak $r = s$, tak prvok \mathbf{Z}_{rr} je súčet všetkých komplexných impedancií v r -tej slučke,

– ak $r \neq s$, tak prvok \mathbf{Z}_{rs} je komplexná impedancia spoločná r -tej slučke a s -tej slučke. Znamienko (sign \mathbf{Z}_{rs}) je $(-)$, ak sú orientácie r -tej a s -tej slučky na impedancii \mathbf{Z}_{rs} nesúhlasné. Ak sú orientované súhlasne, tak znamienko je $(+)$,

4. pravá strana r -tej rovnice (r -tý riadok matice napätia) je súčet všetkých napätí zdrojov v r -tej slučke. Podľa dohodnutého značenia polarita zdroja šípku (smeruje od miesta s vyšším potenciálom k miestu s nižším potenciálom, kap. 1) bude znamienko napätia zdroja kladné pri nesúhlasnej orientácii slučky a šípky napätia zdroja.

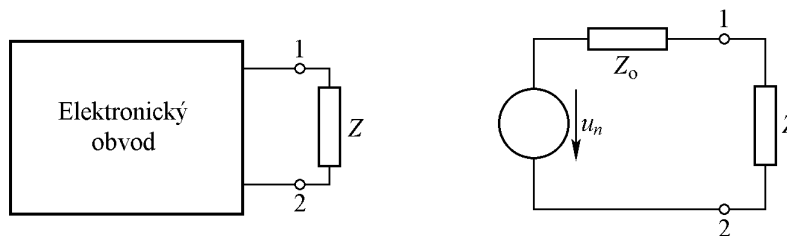
Pri ďalších úpravách a riešeníach sústavy rovníc obvodu používame známe pravidlá z algebry pre maticový počet a počítanie s determinantmi [4].

4.8 Théveninova veta (princíp náhradného zdroja) [1] kap. 7.3

Analýzujeme lineárny elektronický obvod, ktorý obsahuje ľubovoľný počet napäťových a prúdových zdrojov, a ktorý možno spojiť s iným obvodom dvoma uzlami (obr. 16a). Takýto obvod sa nazýva **aktívny dvojpól**.

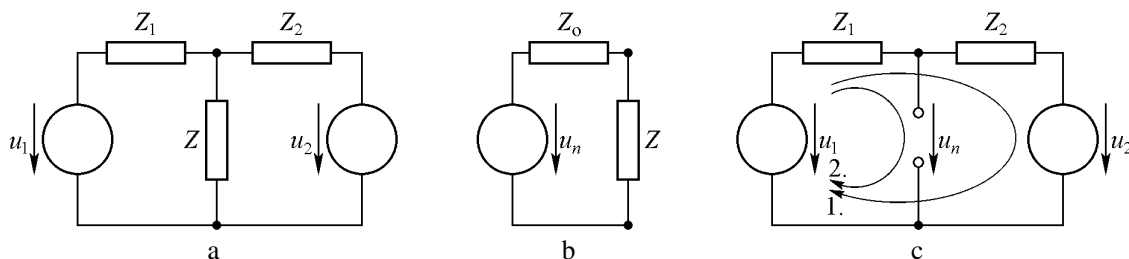
Théveninova veta (dôkaz pozri [1]) tvrdí:

Aktívny dvojpól možno nahradiť ideálnym zdrojom napätia u_n spojeným v sérii s impedanciou Z_o (obr. 16b). Napätie u_n je napätie na uzloch 1 – 2 pri odpojenej záťaži (napätie naprázdno). Impedancia Z_o je impedancia medzi uzlami 1 – 2 pri odpojenej záťaži, skratovaných ideálnych zdrojov napätia a rozpojených ideálnych zdrojov prúdu v obvode aktívneho dvojpólu.



Obr. 16

Príklad: Častým prípadom býva napájanie zát'áže dvoma alebo viacerými paralelne spojenými reálnymi zdrojmi napätia (obr. 17a). Podľa Théveninovej vety môžeme aktívny dvojpól, ktorý napája zát'áž Z nahradit' jediným zdrojom napätia u_n s vnútornou impedanciou Z_o (obr. 17b). Odpojíme zát'áž Z a podľa Kirchhoffovho pravidla pre napätia je (obr. 17c):



Obr. 17

1. slučka $-u_1 + I(Z_1 + Z_2) + u_2 = 0$
 2. slučka $-u_1 + IZ_1 + u_n = 0$

alebo v maticovom tvare
$$\begin{pmatrix} Z_1 + Z_2 & 0 \\ Z_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ u_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 - u_2 \\ u_1 \end{pmatrix}$$

Riešením týchto dvoch rovníc je $u_n = \frac{u_1 Z_2 + u_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}$ (harmonický stred).

Vnútorná impedancia Z_o pri skratovaní ideálnych zdrojov napätia u_1 a u_2 je paralelná kombinácia Z_1 a Z_2 , teda $Z_o = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$

Pri určovaní vnútornej impedancie u zložitejších obvodov možno postupovať takto:

Napätie naprázdno aktívneho dvojpólu zmeriame alebo určíme z prenosovej funkcie a je u_n .

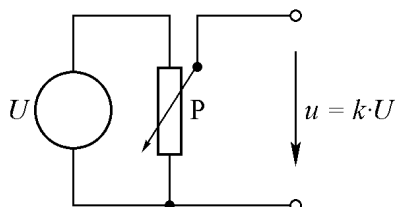
Zmeriame alebo z prenosovej funkcie určíme skratový prúd pri $Z \rightarrow 0$. Pretože je $I_\infty = u_n / Z_o$, tak podiel $u_n / I_\infty = Z_o$ je vnútorná impedancia náhradného zdroja.

V predošlom príklade je

$$I_\infty = \frac{u_1}{Z_1} + \frac{u_2}{Z_2} = \frac{u_1 Z_2 + u_2 Z_1}{Z_1 Z_2}, \quad \text{teda} \quad Z_o = \frac{u_n}{I_\infty} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Táto metóda zjednodušuje určenie výstupnej impedancie napr. zosilňovačov.

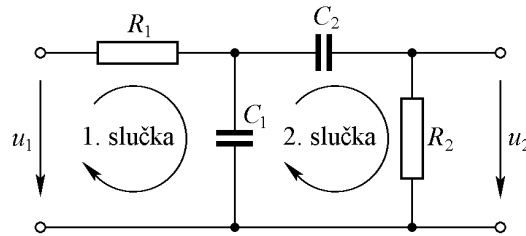
Úloha 4. Potenciometrom sa delí napätie U na hodnotu kU podľa polohy bežca potenciometra; $k \in \langle 0, 1 \rangle$ (obr. 18). Určte výstupný odpor na svorkách podľa obrázku. Kedy je výstupný odpor najväčší a aké je vtedy výstupné napätie kU ?



Obr. 18

4.9 Charakteristiky obvodov v ustálenom stave [1] kap. 5.4

V ustálenom stave sú všetky napätia a prúdy v obvode periodickými funkciami času. Teoreticky stačí určiť napätie a prúdy jednotlivých harmonických zložiek spektra signálu – teda určiť napätia a prúdy v obvode ako funkcie kmitočtu. Výsledná odozva obvodu na periodický vstupný signál je podľa princípu superpozície súčtom odoziev na jednotlivé zložky spektra vstupného signálu. Spektrum vstupného signálu možno určiť napr. Fourierovou analýzou.



Obr. 19

Metódou slučkových prúdov môžeme obvod z obr. 19 opísať maticou (i_1, i_2, u_1, u_2 sú funkciami kmitočtu):

$$\begin{pmatrix} R_1 + 1/j\omega C_1 & -1/j\omega C_1 \\ -1/j\omega C_1 & 1/j\omega C_1 + 1/j\omega C_2 + R_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Napätie $u_2 = R_2 i_2$. S použitím Cramerovho pravidla určíme fázor prúdu i_2

$$\begin{aligned} i_2 &= \frac{u_1 \frac{1}{j\omega C_1}}{\begin{pmatrix} R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2} + R_2 \end{pmatrix} + \frac{1}{\omega^2 C_1^2}} = \frac{u_1 \frac{1}{j\omega C_1}}{R_1 R_2 + u_1 \frac{1}{j\omega} \left(\frac{R_1}{C_1} + \frac{R_1}{C_2} + \frac{R_2}{C_1} \right) - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2}} \\ &= \frac{j\omega C_2}{1 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + j\omega(R_1 C_2 + R_1 C_1 + R_2 C_2)} u_1 \end{aligned}$$

a fázor napätia $u_2 = \frac{j\omega R_2 C_2}{1 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + j\omega(R_1 C_2 + R_1 C_1 + R_2 C_2)} u_1 = K(j\omega) u_1$. Funkciu $K(j\omega)$ nazývame **prenosová funkcia** napätia.

Ak použijeme výrazy pre fázory $u_1 = U_1 e^{j\varphi_1(\omega)}$ a $u_2 = U_2 e^{j\varphi_2(\omega)}$ je

$$K(j\omega) = \frac{u_2}{u_1} = \frac{U_2}{U_1} e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)} = \frac{U_2}{U_1} e^{j\varphi(\omega)} = |K(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$$

Funkciu $|K(j\omega)| = \left| \frac{u_2}{u_1} \right|$ nazývame **amplitúdová** (útlmová) kmitočtová charakteristika a funkciu

$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}\{K(j\omega)\}}{\text{Re}\{K(j\omega)\}}$ **fázová** kmitočtová charakteristika.

Z praktického hľadiska sú dôležité niektoré imitančné funkcie, najmä vstupná a výstupná impedancia resp. admitancia, ktoré sú tiež funkciami kmitočtu.

Vstupná impedancia obvodu z obr. 19 je

$$\begin{aligned} Z_i &= R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \left(\frac{1}{j\omega C_2} + R_2 \right) = R_1 + \frac{1 + j\omega R_2 C_2}{j\omega C_2 + j\omega C_1 - \omega^2 R_2 C_1 C_2} = \\ &= R_1 + \frac{1 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + j\omega(R_1 C_2 + R_1 C_1 + R_2 C_2)}{j\omega(C_1 + C_2)R_1 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2} \end{aligned}$$

Ide o obvod nezaťažný, preto hovoríme o vstupnej impedancii pri výstupe naprázdno.

Výstupnú impedanciu určíme postupom opísaným v kap. 4.9.

$$\begin{aligned} u_n &= u_2 \\ i_\infty &= \lim_{R_2 \rightarrow 0} i_2 = \frac{j\omega C_2}{1 + j\omega(R_1 C_2 + R_1 C_1)} u_1 \\ Z_o &= \frac{u_n}{i_\infty} = R_2 \frac{1 + j\omega R_1(C_1 + C_2)}{1 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + j\omega(R_1 C_2 + R_1 C_1 + R_2 C_2)} \end{aligned}$$

Pretože vnútorná impedancia zdroja napätia u_1 je nulová (predpokladáme podľa obrázku ideálny zdroj napätia), hovoríme o výstupnej impedancii pri vstupe nakrátko.

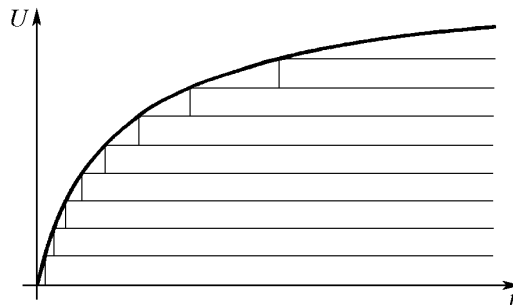
Ak by záťaž a vnútorná impedancia zdroja u_1 boli iné ako nekonečno a nula, zmenili by sa vo vzťahoch odpory R_1 a R_2 na impedancie Z_1 a Z_2 .

4.10 Prechodové charakteristiky

Ustálený stav elektronického obvodu sa môže porušiť zmenou topologickej štruktúry obvodu (skrat, rozpojenie vetvy a pod.), alebo zmenou parametrov niektorých pasívnych prvkov, alebo zmenou parametrov niektorých aktívnych prvkov (pripojenie či odpojenie zdroja napätia alebo prúdu, zmena tvaru priebehu signálu a pod.).

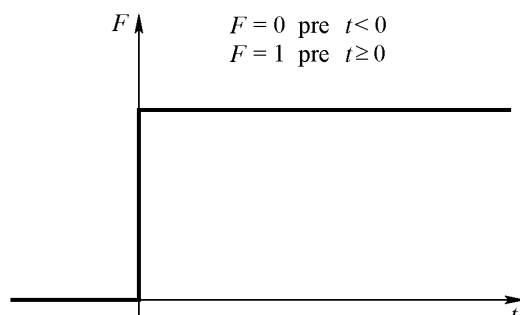
Ktoroukoľvek zmenou vznikne nový obvod, ktorý má iný ustálený stav. Teoreticky sa obvod dostáva do nového ustáleného stavu po nekonečne dlhom čase. Prakticky sa odozvy obvodu od ustáleného stavu líšia veľmi málo už po pomerne krátkom čase. Pokiaľ sú tieto odchýlky menšie ako dohodnutá tolerancia, považujeme deje v obvode za ustálené.

Riešenie prechodových javov, t. j. napätových a prúdových odoziev obvodu na nejakú zmenu, býva dosť komplikované ([1] str. 304 – 348). Zjednoduší sa použitím Laplaceovej transformácie.



Obr. 20

V praxi sa vyskytujú prechodové javy pri normálnej činnosti obvodu prevažne ako odozvy na zmeny (prudké) tvaru signálu. Každú zmenu tvaru signálu môžeme vyjadriť súčtom skokových zmien (obr. 20). Na riešenie prechodového javu teda stačí poznať odozvu obvodu na **jednotkový skok** signálu (obr. 21). Pomocou Duhamelovho integrálu možno potom vyjadriť odozvu obvodu na ľubovoľnú zmenu tvaru signálu [1] kap. 10.6.

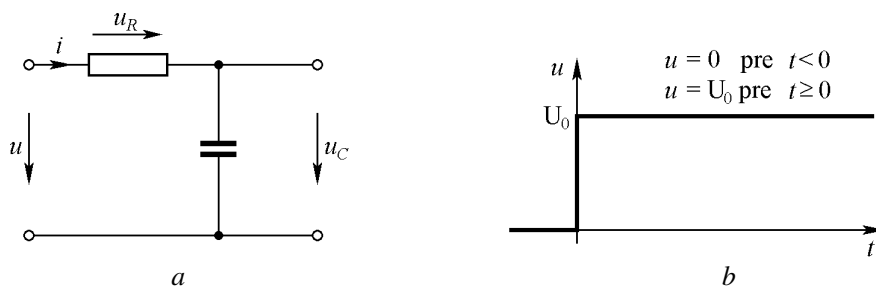


Obr. 21

Laplaceova transformácia však vyžaduje hlbšie štúdium analytických funkcií. Na jednoduché obvody síce horko-ťažko, ale vystačíme so základnými znalosťami riešenia diferenciálnych rovníc. [2]

Príklad: Počítajme odozvu obvodu z obr. 22a na napäťový skok podľa obr. 22b. Z Kirchhoffovho pravidla pre napätia plynie

$$u = u_R + u_C, \text{ kde } u_R = iR \text{ a } u_C = \frac{1}{C} \int idt + K$$



Obr. 22

Aby sme sa vyhli riešeniu integrálnej rovnice, budeme za základnú neznámu považovať u_C . Potom $i = C \frac{du_C}{dt}$ a $u_R = RC \frac{du_C}{dt}$, a teda treba riešiť rovnicu

$$u = RC \frac{du_C}{dt} + u_C$$

Riešením metódou variácie konštánt tejto diferenciálnej rovnice je

$$u_C = K(t)e^{-t/RC}, \text{ kde } K(t) = \frac{1}{RC} \int u e^{-t/RC} dt + K = u e^{-t/RC} + K$$

Integračnú konštantu určíme zo začiatočnej podmienky: v okamihu napäťového skoku je na kondenzátore napätie u_{C0} , t. j. $u_C(0-) = u_C(0+) = u_{C0}$ (limita zľava = limita sprava), a preto

$$u_{C0} = (u + Ke^{-t/RC})_{t \rightarrow 0} = U_0 + K \text{ a z toho } K = u_{C0} - U_0$$

Riešením diferenciálnej rovnice teda je

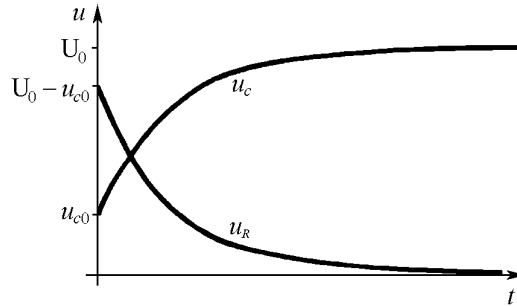
$$u_C = U_0 + (u_{C0} - U_0)e^{-t/RC} = U_0(1 - e^{-t/RC}) + u_{C0} e^{-t/RC}; t \in \langle 0, \infty \rangle$$

z ktorého možno určiť prúd i a napätie u_R

$$i = C \frac{du_C}{dt} = -\frac{u_{C0} - U_0}{R} e^{-t/RC}$$

$$u_R = iR = (U_0 - u_{C0})e^{-t/RC}$$

Priebehy u_R a u_C sú na obr. 23.



Obr. 23

Výraz RC v menovateli exponentu sa nazýva *časová konštanta* ($RC = \tau$) obvodu. U takýchto jednoduchých obvodov sa považuje prechodový jav za ukončený po uplynutí doby 5τ . Vtedy je $e^{-5} = 0,0067$.

Pre obvod z obr. 19 je už riedenie prechodového javu komplikovanejšie, vedie na sústavu dvoch diferenciálnych rovníc prvého rádu. Na ilustráciu použijeme na riešenie prechodového javu tohto obvodu Laplaceovu transformáciu. Nech $j\omega \rightarrow p$, potom

$$K(p) = \frac{pR_2C_2}{1 + p(R_1C_1 + R_2C_2 + R_1C_2) + pR_1R_2C_1C_2}$$

Obrazom napätového jednotkového skoku je $1/p$, a teda obrazom prechodovej funkcie je

$$\frac{1}{p} K(p) = \frac{R_2C_2}{1 + p(R_1C_1 + R_2C_2 + R_1C_2) + pR_1R_2C_1C_2}$$

V slovníku Laplaceových transformácií [3] nájdeme originál, t. j. prechodovú funkciu

$$f(t) = \frac{R_2C_2a}{\sqrt{1-b^2}} e^{-abt} \sin a\sqrt{1-b^2}t, \quad \text{kde} \quad a^2 = \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}$$

$$b = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{R_1C_1}{R_2C_2}} + \sqrt{\frac{R_2C_2}{R_1C_1}} + \sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}} \right)$$

4.11 Grafické zobrazovanie charakteristík

4.11.1 Normovanie [1], str. 136 – 142

Obvod z obr. 19 sa v praxi často používa s prvkami, pre parametre ktorých platí $R_1 = R_2 = R$ a $C_1 = C_2 = C$. Tým sa zjednodušia vzťahy na

$$K(j\omega) = \frac{j\omega RC}{1 - (\omega RC)^2 + 3j\omega RC} \quad Z_i = R \frac{1 - (\omega RC)^2 + 3j\omega RC}{2j\omega RC - (\omega RC)^2} \quad Z_o = R \frac{1 + j2\omega RC}{1 - (\omega RC)^2 + 3j\omega RC}$$

Nevýhodou pre grafické zobrazenie je, že pre iné hodnoty parametrov R a C treba nakresliť nový graf. Tu pomôže **normovanie**.

Výraz $1/RC$ má rozmer $[\omega]$ a jeho hodnota je určená hodnotami R a C . Označme *normovací* (vzťažný) kmitočet $\omega_0 = 1/RC$ a $\omega RC = \omega/\omega_0 = \Omega$. Ω nazveme *normovaný kmitočet*. Charakteristiky nadobudnú tvar

$$K(j\Omega) = \frac{j\Omega}{1 - \Omega^2 + 3j\Omega} \quad Z_i = R \frac{1 - \Omega^2 + 3j\Omega}{2j\Omega - \Omega^2} \quad Z_o = R \frac{1 + j2\Omega}{1 - \Omega^2 + 3j\Omega}$$

V normovaní môžeme pokračovať

$$\frac{Z_i}{R} = \frac{1 - \Omega^2 + 3j\Omega}{2j\Omega - \Omega^2} \quad \frac{Z_o}{R} = \frac{1 + j2\Omega}{1 - \Omega^2 + 3j\Omega}$$

Z normovaných veličín $K(j\Omega)$, Z_i/R , Z_o/R už žiadna nezávisí od hodnôt parametrov obvodu. Preto všetky obvody, ktoré sa líšia iba hodnotami parametrov prvkov budú mať jediný spoločný graf pre každú charakteristiku (obr. 24).

Poznámka: Ak by podmienky rovnosti pre R_1 , R_2 a C_1 , C_2 neboli splnené, môžeme vyjadriť $C_2 = kC_1$ a $R_2 = lR_1$. Normujúci kmitočet $\omega_0 = 1/R_1C_1 = kl/R_2C_2$ a $\omega/\omega_0 = \Omega$. Potom

$$K(j\Omega) = \frac{j\Omega kl}{1 - \Omega^2 kl + 3j\Omega(k + kl)} \quad Z_i = R \frac{1 - \Omega^2 kl + 3j\Omega(k + kl)}{j\Omega(1 + k) - \Omega^2 kl} \quad Z_o = R \frac{1 + j\Omega(1 + k)}{1 - \Omega^2 + 3j\Omega(k + kl)}$$

tiež nezávisia od hodnôt parametrov prvkov, ale od ich pomerov k a l . Takto sa dá započítať aj vplyv tolerancií hodnôt parametrov súčiastok.

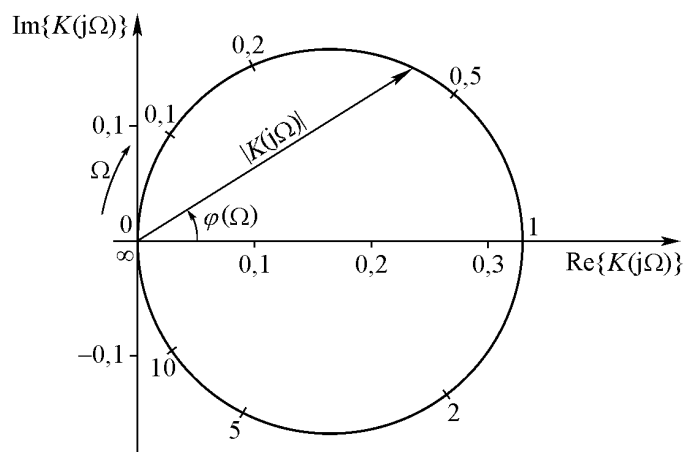
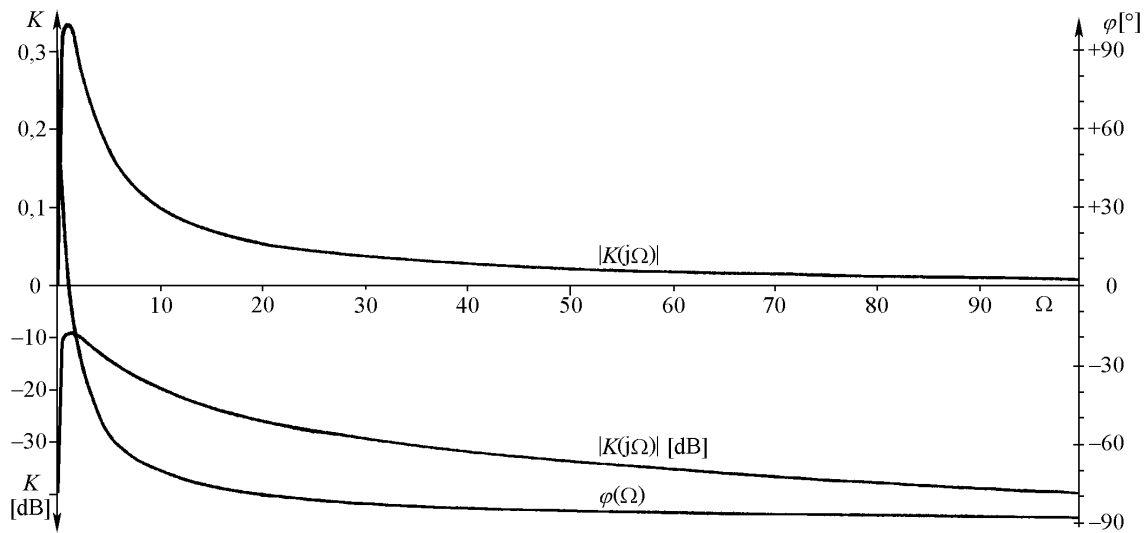
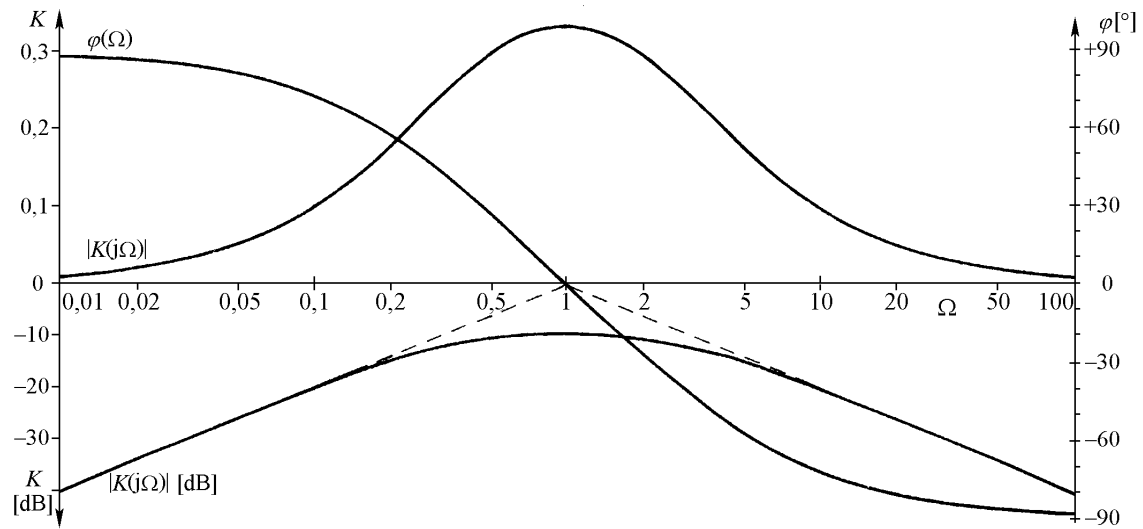
Normovacia hodnota býva volená podľa potrieb praxe alebo je dokonca daná záväzne normou (napr. prah počuteľnosti v akustike a pod.).

V prípade prechodových javov je užitočné čas normovať časovou konštantou a napätie napätím skoku U_0 .

4.11.2 Logaritmicke stupnice

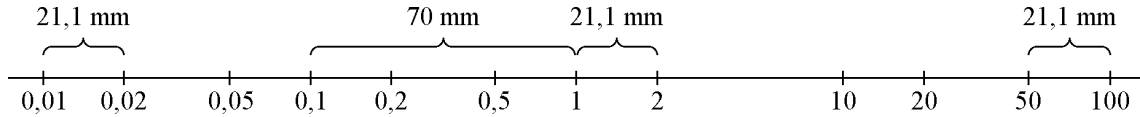
Grafy charakteristík dávajú často lepšiu predstavu o vlastnostiach vyšetovaných obvodov než ich strohé matematické modely. V praxi sa najčastejšie vyskytne potreba graficky zobraziť $|K(j\omega)|$ $\varphi(j\omega)$, $K(j\omega)$ resp. $|K(j\Omega)|$ $\varphi(j\Omega)$, $K(j\Omega)$.

Aby sme mohli posúdiť odozvu obvodu na všeobecný periodický signál, musíme poznať odozvy na veľký počet harmonických zložiek signálu. Preto sú v elektronike časté merania v širokom rozmedzí ($1 - 10^5$) pomerov číselných hodnôt veličín. V takom prípade je výhodné pri kreslení grafov voliť logaritmicke stupnice (obr. 24a).



Obr. 24a, b, c

Na príslušnú súradnú os nanášame úsečky s dĺžkou úmernou logaritmu číselnej hodnoty meranej veličiny. Napr. jednému rádu, t. j. hodnote 10, priradíme úsečku 70 mm dlhú. Číselná hodnota meranej veličiny nech je 2. $\text{Lg } 2 = 0,30103$, čomu zodpovedá úsečka dlhá $70 \text{ mm} \times 0,30103 \approx 21,1 \text{ mm}$ (obr. 25).



Obr. 25

Námahu s konštrukciou logaritmických stupníc si ušetríme zakúpením logaritmického papiera. Nie vždy ho však dostať a ešte k tomu so stupnicami v potrebnom rozsahu.

Často sa kreslia grafy tak, že sa používajú lineárne stupnice, ale do grafu sa vynáša nejaký násobok logaritmu normovanej veličiny. Pre logaritmy normovaných výkonov boli zavedené samostatné jednotky Bell a Neper.

Ak je meraný výkon P a vzťažný (normovací) výkon je P_0 , potom

$$F [\text{B}] = \lg(P/P_0) \quad \text{alebo} \quad F [\text{Neper}] = \ln(P/P_0).$$

Kvôli jemnejšiemu deleniu sa v praxi častejšie používa jednotka 1 dB (decibel) = 0,1 B.

Elektrický výkon je úmerný U^2 resp. I^2 , preto je v elektronike časté použitie jednotky dB aj na vyjadrenie pomeru napätí a prúdov, a teda aj napät'ového a prúdového prenosu $K(j\omega)$. Prenos $|K(j\omega)|$ vyjadrený v dB sa nazýva zisk.

$$F [\text{dB}] = 10\lg(P/P_0) = 20\lg(u/u_0) = 20\lg(I/I_0).$$

Prepínanie rozsahov na meracích prístrojoch býva veľmi často v skokoch po 10 dB, čomu zodpovedajú skoky v napät'ových (prúdových) rozsahoch $1 : \sqrt{10}$.

Úloha 5. Dva zosilňovače, prvý má zisk 23 dB, druhý 17 dB, sú zapojené v kaskáde (vstup druhého na výstup prvého). Aký je výsledný zisk, jednotlivé a celkové zosilnenia?

4.11.3 Poznámky ku grafickým zobrazeniam

Grafy charakteristík obvodu z obr. 19 pre $R_1 = R_2 = R$ a $C_1 = C_2 = C$ sú na obr. 24. Pre lineárnu stupnicu pre Ω je pre nás zaujímavá oblasť nahustená okolo bodu $\Omega = 1$. Pre logaritmickú stupnicu pre Ω sú grafy okolo tohto bodu pekne rozvinuté a prehľadné.

Transformáciou $\Omega \rightarrow 1/\Omega$ sa výraz pre $|K(j\Omega)|$ nezmení, preto je krivka pre $|K(j\Omega)|$ symetrická podľa priamky $\Omega = 1$; výraz pre $\varphi(\Omega)$ prejde na výraz $-\varphi(\Omega)$, preto je krivka bodovo symetrická so stredom symetrie v bode $\Omega = 1$. Krivka pre $20\log |K(j\Omega)|$ je symetrická podľa priamky $\Omega = 1$, asymptoty tejto krivky prechádzajú bodom $\Omega = 1$ a majú sklon $-20 \text{ dB/dekádu } \Omega$. Tieto vlastnosti zobrazení umožňujú urýchliť kreslenie grafov (Bodeho metóda [1], kap. 5.4).

Prenosová charakteristika je na obr. 24c zobrazená v Gaussovej rovine. Vyzerá elegantne – je to kružnica so stredom na reálnej ose a prechádza začiatkom súradnej sústavy a bodom $|K(j\Omega_c)| = 1/3$. Nevýhodou je nelineárna stupnica pre Ω pozdĺž kružnice. Dáva dobrý prehľad o tom, ako sa s Ω mení $|K(j\Omega)|$ a $\varphi(\Omega)$. Pre numerické výpočty, podobne ako všetky grafické metódy, je málo presná. Tu radšej volíme výpočty na počítači.

Pri meraní charakteristík je treba vopred zvážiť, čo chceme meraním dosiahnuť, a podľa toho meniť nezávisle premennú (v tomto prípade Ω). Na logaritmických stupniciach je dobré rozdeliť si interval pre jeden rád premennej na približne rovnaké úseky: Na obr. 24b je volené delenie približne na tretiny. $1/3 = \lg 2,154$, najbližšie celé číslo je 2. K $2/3$, čo je $\lg 4,62$ je najbližšie celé číslo 5. Charakteristiky potom meriame pre Ω rovné 1, 2, 5 s násobkom 10^n . Pri hustejšom delení sa zvykne interval deliť približne na šesťiny, čomu zodpovedajú hodnoty pre Ω : 1; 1,5; 2; 3; 5; 7 a ich násobky s 10^n .

Na hrubú orientáciu sa často udávajú hraničné hodnoty premenných, pri ktorých klesne prenášaný výkon na 1/2 alebo stúpne na dvojnásobok (body zlomu na Bodeho diagramoch). Tomu zodpovedá zmena pomerného výkonu o $\lg(1/2) = -0,30103 \approx -3$ dB. Zmeny normovacích napätí sú $1/\sqrt{2}$ a fázy 45° .

Ak si konštruujeme logaritmické stupnice sami, býva odčítavanie na nich trochu zdĺhavé.

Príklad: Obvod z obr. 19 je zostavený z $R_1 = R_2 = 22 \text{ k}\Omega$ a $C_1 = C_2 = 10 \text{ nF}$. $RC = 22 \cdot 10^3 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1} = 0,22 \text{ ms}$ a normovací kmitočet ($\omega_0 RC = 1$) $\omega_0 = 4545,46 \text{ rad/s}$ resp. $f_0 = \omega_0/2\pi = 723,23 \text{ Hz}$. Pri meraní nastavujeme generátor na príslušné násobky kmitočtu f_0 . Tento kmitočet je v tomto prípade kvázi-rezonančný. Na grafoch môžeme odčítať dolný Ω_d a horný Ω_h normovaný kmitočet, pri ktorom je $|\mathbf{K}(j\Omega_d)| = |\mathbf{K}(j\Omega_h)| = |\mathbf{K}(j1)|/\sqrt{2}$ resp. $\varphi(\Omega_d) = +45^\circ$ a $\varphi(\Omega_h) = -45^\circ$ resp. poklesy zisku $20\lg|\mathbf{K}(j\Omega_d)| = 20\lg|\mathbf{K}(j\Omega_h)| = 20\lg|\mathbf{K}(j1)| - 3 \text{ dB}$. Odčítame Ω_d , je od bodu $\Omega = 1$ o 21 mm vľavo a Ω_h je o 21 mm vpravo. Pretože je na súradnej osi vynášaná hodnota $\lg \Omega$ a jednému rádu prislúcha úsečka dlhá 40 mm, je $\lg \Omega_d = -21/40 = -0,525$, a teda $\Omega_d = 0,2986$ a $f_d = \Omega_d \cdot f_0 = 215,97 \text{ Hz}$. Podobne je $\lg \Omega_h = 0,525$, $\Omega_h = 3,35$ a $f_h = 2423,24 \text{ Hz}$.

5 ZÁKLADNÉ PRÍSTROJE V PRAKTIKU

5.1 Elektronické voltmetre [5]

Ručičkové meradlá majú malú citlivosť a striedavé voltmetre obvykle aj malú impedanciu, čo je príčinou nízkeho hraničného kmitočtu (≤ 10 kHz). Nad týmto kmitočtom je údaj striedavého voltmetra zaťažený veľkou chybou. Tieto nedostatky viedli ku konštrukcii elektronických voltmetrov.

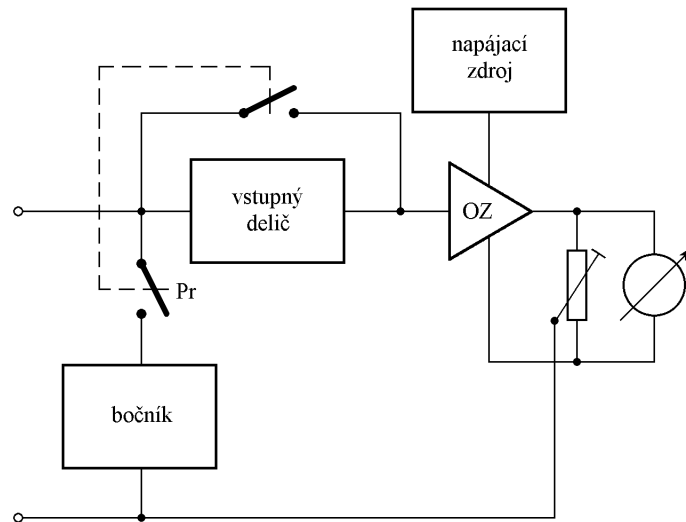
5.1.1 Jednosmerné elektronické voltmetre [5]

Jednoduchým riešením je použitie jednosmerného mostíka [5] B str. 20 – 57, v ktorom v dvoch susedných vetvách sú napäťovo riadené odporov (elektrónky, tranzistory). Merané napätie sa privedie na jeden z napäťovo závislých odporov. Odchýlku vyváženia mostíka indikuje ručičkové meradlo kalibrované na hodnotu vstupného napätia elektronického voltmetra. Použitím mostíkového zapojenia sa kompenzuje pokojový prúd napäťovo riadených odporov, ktorý by zbytočne znižoval merací rozsah ručičkového meradla.

Citlivosť takéhoto elektronického voltmetra je malá, merané napätia musia byť ≥ 1 V. Vlastnosti tohto zapojenia sa dajú o niečo zlepšiť, ak sa mostíku predradí diferenčný zosilňovací stupeň (kap. 9.1.4). Citlivosť sa dá takto zvýšiť 10 až 100-krát, ale toľkokrát sa zvýši aj citlivosť na rušivé napätia. Napájacie jednosmerné napätia elektronického voltmetra treba veľmi dobre stabilizovať, ale prístroju zostanú aj tak všetky necnosti jednosmerného zosilňovača (drift, tepelná nestabilita atď.).

Ďalšie zvýšenie citlivosti si vyžaduje použiť vysokokvalitný jednosmerný zosilňovač, alebo merané jednosmerné napätie vhodným modulátorom (napr. pre napätia ≈ 1 μ V elektromechanický vibrátor) premeniť na striedavé a to po zosilnení a detekcii merať [5] B str. 60 – 86. Pre napätia ≈ 1 mV možno použiť operačný zosilňovač v jednosmernom režime so silnou zápornou spätnou väzbou. Toto riešenie je aj cenovo prijateľné a kvalita prístroja vyhovuje bežným laboratórnym požiadavkám. Drobnými úpravami možno rozšíriť použitie prístroja na meranie elektrických prúdov, elektrických odporov a striedavých elektrických napätí.

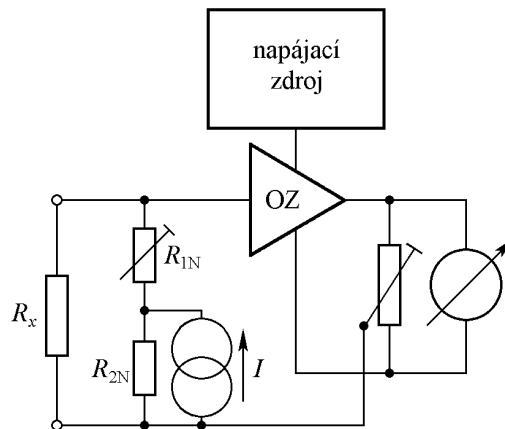
Bloková schéma na obr. 26 zobrazuje základné zapojenie jednosmerného elektronického voltmetra. Zmenou deliaceho pomeru spätnoväzbového deliča možno nastaviť základné zosilnenie merného zosilňovača (kap. 9.1.1) na správnu hodnotu (kalibrácia). Vstupným deličom sa upravuje merané napätie na veľkosť prijateľnú pre merný zosilňovač. Vlastnosti jednosmerného zosilňovača sa s časom pomaly menia, preto sa na výstupe zosilňovača môže objaviť napätie aj vtedy, ak merané napätie je nulové. Pomocnými obvodmi, ktoré sú vstavané do elektronického voltmetra, preto treba po zohriatí prístroja nastaviť „elektrické nulu“ a tú počas dlhodobejšieho merania kontrolovať.



Obr. 26

Vstupná impedancia jednosmerného elektronického voltmetra býva paralelná kombinácia odporu (1 až 100) M Ω s kondenzátorom (10 až 50) nF.

Prípojením bočníka vypínačom Pr a súčasným vyradením vstupného deliča sa zmení voltmeter na jednosmerný ampérmeter. Prúd sa meria nepriamo – meraním napätia na kalibrovaných odporoch bočníka.

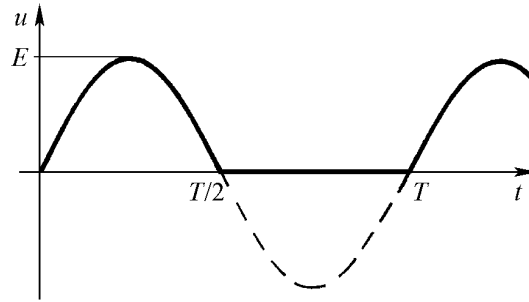


Obr. 27

Úpravou podľa obr. 27, kde R_{1N} a R_{2N} sú odporové normály, možno elektronický voltmeter použiť na meranie elektrických odporov R_x . Zdroj prúdu I vytvorí na odpore R_{2N} napätie, ktoré je deličom R_x , R_{1N} upravené na hodnotu úmernú veľkosti odporu R_x a toto je merané elektronickým voltmetrom. Rozsah ohmometra sa mení zmenou R_{1N} . V dôsledku mechanickej zotrvačnosti mechanickeho systému deprézského ručičkového meradla jednosmerný elektronický voltmeter meria strednú hodnotu napätia privedeného na vstup. Nech merané napätie je napr. ideálne jednocestne usmernené harmonické napätie (obr. 28). Stredná hodnota tohto napätia za jednu periódu je

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} E \sin \omega t dt + 0 = -\frac{E}{\omega T} \cos \omega t \Big|_0^{T/2} = -\frac{E}{2\pi} (\cos \pi - \cos 0) = \frac{E}{\pi}.$$

Toto napätie elektronický voltmeter meria aj registruje (ukazuje).



Obr. 28

Úloha 6. Vypočítajte strednú hodnotu dvojcestne ideálne usmerneného harmonického napätia za dobu rovnú celistvému násobku periódy.



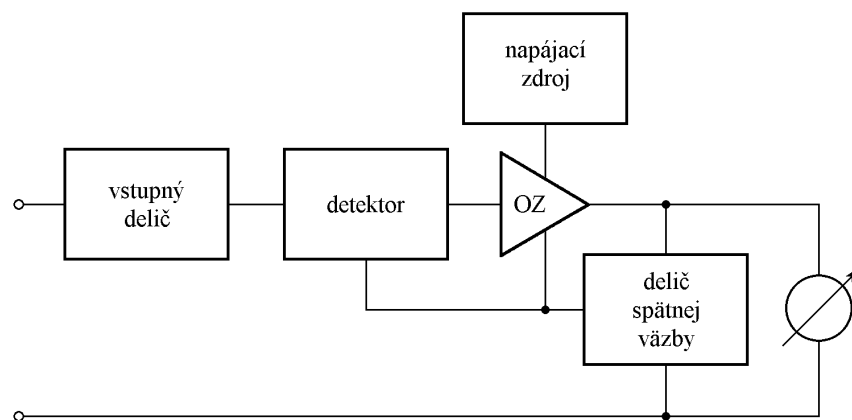
Obr. 29

V praxi budete používať prístroj DT830B (obr. 29). Jeho presnosť je $\pm 0,5\%$ z nameranej hodnoty a ± 2 digity (zmena poslednej cifry displeja) pre jednosmerné napätia, $\pm 1\%$ a ± 2 digity pre jednosmerné prúdy, $\pm 1,2\%$ a ± 2 digity pre striedavé napätie (45 Hz až 400 Hz), $\pm 0,8\%$ a ± 2 digity pre odpory do $2\text{ M}\Omega$, $\pm 1\%$ a ± 2 digity pre odpory nad $2\text{ M}\Omega$.

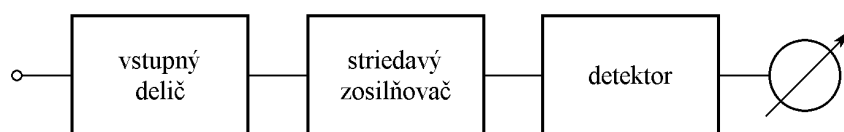
5.1.2 Striedavé elektronické voltmetre [5] C; [6] 4c

Úpravou zapojenia jednosmerného elektronického voltmetra (obr. 30) získame elektronický voltmeter, ktorý meria striedavé napätia. Kmitočtový rozsah určuje použitý detektor. Bez vysokých

nárokov na použité súčiastky sa dá vyrobiť voltmeter so šírkou pásma 0 – 5 MHz. S použitím kompenzačného zapojenia a vhodným výberom detekčných diód sa dá rozšíriť kmitočtový rozsah až do 1 200 MHz. Menej náročné zapojenia nepotrebujú vysokokvalitný operačný zosilňovač, ale používajú zapojenie podľa obr. 31.



Obr. 30



Obr. 31

Takto zapojený voltmeter budete používať v praxi. Vstupná impedancia striedavých elektronických voltmetrov býva paralelná kombinácia odporu (1 – 10) MΩ. a kondenzátorom a kapacitou (1 – 50) pF. Kmitočtový rozsah býva spravidla od 10 Hz po 1 – 10 MHz.

Vstupné deliče delia vstupné napätie obyčajne skokom po 10 dB (t. j. 1 : √10). Základom býva 1 V, pretože √10 = 3,16, bývajú na meradle dve stupnice s rozsahmi (0 – 3,16) a (0 – 10). Napäťové rozsahy sú obvykle 1 mV – 300 V.

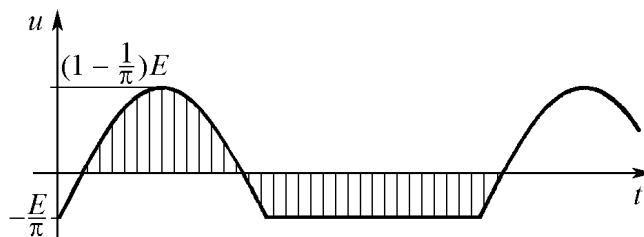
Vplyvom rôznych rušivých napätí môže striedavý elektronický voltmeter ukazovať malú výchylku aj pri skrate vstupu voltmetra. Táto výchylka sa dá odstrániť iba starostlivým tienením obvodov samotného prístroja. Nastavenie elektrickej nuly neprichádza teda do úvahy. Ak výchylka meradla prístroja presahuje výrobcom stanovenú veľkosť (obvykle prvá ryska stupnice) ide o poruchu prístroja.

Hodnota, ktorú ukazuje striedavý elektronický voltmeter, si vyžaduje bližšie vysvetlenie. Zosilňovač voltmetra býva od vstupu, alebo od kmitočtovo kompenzovaného vstupného deliča, oddelený kondenzátorom s kapacitou (30 – 100) nF, ktorý odfiltráva jednosmernú zložku meraného napätia. Ak je detektor lineárny, tak voltmeter meria **strednú absolútnu hodnotu**

$$|\bar{u}| = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$

striedavého napätia. V každom prípade však býva kalibrovaný na *efektívnu hodnotu harmonického napätia*. Preto je dôležité uvedomiť si už pred meraním, aký **tvár** má merané striedavé napätie, a čo vlastne meria, a čo ukazuje použitý voltmeter. Jestvujú elektronické voltmetre, ktoré merajú skutočne efektívnu hodnotu napätia, také, ktoré merajú maximálnu hodnotu napätie alebo jeho rozkmit atď.

Striedavé elektronické voltmetre použité v praktiku merajú strednú absolútnu hodnotu striedavého napätia a sú kalibrované na efektívnu hodnotu harmonického napätia. S trochou počítania vieme z osciloskopického zobrazenia určiť čo má voltmeter ukazovať, resp. z údaju voltmetra známeho tvaru napätia vieme určiť maximálnu hodnotu meraného striedavého napätia a z nej okamžité hodnoty napätia v daných časoch.



Obr. 32

Nech má merané napätie tvar z obr. 28. Je to napätie pulzujúce, z ktorého striedavý voltmeter odfiltruje jednosmernú zložku, t. j. strednú hodnotu rovnú E/π . Striedavá zložka má tvar z obr. 32 (šrafovaná plocha), s ktorým vstupuje na detektor. Je to striedavé napätie, preto sú šrafované plochy rovnako veľké (kap. 4.5). Voltmeter meria

$$\overline{|u|} = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} E \left(\sin \omega t - \frac{1}{\pi} \right) dt.$$

Po substitúcii $x = \omega t$ je

$$\overline{|u|} = \frac{2E}{\omega T} \int_{x_1}^{\pi-x_1} E \left(\sin x - \frac{1}{\pi} \right) dx = \frac{E}{\pi} \left(2 \cos x_1 + \frac{2x_1}{\pi} - 1 \right).$$

Výpočtom je pre $\cos x_1 = \sqrt{1 - \sin^2 x_1} = \sqrt{1 - 1/\pi^2} = \sqrt{\pi^2 - 1}/\pi$. Po dosadení je

$$\overline{|u|} = \frac{E}{\pi} \frac{2}{\pi} \left(\sqrt{\pi^2 - 1} + \arcsin \frac{1}{\pi} - \frac{\pi}{2} \right) \approx \frac{E}{\pi} 1,102 \approx 0,351 E.$$

To je hodnota, ktorú nameria striedavý voltmeter s lineárnym detektorom. Kalibrovaný je ale na efektívnu hodnotu harmonického napätia, preto bude údaj meradla iný. Aby sme mohli určiť čo ukáže meradlo voltmetra, musíme výpočet zopakovať pre harmonické napätie $u = E \sin \omega t$:

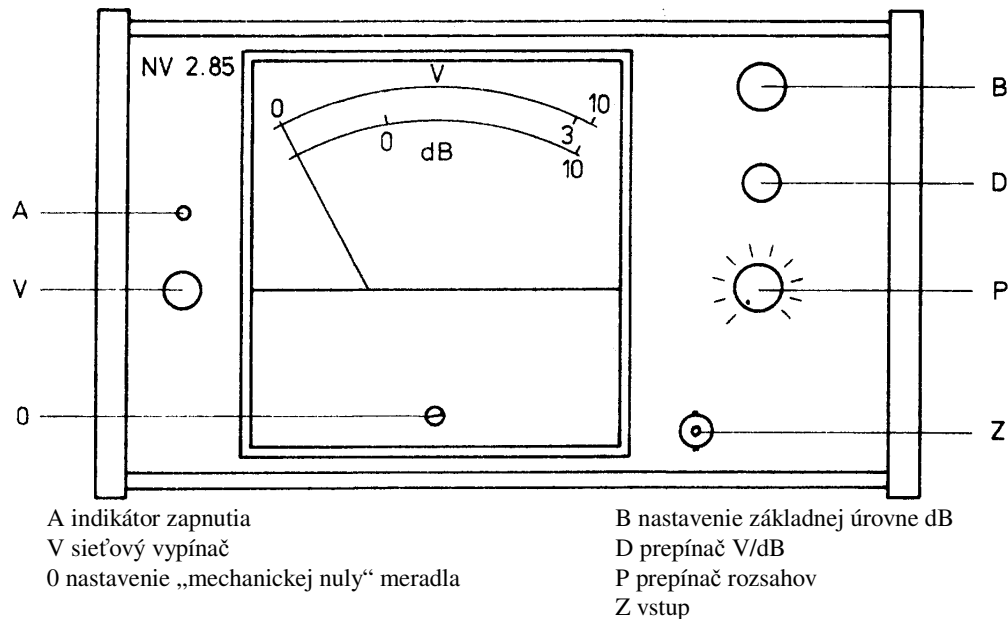
$$\overline{u} = 0$$

$$\overline{|u|} = \frac{2E}{\pi} \text{ voltmeter meria}$$

$$u_{\text{ef}} = \frac{E}{\sqrt{2}} \text{ voltmeter ukazuje}$$

Podiel údaju meradla voltmetra a nameranej strednej absolútnej hodnoty je

$$\frac{u_{\text{ef}}}{\overline{|u|}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,111$$



Obr. 33

V prípade jednocestne ideálne usmerneného napätia (harmonického) ukáže meradlo hodnotu $0,351 E \cdot 1,111 = 0,39 E$. Ak elektronický voltmeter pri meraní jednocestne usmerneného harmonického napätia ukáže hodnotu U , je amplitúda usmerňovaného napätia $E = 2,564 U$.

V praktiku budete používať prístroj NV 2.85 (obr. 33).

Vlastnosti:

- rozsahy: 3, 10, 30, 100, 300 mV
1, 3, 10, 30, 100 V
- vstupná impedancia: $1 \text{ M}\Omega \parallel 30 \text{ pF}$
- kmitočtový rozsah: 10 Hz až 1 MHz
- presnosť: $\pm 3 \%$ v intervale 10 Hz až 200 kHz
 $\pm 5 \%$ v intervale 200 kHz až 1 MHz
Na rozsahoch 30 a 100 V nad 100 kHz nie je zaručená
- rušivé napätia: cca 15 mV

Meranie – postup:

1. Skontrolujte pri **vypnutom** prístroji polohu ručičky meradla. Ak treba, nastavte „mechanickú nulu“. Nikdy to nerobte po zapnutí prístroja.
2. Tlačidlo D vypnite (má byť vysunuté) a prístroj zapnite vypínačom V.
3. Po jednej minúte je prístroj pripravený k meraniu. Nastavte prepínačom P vhodný rozsah. Z hľadiska ochrany prístroja je dobré nastaviť pred zapnutím rozsah 100 V a po pripojení meraného napätia znižovať rozsah podľa potreby, aby výchylka bola v poslednej tretine stupnice.
4. Merané napätie privediete na konektor Z a prepínačom P nastavíte vhodný rozsah.
5. Ak chcete výsledky meraní v dB, začnite bodom 1. Potom nastavte prepínač P na rozsah 100 V a zapnite prístroj vypínačom V. Zapnite tlačidlo D a normovacie napätie privedte na konektor Z. Prepínačom P nastavte rozsah tak, aby výchylka bola čo najbližšie ryske 0 dB. Gombíkom B nastavte výchylku presne na 0 dB. Prepínač P prepína v tomto režime rozsahy o $\pm n \times 10$ dB, preto meraná veličina má hodnotu = výchylka + $n \times 10$ dB.

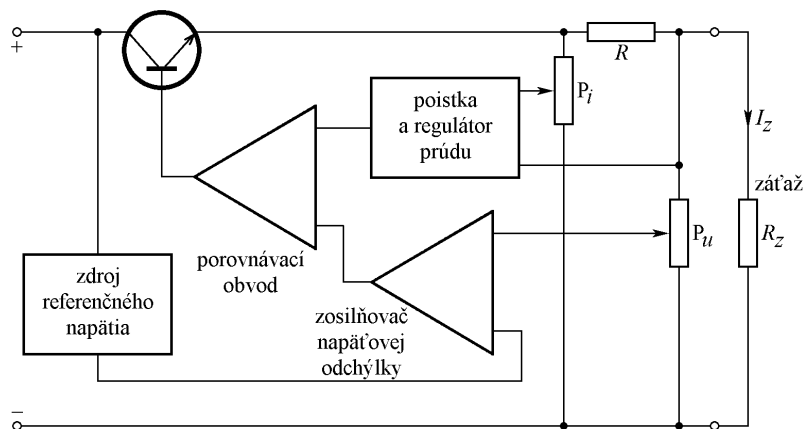
5.2 Zdroje

5.2.1 Napájacie jednosmerné zdroje

V praxi musia zdroje energie spĺňať mnoho rôznorodých požiadaviek. V praktiku budeme požadovať od zdroja energie, aby:

- nevnašal rôzne nežiaduce napätia, ktoré by mohli ovplyvňovať signál. Teda má mať malé zvlnenie a čo najmenšie hluky a šумы naložené na výstupné napätie,
- mal dobrú stabilitu, teda bol odolný voči meniacej sa záťaži a kolísaniu sieťového napätia,
- pri zapnutí a vypnutí výstupné napätie neprekmitávalo nad nominálnou hodnotou,
- mal rýchlu elektronickú poistku, ktorá chráni zdroj aj spotrebič pred prípadnými následkami nepozornosti experimentátora, alebo náhodnými skratmi.

Všetky tieto vlastnosti sa dajú dosiahnuť elektronicky stabilizovaným zdrojom elektrickej energie. Bloková schéma je na obr. 34.



Obr.34

Regulačný tranzistor pracuje ako emitorový sledovač (kap. 10.2). Prúd jeho bázy ovláda zosilňovač napät'ovej odchýlky medzi výstupným a referenčným (vysoko stabilným) napätím. Bázový prúd sa automaticky upravuje tak, aby napät'ová odchýlka bola nulová. Vtedy zdroj pracuje ako zdroj napätia. Jeho výstupné napätie je stále a jeho veľkosť sa dá meniť potenciometrom P_U . To platí dovtedy, kým prúd do záťaže nepresiahne hodnotu nastavenú regulátorom prúdu P_I . Spád napätia na odpore R vyvolaný prúdom I_z do záťaže vyhodnocuje obvod elektronickej poistky. Ak napätie na odpore R stúpne (vzrastie prúd do záťaže) nad hodnotu nastavenú regulátorom prúdu, je bázový prúd regulačného tranzistora ovládaný tak, aby výstupný prúd bol konštantný a rovný nastavenej hodnote. Zdroj pracuje ako zdroj prúdu. V praktiku budete používať prístroj SZ 3.81 (obr. 35).

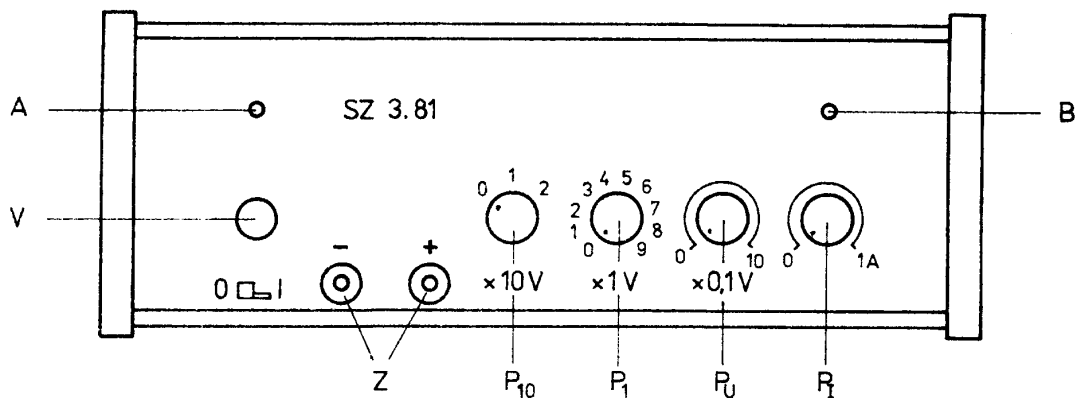
Vlastnosti:

- výstupné napätie: 0 až 30 V regulovateľné v skokoch 2×10 V; 9×1 V; plynule 0 – 1 V
- presnosť: lepšia ako ± 1 % z nastavenej hodnoty (plynulý regulátor P_U nastavený na 0 V)
- výstupný prúd: 10 mA až 1 A plynule nastaviteľný
- poruchové napätia: $\leq 2,8$ mV_{ss} na výstupe
- odozva na skokovú zmenu prúdu z 0 na 1 A pre výstupné napätie 5 V: prekmit je menší ako 15 mV_{ss}
- výstupný odpor zdroja: 35 m Ω pri 5 V a 1 A
- stabilita výstupného napätia pri 5 V a 1 A: 5 mV pri zmene sieťového napätia o +10 V, -15 V.

Postup pri používaní:

1. Všetky prepínače a regulátory nastavte do polohy 0.
2. Zapnite zdroj vypínačom V.

3. Pripojte záťaž a prepínačmi P_1 a P_{10} nastavte požadované napätie.
 4. Regulátorom P_1 nastavte elektronickú poistku tak, aby práve vypla.
 5. Pri presnejšom nastavovaní výstupného napätia regulátorom P_U použite vonkajší voltmeter.
- Pri úlohách s operačnými zosilňovačmi budete zapájať dva zdroje SZ 3.81 do série za sebou (+ svorka prvého s – svorkou druhého), čím získate napätie $\pm U$ proti spoločnej svorku.
- Zdroje budete mať **zapnuté len pri meraní obvodov**. Inak budú vypnuté a ich **zapnutie je podmienené súhlasom učiteľa**.



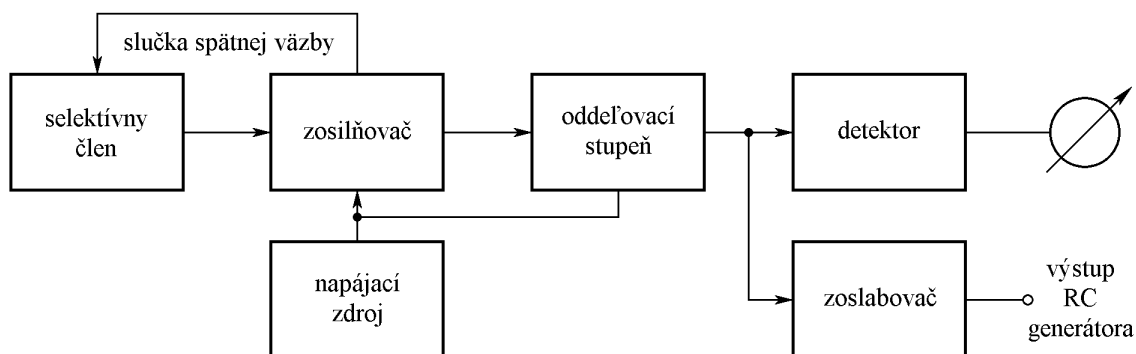
A indikátor zapnutia
 B indikátor činnosti elektronickej poistky
 V sieťový vypínač
 Z výstupné svorky

P_{10} prepínač výstupného napätia skokom po 10 V
 P prepínač výstupného napätia skokom po 1 V
 P_U plynutý regulátor výstupného napätia. 0 – 1 V
 P_1 poistka, plynuté obmedzenie prúdu 0,01 – 1 A

Obr. 35

5.2.2 Zdroje signálu

Zdrojom harmonického signálu s kmitočtom do 1 MHz býva RC generátor, ktorého bloková schéma je na obr. 36.



Obr. 36

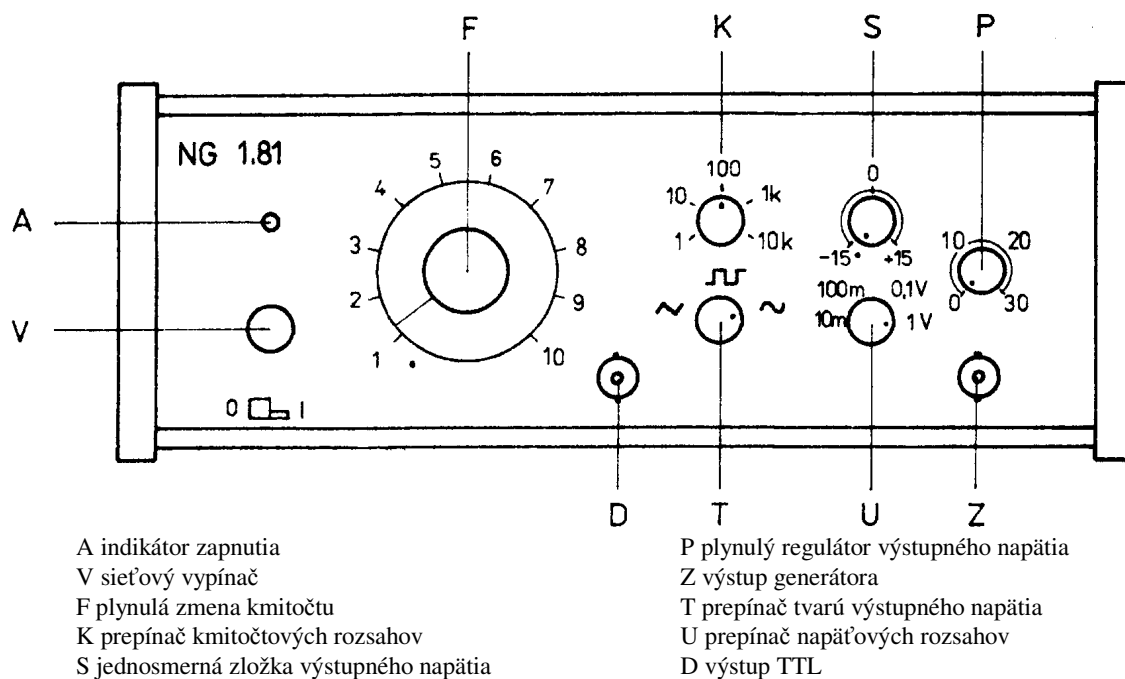
Selektívny člen (napr. Wienov delič, premostený alebo dvojité T článok) tvoria odpory R a kondenzátory C a je zapojený do slučky kladnej spätnej väzby širokopásmového zosilňovača [6] str. 355 – 360. Tým sa z tohto zapojenia stáva oscilátor, ktorý generuje harmonické napätie s kmitočtom určeným nastavenými hodnotami parametrov R a C . Hodnoty R a C sa obvykle dajú meniť skokom i jemne, čo umožňuje zmenu kmitočtu. Skoková zmena kmitočtu býva v skokoch 1 : 10, plynulá spojito v intervale $\langle f_0, 10f_0 \rangle$.

Oddeľovací stupeň zosilňuje napätie oscilátora a súčasne oddeľuje oscilátor od vplyvov zmien zoslabovača a záťaže na výstupe zoslabovača. Tým je zaistená stabilita kmitočtu aj amplitúdy napätia oscilátora. Oddeľovací stupeň obvykle umožňuje nastaviť na svojom výstupe napätie spojitou (efektívne hodnoty napätí) od 0 V po 3 až 10 V.

Napätie nastavené na výstupe oddeľovača je privádzané cez zoslabovač na výstup RC generátora. Zoslabovač je kmitočtovo nezávislý delič napätia, ktorým skokmi (obvykle po 10 dB) možno meniť napätie na výstupe RC generátora a dodržať pritom jeho konštantný výstupný odpor, ktorý býva 20 – 600 Ω .

Výstupné napätie oddeľovača je privádzané aj na detektor a po usmernení je merané ručičkovým meradlom. Tento vstavaný striedavý elektronický voltmeter je kalibrovaný na efektívnu hodnotu harmonického napätia. Meradlo má dve stupnice e rozsahmi v pomere $\sqrt{10} : 10$, čo umožňuje z údajov meradla a stupňa zoslabenia odčítať priamo veľkosť výstupného napätia RC generátora. Takto sú konštruované generátory BM 344 a BM 534, s ktorými sa môžete stretnúť v praktiku.

V praktiku budete potrebovať aj generátory napätia iných tvarov ako harmonického. Budete preto používať generátor NG 1.81 (obr. 37), ktorý sa síce tiež nazýva RC generátor, ale princíp jeho činnosti je iný – vysvetlený je v úlohe „Generátory tvarových priebehov“, kap. 9.2.4. Tento generátor produkuje napätie obdĺžnikové a trojuholníkové. Trojuholníkové napätie sa v nelineárnom obvode s elektrickým poľom riadeným tranzistorom tvarovo upravuje na napätie veľmi podobné harmonickému. Skreslenie (teda „odchýlka“ od harmonického priebehu) generátora NG 1.81 v režime harmonického striedavého napätia je menšie ako 3 %. Na väčšinu meraní v praktiku tento generátor plne postačuje.



Obr. 37

Vlastnosti:

- kmitočtový rozsah: 1 Hz až 100 kHz meniteľný v skokoch 1; 10; 100; 1 k; 10 k plynulo v rozsahu 1 : 10
- výstupné napätie : 0 až 30 V_{SS} (medzivrcholové) meniteľné v skokoch 1 mV, 10 mV, 100 mV, 1 V plynulo v rozsahu (0 – 30) krát; jednosmerná úroveň buď vypnutá (gombík S) alebo plynulo nastaviteľná od –15 do +15 V
- výstupný odpor: 75 Ω
- skreslenie: $\leq 3\%$ pre 1 Hz až 20 kHz

- stabilita výstupného napätia pri preladovaní:
 - $\pm 2 \%$ pre 1 Hz až 20 kHz;
 - $\pm 5 \%$ pre 30 kHz až 100 kHz
- výstupné napätie TTL pri záťaži 5 vstupov TTL:
 - H 2,4 V
 - L 0,4 V
- izolačná pevnosť 100 V.

Postup pri používaní:

1. Plynulý regulátor napätia (gombík P) nastavte do polohy 0.
2. Regulátor jednosmernej úrovne výstupného napätia (gombík S) dajte do polohy 0 alebo úplne vypnite.
3. Zapnite prístroj vypínačom V.
4. Asi po jednej minúte pripojte na požadovaný výstup (najčastejšie svorka Z) skúmaný obvod a ovládacími prvkami F, K, T, U nastavte požadovaný tvar, kmitočet a veľkosť výstupného napätia. Na presnejšie určenie napätia a kmitočtu treba použiť presný kmitomer a voltmeter.

5.3 Osciloskop [6] kap. 6

Osciloskop je najvšestrannejší elektronický merací prístroj, ktorý možno použiť vo všetkých odboch, ktoré súvisia s meraním.

Osciloskop zobrazuje výchylkou svietiaceho bodu na tienidle obrazovky okamžitú hodnotu napätia privedeného na jeho vstup. Najčastejšie sa používa na zobrazenie v kartézskej súradnej sústave, a to funkcionálnych závislostí dvoch napätí. Ak sa použijú vhodné prevodníky fyzikálnych veličín na elektrické napätie, možno osciloskopom zobraziť priebehy vyjadrujúce skutočné chovanie sa fyzikálnych sústav.

5.3.1 Obrazovka

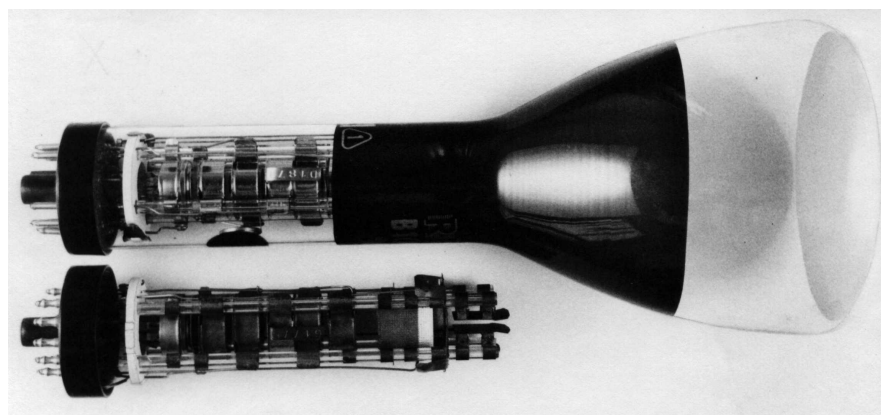
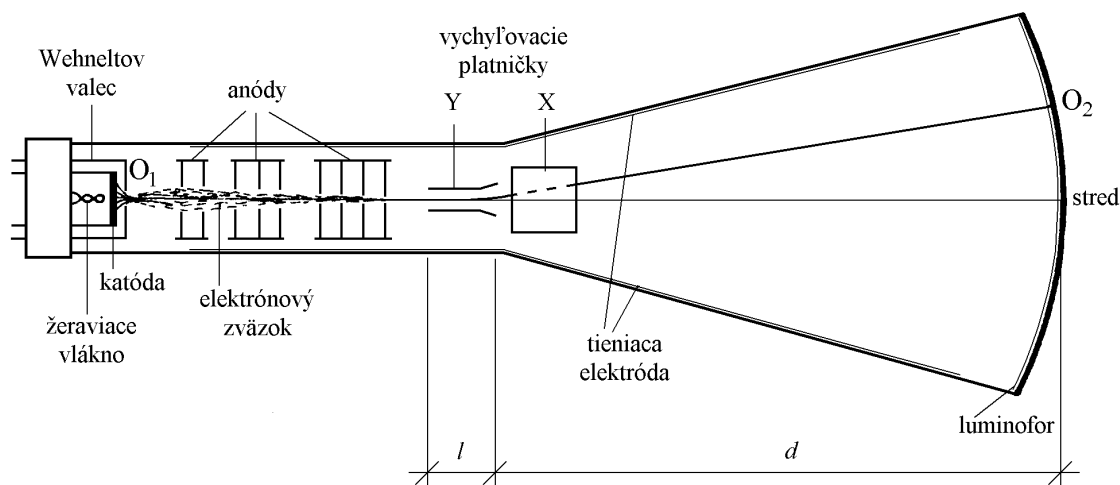
Základom osciloskopu je obrazovka (obr. 38).

Zobrazenie sa deje pomocou elektrónov, ktoré pri dopade na tienidlo obrazovky pokryté zvnútra vrstvou fluorescenčnej látky vyvolávajú svetelné efekty. Elektróny sa uvoľňujú termoemisiou z katódy. Katóda je vložená do kovového valca (Wehneltovho) s malým otvorom v osi obrazovky. Napätím Wehneltovho valca oproti katóde (U_g) sa dá ovládať množstvo elektrónov; ktoré postupujú ďalej od obrazovky, a tým sa ovláda intenzita svetelného efektu – **jas**. Súčasne sa napätím U_g sústreďujú elektróny do úzkeho zväzku (bod O_1 na obr. 38).

Elektróny sa v úzkom zväzku neudržia dlho. Pôsobením elektrostatických síl medzi nimi sa začne zväzok rozširovať. Aby dopadli elektróny na malú plošku tienidla (bod O_2), treba ich zväzok zužovať – fokusovať. Súčasným urýchlením sa skráti doba ich vzájomného pôsobenia a zvýši sa aj ich počet dopadajúci za jednotku času na tienidlo – stúpne jas. Obe funkcie obstaráva elektrónová optika. Z optického hradiska zobrazuje bod O_1 do bodu O_2 . Elektrónová optika pozostáva z viacerých súborov kovových valcov a diskov s otvormi na osi obrazovky – *anód*. Vhodným nastavením anódových napätí U_a sa dosahuje správne zaostrenie elektrónového zväzku, jas a citlivosť obrazovky.

Napätia U_a sú rádovo kV, napätie $U_g \approx 10$ V. Ľahšie sa mení jas zmenou U_g , a tým sa však mení aj poloha bodu O_1 , preto sa so zmenou jasu mení aj ostrosť obrazu. Po zmene jasu treba teda znovu zaostriť stopu na tienidle.

Ostrosť stopy ovplyvňujú aj vonkajšie elektromagnetické polia. Na zníženie vplyvu týchto rušivých polí sa na vnútorný povrch obrazovky nanáša vodivá vrstva – *tieniaca elektróda*, ktorá má elektrický potenciál poslednej anódy. Celá obrazovka sa ešte vkladá do tieniaceho krytu, ktorý znižuje vplyvy rušivých elektrických aj magnetických polí.



Obr. 38

Elektróny, ktoré dopadnú na tienidlo a zostanú na ňom, nabíjajú ho záporným nábojom, ktorý elektrónový zväzok brzdí, rozostručuje a neregulovateľne vychyľuje. Preto treba dopadajúce elektróny z tienidla odstraňovať. Využíva sa na to sekundárna emisia z fluorescenčného materiálu tienidla. Sekundárne elektróny zachytí tieniaca elektróda.

5.3.2 Citlivosť

Na vychyľovanie elektrónového lúča sa používajú v osciloskopických obrazovkách dve navzájom kolmé dvojice rovnobežných kovových platničiek. Zmenou potenciálu jednej platničky voči druhej je elektrónový lúč vychyľovaný. Elektrické pole medzi platničkami nie je radiálne, preto okrem vychyľovania je elektrónový zväzok aj rozostrovaný, a to v smere poľa. Takúto chybu zaostrenia volajú optici *kóma*. Rozostrenie zväzku je rôzne v rôznych smeroch, čo je ďalšia optická chyba – *astigmatizmus*. Obe chyby sa dajú znížiť tým, že potenciál platničiek sa mení *antisymetricky* voči potenciálu v osi obrazovky.

Citlivosť obrazovky je výchylka stopy na tienidle spôsobená napätím 1 V na vychyľovacích platničkách. Ak je vzdialenosť platničiek (v jednej dvojici) Δ , tak citlivosť obrazovky (rozmary podľa obr. 38) je

$$c_{\text{stat}} = \frac{1}{2} \frac{l}{U_a \Delta} \left(d + \frac{l}{2} \right)$$

Toto je *statická citlivosť* platná pre jednosmerné vychyľovacie napätie. Keď sa vychyľovacie napätie s časom mení, tak sa mení aj citlivosť, pretože vychyľovacia sila pôsobiaca na elektrónový zväzok je premenná (aj v čase, aj pozdĺž dĺžky vychyľovacích platničiek). Podiel statickej a dynamickej citlivosti je

$$\frac{c_{\text{dyn}}}{c_{\text{stat}}} \sim \frac{\sin \omega t_p / 2}{\omega t_p / 2}$$

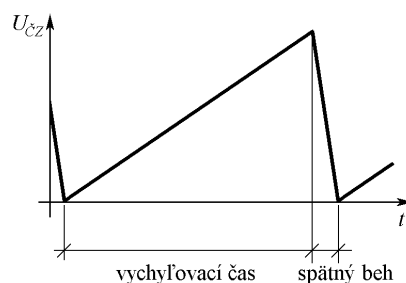
kde t_p je čas, za ktorý elektrón preletí medzi vychyľovacími platničkami a ω je kruhový kmitočet vychyľovacieho napätia.

5.3.3 Zosilňovače

Statická citlivosť osciloskopických obrazoviek býva 0,1 – 1 mm/V, čo je málo na bežné merania v elektronike: Citlivosť sa dá zvýšiť použitím zosilňovača napätia. Nároky na zosilňovače pre osciloscropy sú veľmi vysoké. Majú byť jednosmerne viazané, stabilné, s definovaným zosilnením, veľkou šírkou kmitočtového pásma a dobrou prechodovou charakteristikou. V súčasnosti sa stavajú zosilňovače antisymetrické so stupňovitou zmenou zosilnenia v skokoch 1:2:5 (a násobky pomerov s 10^n) a jemnou reguláciou v rozsahu skoku. V jednej krajnej polohe jemného regulátora zosilnenia je zosilnenie kalibrované [V/cm]. Zosilňovače pre obe dvojice (X aj Y) vychyľovacích platničiek musia byť v celom kmitočtovom rozsahu fázovo vyrovnané.

5.3.4 Časová základňa

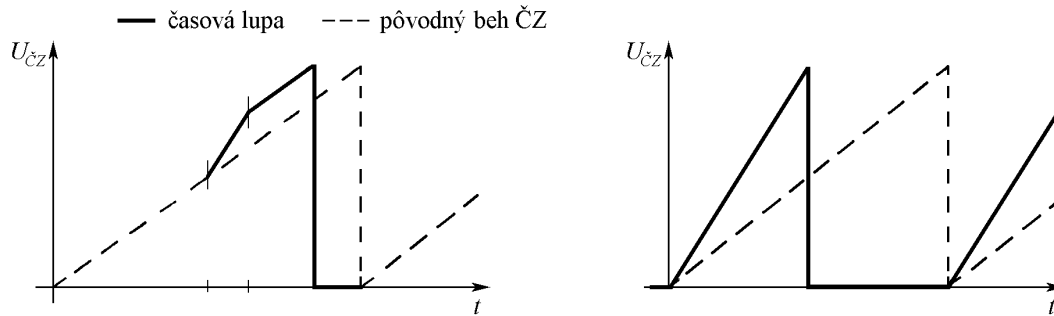
Najčastejšie sa skúmajú fyzikálne deje závislé od času. Vychyľovacie napätie vo vodorovnom smere sa preto volí lineárne závislé od času. Zobrazený priebeh je potom časovým rozvojom meranej veličiny. Generátory takéhoto vychyľovacieho napätia sú vstavané priamo do osciloskopu a nazývajú sa *generátory časovej základne*. Súčasné generátory časovej základne využívajú nabíjanie kondenzátora zo zdroja konštantného prúdu, čím sa dosahuje výborná linearita.



Obr. 39

Požadovaný priebeh napätia lineárnej časovej základne má tvar píly (obr. 39). Spätný beh trvá konečnú dobu; podmienkou je, aby bol podstatne kratší, než je najkratšia vychyľovacia doba. Impulzom odvodeným od spätného behu je ovládané napätie Wehneltovho valca tak, aby pri spätnom behu bol jas nulový – zatemní sa stopa (zatemňovací impulz). Strmosť pílového napätia časovej základne sa obvyklé mení skokom tak; aby sa vychyľovacie rýchlosti menili skokom v pomeroch 1:2:5 (niekedy 1:3:10) a násobkoch pomerov s 10^n . V rozsahu stupňa býva jemné regulácia a v jednej polohe jemného regulátora býva beh časovej základne kalibrovaný [s/cm].

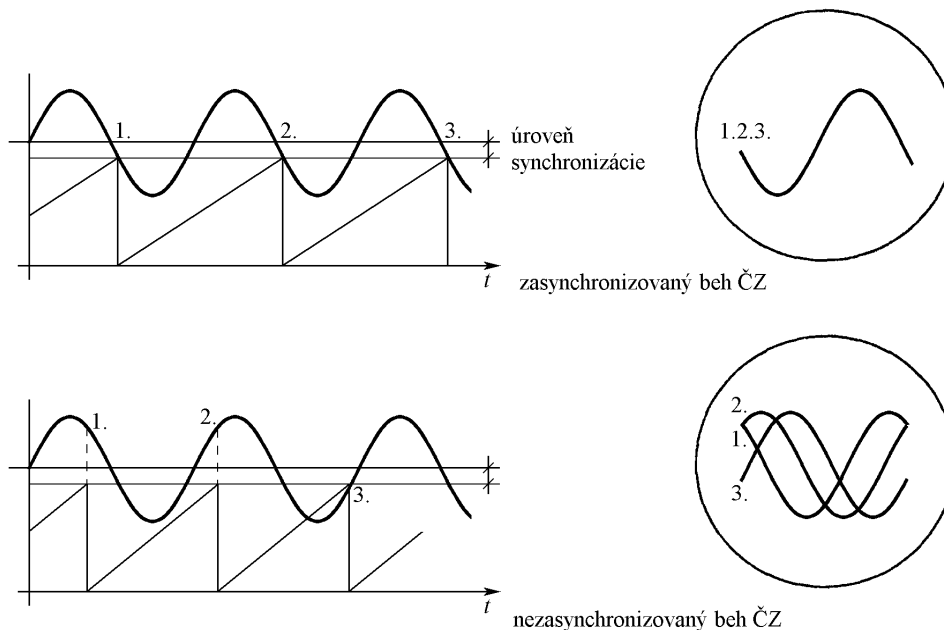
Niekedy je zaujímavá len malá časť celého priebehu. Je dobré upraviť beh časovej základne tak, aby sa zobrazila iba zaujímavá časť. Táto „časová lupa“ sa robí úpravou pílového napätia podľa obr. 40a. Vychýľovacie napätie rastie strmšie, lúč je vychýľovaný rýchlejšie, preto sa „vyznačená časť obrazu“ vo vodorovnom smere rozťahne. Často sa v osciloskope prepína iba rýchlosť behu časovej základne skokom 5× alebo 10× alebo plynule s kalibráciou v jednej krajnej polohe nastavovacieho prvku (obr. 40b), a tým sa zobrazuje signál „zväčšený“. Táto úprava (MAG) sa tiež (nesprávne) nazýva časová lupa.



Obr. 40

5.3.5 Synchronizácia

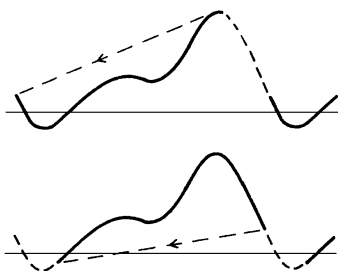
Aby sa dal časový priebeh signálu zobrazit' pozorovateľne, musí každý nový priebeh časovej základne začínať v tej istej fáze signálu (obr. 41). Pomer kmitočtu signálu a časovej základne musí byť celé číslo. Pri malých rozdieloch obraz „uteká“, pri veľkých je tienidlo pokryté chaotickou zmesou. Treba preto časovú základňu synchronizovať.



Obr. 41

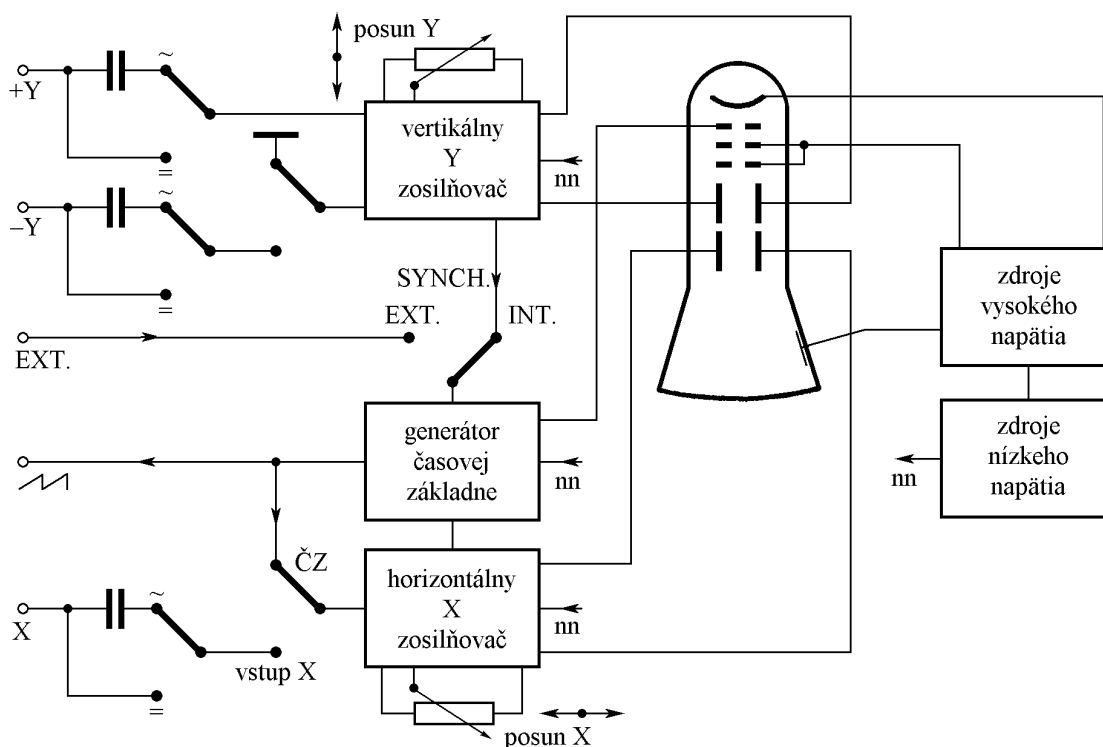
Spôsobov a typov synchronizácie je viacero. Najčastejšia je vnútorná (INT), pri ktorej sa z vhodného miesta Y zosilňovača privedie časť meraného napätia signálu do obvodu časovej základne a upravuje začiatok nabíjania pracovného kondenzátora časovej základne. Citlivosť k synchronizácii rastie

s približovaním sa ku koncu vychýľovacieho píllového napätia. Veľkosť synchronizačného napätia sa dá ovládať – nastavovať ručne potenciometrom (CITLIVOSŤ, STABILITY, a pod.). Ak začína spätný beh na nevhodnom mieste signálu (obr. 42), je dobré zmeniť polaritu synchronizačného napätia. U antisymetrických Y zosilňovačov sa pripojí výstup synchronizačného napätia na druhú vetvu (kanál) zosilňovača, tým sa zmení polarita (+,-) resp. fáza synchronizačného napätia o 180°.



Obr. 42

Stáva sa, že meraný signál sa nehodí na synchronizáciu (amplitúdovo a frekvenčne modulované harmonické napätia, tvarované impulzné napätia a pod.). Obyčajne býva takýto signál odvodený z nejakého iného napätia, ktoré môže byť použité na synchronizáciu. Pre takéto prípady sa synchronizačné napätie privádza zvonka – vonkajšia synchronizácia (EXT) – buď na zvláštnu svorku, alebo na X vstup osciloskopu.



Obr. 43

V súčasnosti sa vybavujú časové základne osciloskopov automatickým spúšťaním meraným signálom. V takom prípade generátor časovej základne nepracuje, ak nie je na Y vstup osciloskopu privedený signál, alebo je jeho napätie príliš malé – obrazovka je tmavá. Privedením signálu s dostatočným napätím sa beh časovej základne spustí a automaticky sa nastaví aj správna hodnota synchronizačného napätia.

Bloková schéma osciloskopu je na obr. 43.

5.3.6 Laboratórne osciloskopy

Na náročnejšie merania sa kvalitné osciloskopy konštruujú tak, aby poskytovali experimentátorovi väčší komfort a viac možností. Y zosilňovač sa robí dvojkanálový. Elektronickým prepínačom sa na obrazovku pripájajú kanály striedavo buď na dobu jedného behu časovej základne (ALT), alebo prepínač prepína kanály pevne daným kmitočtom (obvykle 100 alebo 500 kHz). Režim CHOP.

Oba kanály sa dajú použiť samostatne alebo spojiť do série za sebou (na obrazovke sa zobrazí súčet signálov $Y_1 + Y_2$), alebo proti sebe, na obrazovke sa zobrazí rozdiel signálov $Y_1 - Y_2$.

Napätie časovej základne býva vyvedené buď priamo píla (\wedge), a často aj tvarovacím obvodom upravené na obdĺžnikový priebeh (\square). Takéto osciloskopy bývajú vybavené vstavaným kalibrátorom, ktorý poskytuje napätie obdĺžnikového tvaru veľkosti najčastejšie $1 V_{ss}$ a s kmitočtom 1 kHz.

Synchronizácia býva rozdelená na nízkofrekvenčnú (LF, AC), vysokofrekvenčnú (HF) a sieťovú (50 Hz). Na meranie impulzných napätí bývajú dobré osciloskopy vybavené oneskorovacou linkou a ručným jednorazovým spúšťaním časovej základne.

Ďalším vylepšením býva Z vstup, z ktorého sa privádza napätie priamo na Wehneltov valec, čo umožňuje moduláciu jas. To sa hodí pri meraniach fázy alebo „trojrozmernom zobrazovaní“.

5.3.7 Príprava osciloskopu na meranie

Pred zapnutím osciloskopu skontrolujte nastavenie ovládacích prvkov. Prvky plynulého nastavovania zosilnenia a kmitočtu časovej základne dajte do polohy KALIBRÁCIA, ovládacie prvky časovej základne nastavte na voľné odbiehanie, synchronizáciu nastavte do režimu INT. Ovládacie prvky jas do strednej polohy intervalu nastavenia, citlivosť zosilňovačov nastavte na najmenšiu citlivosť alebo ak to ide, tak na skrat vstupov.

Môžete zapnúť sieťový spínač. Skontrolujte signalizáciu zapnutia a vyčkajte asi dve minúty, než sa katóda obrazovky riadne nažeraví. Nastavte primeraný jas a zaostríte stopu na tienidlo obrazovky. Zaostríť sa dá tým lepšie, čím je menší jas.

Ak sa na tienidlo neobjaví stopa, zvýšte jas. Ak to k ničomu nevedie, pokúste sa nájsť stopu pomocou ovládacích prvkov posunu $\uparrow\downarrow\leftarrow\rightarrow$. Najprv skúste zvislý smer. Ak ste neúspešní, nastavte ovládací prvok zvislého posunu do strednej polohy intervalu nastavenia a vyskúšajte šťastie vo vodorovnom smere. Ak ani to nepomáha, nastavte aj tento ovládací prvok do strednej polohy a vráťte sa na začiatok. Skontrolujte či je časová základňa prepnutá do režimu voľného odbiehania, či máte privádzaný signál a súčasne nastavenú vysokú citlivosť vstupov (odpojte signál, znížte citlivosť). Ak je osciloskop v poriadku, mali by ste mať úspech.

Časom sa menia parametre prvkov, z ktorých je osciloskop zostavený. Tým sa mení antisymetria zosilňovačov, ich zosilnenie, poruší sa kalibrácia atď.

Nastavenie antisymetrie kontrolujte pri skratovaných Y vstupoch a ich najväčších citlivostiach. Plynulý regulátor zosilnenia nastavte na minimum, stopu nastavte vertikálnym posunom do stredu tienidla obrazovky. Potom plynulý regulátor zosilnenia nastavte na maximum. Stopa by sa nemala pohnúť vo zvislom smere. Ak sa posunula, tak nastavovacím prvkom, ktorý býva obvykle na bočnej stene osciloskopu (BALANCE, a pod.) ju pritiahnite nazad do stredu tienidla. Stiahnite zosilnenie na minimum a posunom Y znovu nastavte stopu do stredu tienidla. Celý postup opakujte, kým poloha stopy prestane závisieť od plynulej regulácie zosilnenia. Ak má osciloskop viacero Y kanálov, treba ich nastaviť každý zvlášť.

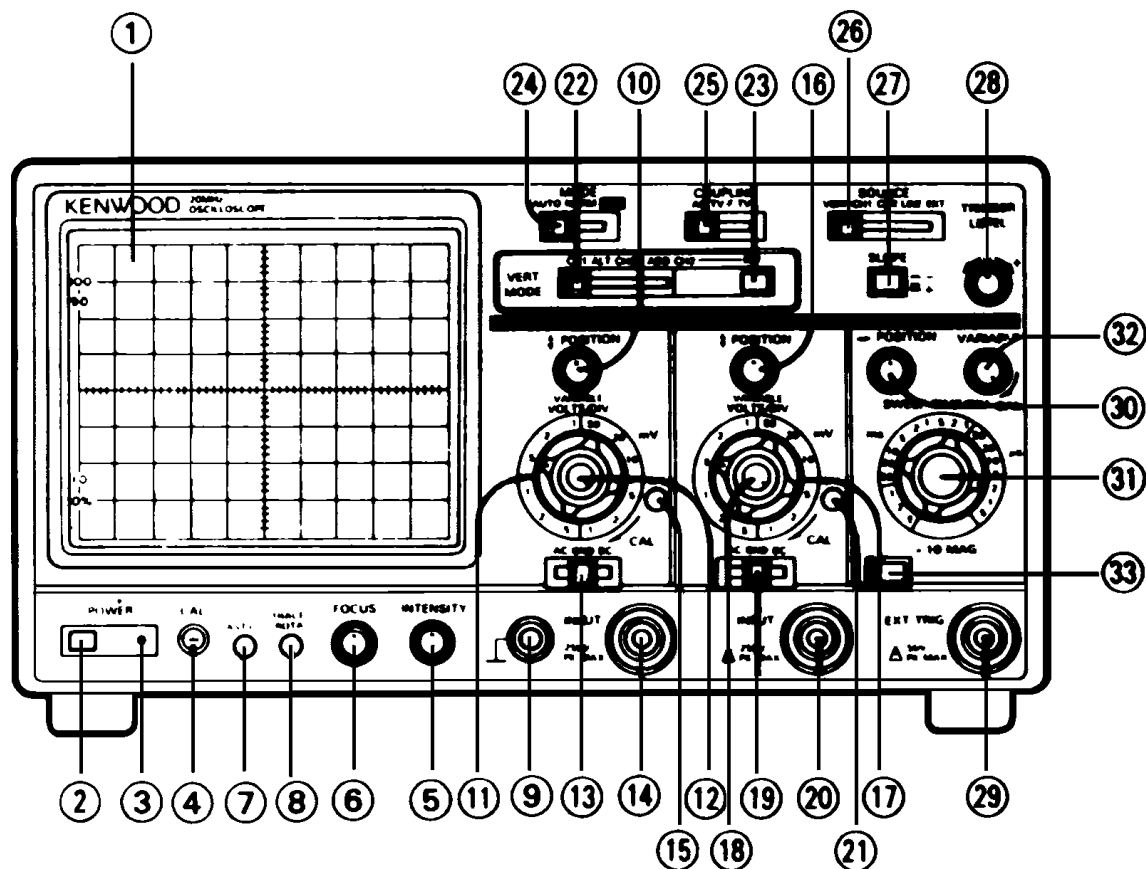
Kalibráciu kontrolujte privedením napätia na Y vstup buď zo vstavaného kalibrátora, alebo nejakým vonkajším napätím známej presnej hodnoty. Ak kalibrácia nesúhlasí (regulátor zosilnenia musí byť v polohe KALIBRÁCIA), opravte zosilnenie zvláštnym ovládacím prvkom (KAL).

Nastavovať antisymetriu a kalibráciu má zmysel až po tepelnom ustálení prístroja, čo je obvykle až po 1/2 – 1 hodine po zapnutí.

Na X zosilňovač, sú kladené trochu nižšie nároky, preto nemá obvyčajne voľne prístupné nastavovacie prvky. Skontrolujte napätím známeho kmitočtu kalibráciu časovej základne. Väčšina elektronických

prístrojov má presnosť $\pm(3 \text{ až } 5) \%$, takže sa ich údaje môžu líšiť. o $\pm(6 \text{ až } 10) \%$, čo je tolerančný rozptyl, s ktorým musíte pri hodnotení výsledkov počítať. Na presnejšiu kalibráciu sú potrebné normály, ktorých presnosť musí byť o rád vyššia ako u kalibrovaných prístrojov.

V praxi budete používať osciloskop KENWOOD CS-4025 (obr. 44).



- | | | | |
|----|--|----|--|
| 1 | Obrazovka | 18 | Plynulá zmena citlivosti Kanála 2 |
| 2 | Sieťový vypínač | 19 | Prepínač režimu jednosmerný/zemnenie/striedavý |
| 3 | Indikátor zapnutia | 20 | Konektor vstupu Kanála 2 |
| 4 | Kalibrátor | 21 | Nastavenie antisymetrie Kanála 2 |
| 5 | Jas | 22 | Prepínač režimu Kanálov 1 a 2 |
| 6 | Zaostrenie stopy | 23 | Prepínač polarity Kanála 2 |
| 7 | Nastavenie astigmatizmu | 24 | Prepínač režimu časovej základne |
| 8 | Natočenie stopy | 25 | Voľba synchronizačných impulzov |
| 9 | Kontra/Zemnenie | 26 | Voľba zdroja synchronizačného signálu |
| 10 | Vertikálny posun stopy Kanála 1 | 27 | Polarita synchronizačného signálu |
| 11 | Prepínač citlivosti Kanála 1 | 28 | Nastavenie úrovne synchronizačného signálu |
| 12 | Plynulá zmena citlivosti Kanála 1 | 29 | Konektor vstupu externého synchroniz. signálu |
| 13 | Prepínač režimu jednosmerný/zemnenie/striedavý | 30 | Posun stopy vodorovne |
| 14 | Konektor vstupu Kanála 1 | 31 | Prepínač rýchlosti behu časovej základne |
| 15 | Nastavenie antisymetrie Kanála 1 | 32 | Plynulá zmena rýchlosti behu časovej základne |
| 16 | Vertikálny posun stopy Kanála 2 | 33 | 10x zvýšenie rýchlosti behu časovej základne |
| 17 | Prepínač citlivosti Kanála 2 | | |

Obr. 44

Vlastnosti:

Vertikálne zosilňovače CH1 a CH2:

- citlivosť: 10 mV/diel až 10 V/diel, prepínateľná v 12 rozsahoch v skokoch 1 : 2 : 5 : 10
- kmitočtový rozsah: DC do 5 MHz (-3dB) na rozsahoch 1 a 2 mV/div
 - DC do 20 MHz (-3dB) na rozsahoch 5 mV/div a viac
 - AC 10 Hz – 5 MHz (-3dB) na rozsahoch 1 a 2 mV/div
 - AC 10 Hz – 20 MHz (-3dB) na rozsahoch 5 mV/div a viac
 - AC pri použití sondy 1 : 10 sa dolný hraničný kmitočet zmení na 1 Hz
- presnosť: $\pm 3 \%$ pre oba Y kanály
- vstupná impedancia: paralelná kombinácia odporu 1 M Ω s kondenzátorom 35 pF
- vstupná impedancia sondy 1 : 10: odpor 10 M $\Omega \pm 2 \%$ paralelne s kondenzátorom 19,5 pF $\pm 10 \%$

Horizontálny zosilňovač (je použitý CH2 v režime X – Y):

- citlivosť a vstupnú impedanciu má rovnaké ako Y kanál CH2
- kmitočtový rozsah: DC do 500 kHz (-3dB)
 - AC: 10 Hz – 500 kHz (-3dB)
- fázový rozdiel x a y v režime X – Y: 3° pri 50 kHz

Časová základňa:

- v režime AUTO voľne beží, v režime NORM sa spúšťa vstupným signálom
- kalibrácia: 0,5 s/diel až 0,5 μ s/diel prepínateľná v 19 rozsahoch v skokoch 1 : 2 : 5 : 10
- presnosť: $\pm 3 \%$, v režime 10 $\times \pm 5 \%$
- linearita: $\pm 3 \%$, v režime 10 $\times \pm 5 \%$
- napätia pre synchronizáciu:
 - pre EXT 0,25 V (rozkmit)
 - pre INT rozkmit cca 1 diel rastra obrazovky
- v režime TV: TV-F časovú základňu spúšťajú obrazové impulzy (vert. synch. impulzy videosignálu)
TV-L časovú základňu spúšťajú riadkové impulzy (horiz. synch. impulzy videosignálu)

Kalibrátor:

Napätie je obdĺžnikové (kladné pulzy) 1 V $\pm 3 \%$, 100 Hz (odvodené od energetickej siete)

Časť druhá

ZÁKLADNÉ MERANIA V ELEKTRONIKE

V podstate sú to elektrotechnické merania ako ich poznáte zo základných praktík. Líšia sa len použitím iných typov prístrojov. Hlavný dôraz v špeciálnom praktiku z elektroniky budeme kladť na metodiku merania a následkov pripojenie meracích prístrojov na vyšetované elektronické obvody. Meracie prístroje svojimi vstupnými a výstupnými impedanciami ovplyvňujú vlastnosti a správanie sa vyšetovaných elektronických obvodov. Preto je dôležité poznať základné vlastnosti prístrojov a vedieť ich zahrnúť do teoretického rozboru.

6 NIEKOĽKO PRAKTICKÝCH RÁD

- Ak o prístroji nič neviete, vyžiadajte si k nemu návod na obsluhu resp. servisnú príručku, alebo sa poraďte s odborníkom.
- Profesionálne (aj dobré amatérske) prístroje majú stručne a výstižne označené ovládacie prvky priamo na paneli. Dobré sa s nimi zoznámte a uveďte si, na čo sú, a to skôr než prístroj zapnete.
- Svoje zaručené vlastnosti má prístroj až po určitom čase po zapnutí. Súvisí to s teplotným ustálením „organizmu“ prístroja. Kalibrácia, kompenzácia a pod. majú teda zmysel až po 1/2 – 1 hodine, keď je už prístroj teplotne ustálený. Prístroje zbytočne nevypínajte. Samozrejme, že v praktiku, ak nie sú kladené vysoké nároky na presnosť, možno prístroje použiť na meranie už skôr než po 1/2 hodine. Treba však častejšie kontrolovať základné nastavenia (napr. elektrickú nulu u elektronických voltmetrov a pod.).
- Ručičkové meradlá, ktoré sú vstavané do elektronických prístrojov, treba skontrolovať a mechanicky nastaviť ešte pred zapnutím prístrojov. Po zapnutí môžu tieto meradlá u mnohých prístrojov ukazovať malé výchylky, ktoré sú spôsobené rušivými napätiami rôzneho pôvodu. S tým výrobca počítal a podľa toho aj odporučil postup kalibrácie, nastavovanie, vyvažovanie atď.
- Ak máte možnosť použiť pri zapojovaní vodiče viacerých farieb, odlišujte „živé“ časti od nulovaných, vstup od výstupu a pod.
- Tienené vodiče chránia prenosovú cestu od jedného prístroja k druhému voči rušivým poliam. Nezapudnite ale, že vnášajú prídavnú impedanciu 30 – 100 pF/m. Ich použitím môžete ovplyvniť merané obvody. Vonkajší tieniaci obal pripojte vždy na miesto s najmenším potenciálom (kostrou). Tieniacy obal je vyvedený tenkým vodičom s „banánikom“. Len pri vysokofrekvenčných meraniach treba použiť krátke ihlové kontakty.

- Pri pripojovaní tieniacich vodičov myslite na to, aby tieniace obaly a zemniace vodiče (vrátane vodičových kostier prístrojov) netvorili uzavreté slučky, do ktorých sa, hlavne pri vysokofrekvenčných meraniach, môžu indukovať pomerne vysoké rušivé napätia. Zemniť (nulovať, ukostrovať) sa má hviezdnicovito do jedného bodu.
- Vždy dôkladne zväzte, čo váš zásah do meracej sústavy spôsobí, a až potom zasahujte.

7 MERANIE S OSCIOSKOPOM

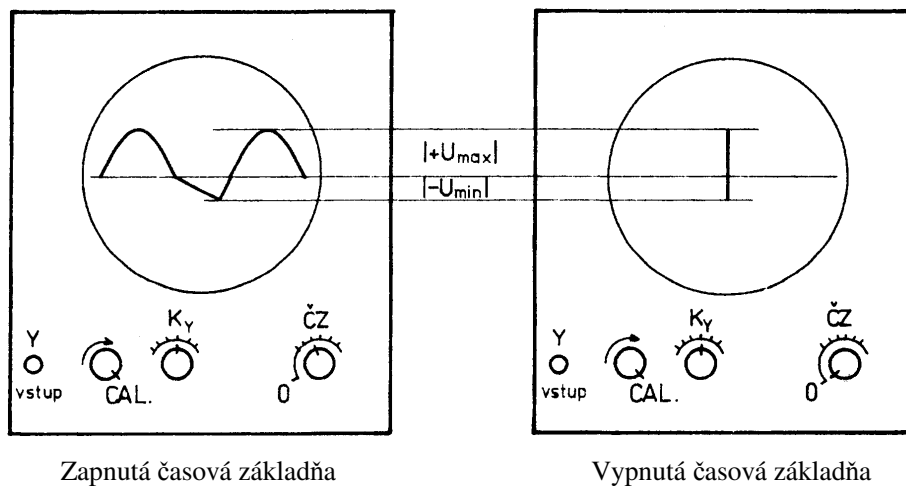
7.1 Meranie napätia

Meranie napätia elektronickým voltmetrom je opísané v kap. 5.1.1 a 5.1.2. Pri meraní striedavého napätia neznámeho tvaru dáva údaj elektronického voltmetra málo informácií o meranom napätí. Osciloskopické zobrazenie má svoju dôležitosť – zobrazuje priebeh napätia v čase, dáva tým informáciu o okamžitej hodnote napätia v jeho ľubovoľnej fáze.

Vzdialenosť (y) bodu zobrazeného priebehu od vodorovnej súradnej osi udáva okamžitú hodnotu napätia (obr. 45).

Ak je jemný regulátor zosilnenia nastavený do polohy KALIBRÁCIA, tak veľkosť okamžitej hodnoty napätia je $y \cdot K_y$, kde K_y je nastavená citlivosť Y vstupu osciloskopu vo [V/dielik].

Ak je vypnutá časová základňa a na X vstup nie je privádzané žiadne striedavé napätie (jednosmerné napätie iba odsunie stopu o istú dĺžku vo vodorovnom smere), tak na obrazovke sa zobrazí zvislá úsečka, ktorej dĺžka udáva hodnotu napätia medzi jeho najnižšou a najvyššou hodnotou – medzivrcholovú hodnotu (tiež napätie špička-špička). Medzivrcholovú hodnotu možno zmerať aj zo zobrazenia napätia privedeného na X vstup osciloskopu.



Zapnutá časová základňa

Vypnutá časová základňa

Obr. 45

Úloha 7. Vypočítajte stredné absolútne hodnoty harmonického, trojuholníkového a obdĺžnikového striedavého napätia za čas rovný celistvému násobku periódy.

Úloha 8. Čo bude ukazovať striedavý elektronický voltmeter pri meraní napätí z úlohy 7?

Úloha 9. Pohľad na obrazovku osciloskopu je na obr. II.1. Parametre zobrazenia sú $K_x = 5 \text{ ms/cm}$ a $K_y = 200 \text{ mV/cm}$. Určte periódu, kmitočet a efektívnu hodnotu meraného napätia.

Cvičenie 1. Privedte na Y vstup osciloskopu napätia rôznych priebehov, sledujte a opíšte vplyvy nastavenia rýchlosti behu časovej základne, zosilnenia Y zosilňovača (citlivosti K_y), účinok internej a externej synchronizácie a pod.

Cvičenie 2. Nastavte si na obrazovke osciloskopu vhodný priebeh a určte rozkmit napätia, dĺžku periódy, kmitočet. Vysvetlite a zdôvodnite váš postup merania s dosiahnuté výsledky.

Cvičenie 3. Napätie na Y vstupe osciloskopu z cvičenia 2. ponechajte nezmenené a vypnite časovú základňu. Vysvetlite čo možno určiť alebo zmerať zo vzniknutého obrazca. Určte, zmerajte, zdôvodnite.

Cvičenie 4. Napätie z cvičenia 3. privedte na X vstup osciloskopu a okalibrujte ho (určte citlivosť K_x).

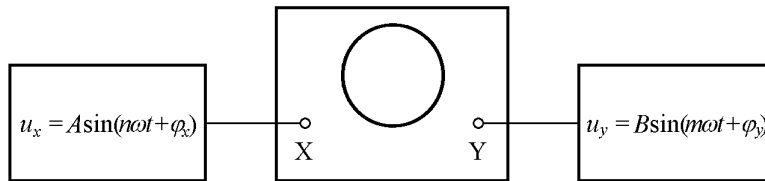
Cvičenie 5. Privádzajte postupne harmonické, trojuholníkové, obdĺžnikové, harmonické jednocestne usmernené nefiltrované, potom kondenzátorom filtrované napätie na Y vstup osciloskopu (so zapnutou časovou základňou) a súčasne ich merajte jednosmerným aj striedavým elektronickým voltmetrom. Porovnajme namerané hodnoty s výsledkami úlohy 8. Vysvetlite a zdôvodnite súhlas i rozdiely.

7.2 Meranie kmitočtu

Pri nastavení rýchlosti behu časovej základne do polohy KALIBROVANÉ je dĺžka vodorovnej úsečky úmerná času. Konštantou úmernosti je citlivosť K_x [s/dielik]. Z dĺžky vo vodorovnom smere možno určovať časové úseky a v prípade periodických signálov aj kmitočet.

Kmitočet možno merať aj bez časovej základne. Treba však na to generátor a vyhovujúcou presnosťou kmitočtu:

Zložením dvoch napätí s kmitočtami $n \cdot f$ a $m \cdot f$ v dvoch navzájom kolmých smeroch (obr. 46) možno dosiahnuť zaujímavé obrázky.



Obr. 46

V prípade, že m a n sú prirodzené čísla a $\varphi_x - \varphi_y = \text{konštante}$, zobrazené priebehy budú uzavreté čiary a nazývajú sa Lissajousove obrazce.

Pomer počtu priesečníkov zobrazenej čiary s vodorovnou sečnou a priesečníkov zobrazenej čiary so zvislou sečnou udáva pomer periód $T_x : T_y$ privádzaných napätí. Počet priesečníkov treba určovať na sečnách, ktoré neprechádzajú cez body, v ktorých sa zobrazená čiara križuje sama so sebou.

Čiary sú prehľadné, ak m a n sú malé prirodzené čísla alebo sú súdeliteľné. Pretože pri tejto metóde merania kmitočtu sa používajú nekoherentné zdroje, rozdiel $\varphi_x - \varphi_y$ sa s časom mení, a tým sa mení aj Lissajousov obrazec.

Úloha 10. Zložte graficky dve navzájom kolmé harmonické napätia s pomerom kmitočtov 1 : 2 alebo 2 : 3 so vzájomným fázovým posunom 45° (nižšieho kmitočtu).

Cvičenie 6. Skladajte na osciloskope v dvoch navzájom kolmých smeroch dve harmonické napätia rôznych kmitočtov. Jedno z napätí odvodte od energetickej siete $f = 50 \text{ Hz} \pm 1\%$. Na základe Lissajousových obrazcov okalkulujte stupnicu generátora na rozsahu 10 – 100 Hz.

7.3 Meranie funkcionálnych závislostí

V praxi pôjde o meranie VA charakteristík prvkov alebo dynamických charakteristík obvodov. V prípade VA charakteristík potrebujeme prevodník prúd-napätie. Tým je elektrický odpor. Podľa Ohmovho zákona je spád napätia na odpore rovný $U = R \cdot I$.

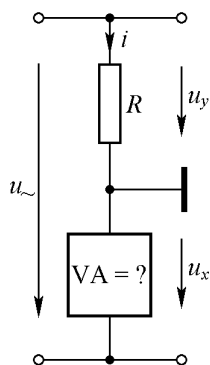
7.3.1 Meranie voltampérových charakteristík

Všeobecné zapojenie vhodné na zobrazovanie VA charakteristík je na obr. 47. Rozmietacie napätie u_{\sim} je striedavé, vhodného tvaru a kmitočtu.

VA charakteristiku skúmaného prvku možno vyjadriť v tvare $i = f(u_x)$. Prúd sa dá vyjadriť z napätia u_y : $i = u_y/R$. Výchyľky na obrazovke sú úmerné príslušným napätiam $y \sim u_y$, $x \sim u_x$, takže funkcionálna závislosť zobrazená na obrazovke je

$$y = K_y u_y = K_y R i = K_y R f(u_x) = \text{konšt} \cdot f(x),$$

čo je vlastne rovnica grafu VA charakteristiky. Konštanta úmernosti zahŕňa vplyvy citlivostí K_x a K_y , teda vyjadruje iba zmenu mierky.



Obr. 47

Pozor. Podľa obr. 47 je napätie u_x privádzané na X vstup osciloskopu v „protifáze“ s napätím u_y , preto bude graf VA charakteristiky na obrazovke osciloskopu otočený okolo osi X.

Meraný objekt môže mať istú „zotrvačnosť“ (napr. teplotnú, nábojovú – kondenzátor a pod.), ktorá obmedzuje kmitočť rozmietacieho napätia u . Na to treba pamätať, aby sa vylúčili ovplyvnenia meranej charakteristiky. Najčastejšou chybou pri grafických zobrazeniach býva práve použitie tak vysokého kmitočtu, že sa výrazne uplatňujú vplyvy kapacít a indukčností vzoriek a obrázky bývajú zdvojené a niekedy tvarovo hrubo skreslené.

V praxi budete mať pripravené hotové vzorky, aby sme ušetrili čas potrebný na ich montáž. Zapojenia vzoriek sú na obr. 48. Uvedené hodnoty parametrov prvkov stačia na teoretické určenie priebehu VA charakteristík.

Napríklad pre polovodičové diódy Shockleyova teória poskytuje vzťah

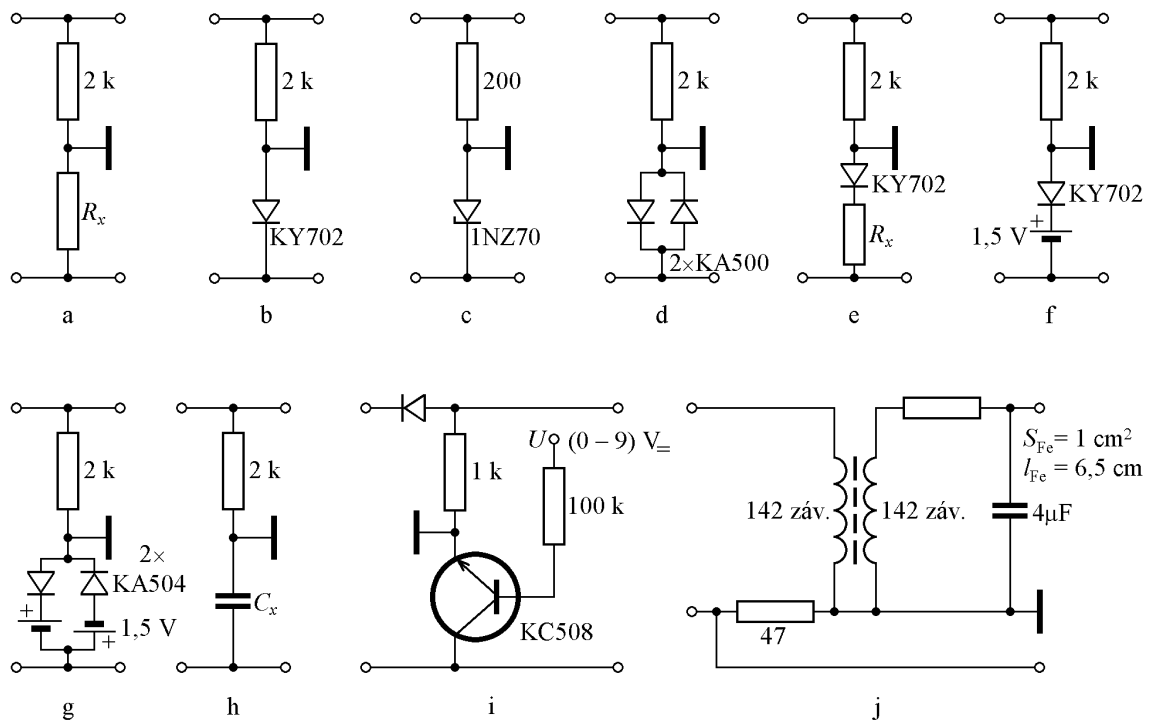
$$I = I_s[\exp(U_{AK}/mU_T) - 1], \quad [7], \text{ str. 286}$$

kde I_s je záverný prúd (praktická hodnota pre kremíkové diódy je $I_s \approx 10 \text{ pA}$), U_T je *tepelné napätie* $U_T = kT/q$ ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ je Boltzmanova konštanta, $T \approx 296 \text{ K} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ absolútna teplota, q je náboj elektrónu $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) a m je opravný koeficient, ktorý zahŕňa vplyv technológie výroby, čistoty materiálov atď. ($m = 1$ až 2). Pre prax možno brať bežne hodnotu $mU_T = 30 \text{ mV}$.

Pre uvedené hodnoty konštánt sú zostavené bežné hodnoty prúdov a napätí diódy do tabuľky:

$U_{AK} [\text{V}]$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6	0,7	0,8
$I [\text{A}]$	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$7,8 \cdot 10^{-9}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	0,136	3,8

Pri citlivosti osciloskopu $K_y = 2 \text{ V/diel}$ a odporom $2 \text{ k}\Omega$ meniacim napätie na prúd je prúdová citlivosť Y vstupu osciloskopu 1 mA/diel . VA charakteristika diódy začne mať pozorovateľný prúd okolo $0,5 - 0,6 \text{ V}$ anódového napätia U_{AK} .



Obr. 48

Aby bol obraz vysoký 4 diely (cm), musí byť prúd cez diódu 4 mA . Spád napätia na odpore $2 \text{ k}\Omega$ je 8 V , spád napätie na dióde v priepustnom smere je približne $0,6 \text{ V}$. Špičková hodnota rozmietačieho napätia musí teda byť $8,6 \text{ V}$, čo pri harmonickom napätí dáva hodnotu $U_{ef} = 6,2 \text{ V}$.

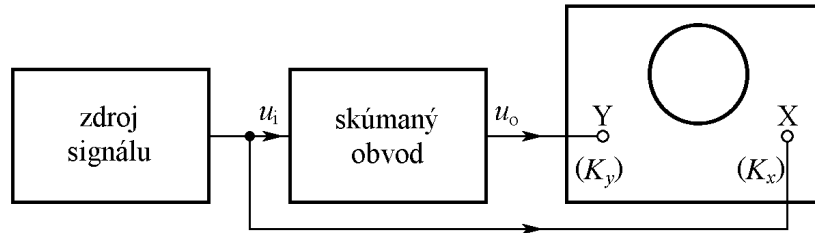
Úloha 11. Citlivosti osciloskopu sú $K_x = K_y = 2 \text{ V/cm}$. Nakreslite VA charakteristiky na milimetrový papier pre zapojenia z obr. 48.

Cvičenie 7. Zobrazte VA charakteristiky zapojené z obr. 48 a zakreslite ich do spoločného grafu s úlohou 11. Prediskutujte a vyhodnoťte výsledky.

7.3.2 Meranie prenosových funkcií

Elektronický obvod mení signál. Lineárny obvod zmení veľkosť signálu aj jeho fázu. Obe zmeny opisuje prenosová funkcia obvodu $K(j\omega)$, ktorá je funkciou kmitočtu signálu (kap. 4.9).

Ak je napr. vstupné napätie obvodu $u_i = U \sin(\omega t)$, v zapojení podľa obr. 49 sa dynamicky zobrazí závislosť $U_{výst} = f(U_{vst})$. Spoločnými parametrami sú kmitočet a čas.



Obr. 49

Výchylky na obrazovke osciloskopu budú:

$$x = K_x U \sin \omega t = A \sin \omega t,$$

$$y = K_y |K(j\omega)| U \sin(\omega t + \varphi) = B \sin(\omega t + \varphi).$$

Z prvej rovnice možno ľahko určiť $\omega t = \arcsin(x/A)$. Dosadením tohto výrazu do druhej rovnice sa z rovníc vylúči čas a kmitočet.

$$\frac{y}{B} = \frac{x}{A} \cos \varphi + \sqrt{1 - \left(\frac{x}{A}\right)^2} \sin \varphi \quad \text{resp.} \quad \frac{y}{B} - \frac{x}{A} \cos \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{A}\right)^2} \sin \varphi.$$

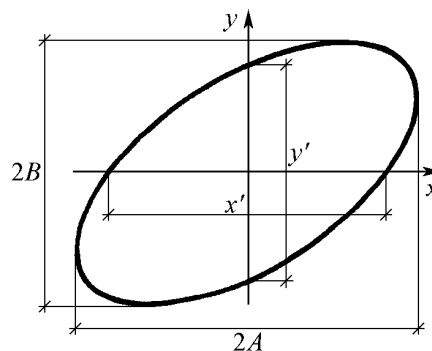
Po umocnení a úprave dostaneme rovnicu:

$$\left(\frac{x}{A \sin \varphi}\right)^2 + \left(\frac{y}{B \sin \varphi}\right)^2 - 2 \frac{xy}{AB \sin^2 \varphi} \cos \varphi = 1.$$

To je rovnica elipsy so stredom v strede súradnej sústavy a natočenej okolo začiatku (obr. 50).

Pre $y = 0$ je $x = \pm A \sin \varphi$, teda $x' = 2A \sin \varphi$. Pre $x = 0$ je $y = \pm B \sin \varphi$, teda $y' = 2B \sin \varphi$.

Priemet elipsy na os x je $2A$ (dvojnásobok amplitúdy vstupného napätia) a priemet na os y je $2B$ (dvojnásobok amplitúdy výstupného napätia). Z pomerov $x'/2A = y'/2B = \sin \varphi$ možno určiť fázový posun φ .



Obr. 50

Podiel $y'/x' = 2B/2A = K_y/K_x$, $U = |K(j\omega)|U$, $U = |K(j\omega)|U$. K_y/K_x udáva činiteľa napät'ového prenosu elektro-nického obvodu. Zmeraním závislosti $\varphi(\omega)$ a $|K(j\omega)|$ sú zmeraná fázové a amplitúdová charakteristika a možno z nich určiť prenosovú charakteristiku $K(j\omega) = |K(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)}$.

Úloha 12. Vypočítajte amplitúdové a fázové charakteristiky pre obvody z obr. II.2 a nakreslite ich grafy. Amplitúdu výstupného napätia normujte amplitúdou vstupného napätia, kmitočet normujte časovou konštantou obvodu. Stupnicu pre normovaný kmitočet voľte logaritmickú v rozsahu 0,01 – 100. Určte prenosové charakteristiky a zakreslite ich do Gaussovej roviny a lineárnymi stupnicami na reálnej a imaginárnej osi.

Cvičenie 8. Zostavte si obvody z úlohy 12, zmerajte ich amplitúdové a fázové charakteristiky, určte prenosovú charakteristiku a zakreslite ich do spoločných grafov s úlohou 12.

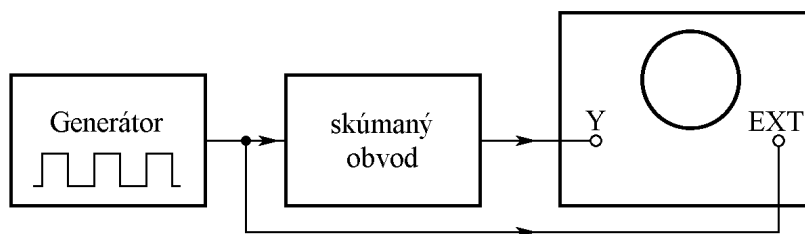
7.3.3 Meranie dynamických charakteristík

Ak kmitočet signálu v zapojení podľa obr. 49 je taký, že sa neuplatňujú reaktancie vyšetřovaného obvodu (t. j. fázový posun výstupného signálu oproti vstupnému je $\varphi = 0^\circ$) a prechodový jav zanikne za zlomok periódy, tak zobrazená funkcia $y = U_{\text{výst}}(U_{\text{vst}})$ vyjadruje závislosť veľkosti výstupného signálu od veľkosti vstupného signálu. Takú závislosť nazývame *dynamická charakteristika* (kap. 3). Vhodnou voľbou veľkosti vstupného signálu môžeme zo zobrazenej funkcie $y = U_{\text{výst}}(U_{\text{vst}})$ určiť dynamický rozsah obvodu, t. j. veľkosti signálov, pri ktorých možno vyšetřovaný obvod považovať za lineárny (obr. 5).

V praxi budete pracovať so signálmi s kmitočtom menším ako 500 Hz. Najlepšie je použiť signály odvodené priamo z energetickej siete $f = 50 \text{ Hz} \pm 1\%$. Ak sa použije iný zdroj signálu, tak pri kmitočtoch 50 a 100 Hz prichádza obyčajne k nepríjemným interferenčným záznejom.

7.3.4 Meranie prechodovej charakteristiky

Prechodová charakteristika je vlastne grafom prechodovej funkcie (kap. 4.10). Osciloskopom ju možno zobraziť s použitím vstupnej časovej základne. Ak nemá osciloskop oneskorovacie vedenie alebo jednorazovo spúšťanú časovú základňu, treba použiť vonkajší generátor obdĺžnikového napätia a kvôli dobrej synchronizácii synchronizovať časovú základňu týmto napätím zvonku. Zapojenie na meranie prechodovej charakteristiky je na obr. 51.



Obr. 51

Režim generátora obdĺžnikového napätia treba nastaviť tak, aby strieda bola 1 : 1 (kladná polvlna rovnako dlhá ako záporná) a kmitočet tak, aby prechodový jav stihol doznieť za dobu jednej polperiódy obdĺžnikového napätia.

Pri použití vnútornej synchronizácie chýba začiatok zobrazovaného priebehu. Stráca sa tá časť zobrazovaného priebehu, ktorá je menšia ako napätie potrebné na účinnú synchronizáciu. Na získanie úplného obrazu by bolo potrebné použiť oneskorovacie vedenie. Ak sa použije vonkajšia časová základňa, možno zobraziť prechodovú charakteristiku napr. v logaritmickom mierke. Na to treba upraviť píl'ové napätie generátora časovej základne logaritmujúcim zosilňovačom tak, aby vychýľovacie napätie rástlo rovnomerne v závislosti od logaritmu číselnej hodnoty času.

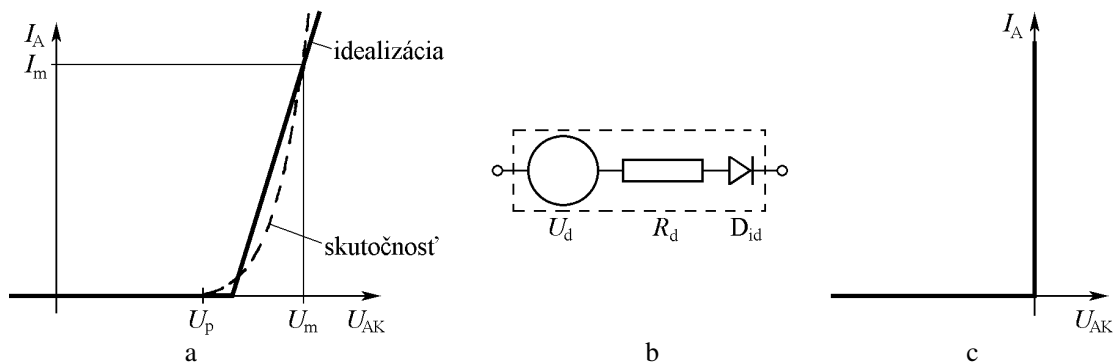
Úloha 13. Pre zapojenie z úlohy 12 zobrazte prechodové javy a zakreslite prechodové charakteristiky. Napätie odozvy normujte vstupným napäťovým skokom, čas normujte časovou konštantou. Charakteristiky zakreslite v lineárnej mierke pre normovaný čas v intervale $0 - 7$.

Cvičenie 9. Pre obvody z cvičenia 8 zobrazte prechodové javy. Zobrazené priebehy zakreslite do spoločného grafu s úlohou 13. Pri meraní použite vonkajšiu synchronizáciu vstupným napäťovým skokom. Vysvetlite príčiny rozdielov charakteristík nameraných a vypočítaných.

8 KREMÍKOVÉ DIÓDY

VA charakteristika diódy má dve podstatne odlišné oblasti (tabuľka v kap. 7.3, výsledky merania v cvičení 7). Pre napätia $U_{AK} < 0,5$ V prechádza diódou tak malý prúd, že z praktického hľadiska ju možno považovať za nevodivú – zatvorenú. Pre napätia $U_{AK} > 0,5$ V prúd prudko (exponenciálne) narastá a od napätia $U_{AK} > 0,6$ V možno diódu považovať za otvorenú. Jej jednosmerný aj dynamický odpor sú malé.

Dióda predstavuje typický nelineárny prvok. Rozbory nelineárnych obvodov sú spravidla zdĺhavé počtárske záležitosti, preto zavedieme niektoré zjednodušenia.



Obr. 52

Charakteristiku reálnej diódy nahradíme idealizovanou (obr. 52a). Skutočnú diódu sme nahradili modelom (obr. 52b), kde zdroj jednosmerného napätia U_p je modelom otváracieho (prahového) napätia reálnej diódy, odpor R_d je dynamický odpor diódy a D_{id} je ideálna dióda, ktorej VA charakteristika je na obr. 52c. Zdroj otváracieho napätia je neautonómny zdroj, t.j. jeho napätie sa objaví len vtedy, ak je dióda vonkajším napätím polarizovaná v priepustnom smere.

Rozborom charakteristiky diódy ([7], str. 286 a kap. 7.3.1, cvičenie 7) dostaneme vzťahy pre

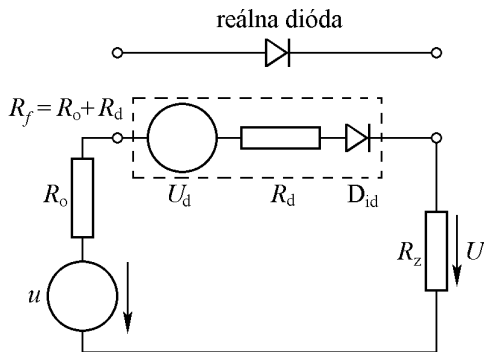
$$R_d \approx \frac{2mU_T}{I_m} \approx \frac{60}{I_m} \quad [\text{mV, A}]$$

$$a \quad U_p \approx mU_T \left(\ln \frac{I_m}{I_s} - 2 \right) \approx 30 (\ln 10^{11} I_m - 2) \approx 700 + 30 \ln I_m \quad [\text{mV, A}],$$

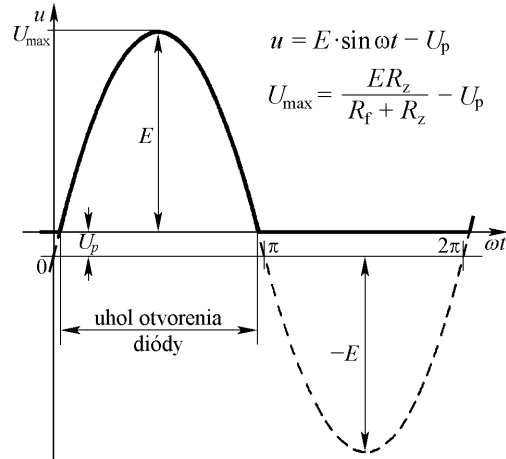
I_m je maximálny prúd, ktorý prechádza diódou zapojenou v obvode, U_m je napätie na dióde pri prúde I_m a $mU_T \approx 30$ mV je praktická hodnota tepelného napätia (kap. 7.3.1). Pri rozbere charakteristiky sme predpokladali rovnosť anódových strát na reálnej a na idealizovanej dióde.

8.1 Usmerňovače

Ventilový účinok diódy môžeme využiť na usmerňovanie striedavých napätí. Základné zapojenie usmerňovača je na obr. 53. Priebeh usmerneného napätia na zaťažovacom odpore R_z je na obr. 54.



Obr. 53

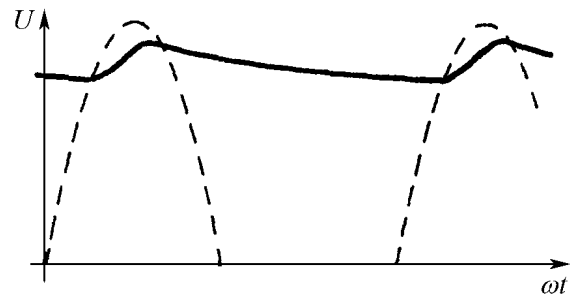
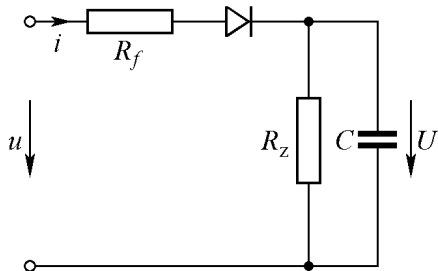


Obr. 54

Pre napätia $E > 5 \text{ V}$ možno vplyv otváracieho napätia U_p zanedbať, čo sa týka uhla otvorenia, a čo sa týka amplitúdy, znížiť jeho hodnotu o U_p alebo tiež zanedbať.

Účinnosť takéhoto usmerňovača je malá. Jednosmerná zložka usmerneného harmonického napätia je U_{\max}/π (kap. 5.1.2), striedavá zložka je pre väčšinu účelov v elektronickej praxi príliš vysoká.

Za usmerňovač preto treba zaradiť filter, ktorý striedavú zložku usmerneného napätia potlačí. Najjednoduchšie zapojenie usmerňovača s filtráciou usmerneného napätia je na obr. 55, ktoré vyhovie pre usmerňovače malého výkonu (malý odoberaný jednosmerný prúd).

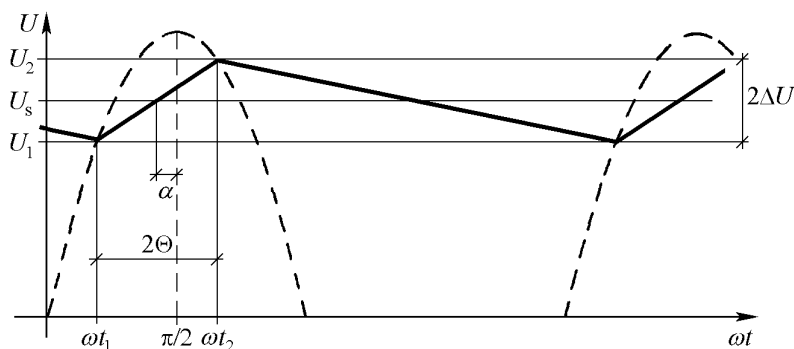


Obr. 55

Kondenzátor sa nabíja napätím U cez odpor (pozri Théveninova veta) $R_f \parallel R_z$ (paralelná kombinácia) a vybíja exponenciálne s časovou konštantou $\tau = R_z C$ do odporu záťaže R_z .

Pre malé zvlnenia ($\Delta U/U_s$) možno priebeh na záťaži nahradiť idealizovaným podľa obr. 56, ktorého početový rozbor je pomerne jednoduchý a odchýlky od skutočných hodnôt sú malé.

V čase od t_1 po t_2 je dióda otvorená a prúd dodávaný zdrojom tečie do záťaže a súčasne nabíja kondenzátor. Náboj, ktorý kondenzátor prijme, odtieká do záťaže v čase, keď je dióda zatvorená, t. j. v čase od t_2 po $t_1 + T$. Stredná hodnota prúdu, ktorý tečie do záťaže je U_s/R_z . Prúd, ktorý zdroj dodáva, možno určiť zo spádu napätia na odpore R_f ; $i = (u - U_p - U)/R_f$.



$$\begin{aligned}
 U_1 &= E \sin \omega t_1 \\
 U_2 &= E \sin \omega t_2 \\
 \Theta &= \frac{\omega t_1 - \omega t_2}{2} \\
 \frac{\pi}{2} - \alpha &= \frac{\omega t_1 + \omega t_2}{2} \\
 U_s &= \frac{U_1 + U_2}{2}
 \end{aligned}$$

Obr. 56

Podmienku rovnosti náboja dodaného zdrojom a odtečeného do záťaže možno zapísať:

$$\frac{1}{R_f} \int_{t_1}^{t_2} (E \sin \omega t - U) dt = \frac{U_s}{R_z} T, \quad \text{kde } U = U_1 + \frac{U_2 - U_1}{t_2 - t_1} (t - t_1).$$

Kvôli rýchlosti výpočtu posunieme začiatok súradnej sústavy po osi ωt do bodu $\pi/2 - \alpha$, t. j. zavedieme substitúciu $x = \pi/2 - \alpha - \omega t$. Potom je

$$U = U_s + \frac{\Delta U}{\Theta} x \quad x \in \langle -\Theta, \Theta \rangle,$$

$$U_s = \frac{1}{2} (U_1 + U_2) = E \cos \alpha \cos \Theta,$$

$$\Delta U = \frac{1}{2} (U_2 - U_1) = E \sin \alpha \sin \Theta$$

a podmienka rovnosti nábojov

$$\frac{E}{\omega R_f} \int_{-\Theta}^{\Theta} \left[\sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - x \right) - \frac{U_s}{E} - \frac{\Delta U}{E \Theta} x \right] dx = \frac{U_s}{R_z} T.$$

Po integrácii

$$\frac{2E}{\omega R_f} \left(\cos \alpha \sin \Theta - \frac{U_s}{E} \Theta \right) = \frac{U_s}{R_z} T.$$

Po dosadení za U a úprave je konečný tvar $\frac{R_f}{R_z} = \frac{\text{tg} \Theta - \Theta}{\pi}$, kde 2Θ nazývame uhol otvorenia. Graf tejto závislosti je na obr. 57.

Uhol nesymetrie α možno určiť zo zmeny náboja kondenzátora. Pri nabíjaní prijme kondenzátor náboj $C2\Delta U$ a tento odtečie do záťaže v čase $T - (t_2 + t_1)$ ako prúd so strednou hodnotou U_s/R_z . Platí:

$$2C\Delta U = \frac{U_s}{R_z} (T - t_2 + t_1).$$

Vynásobením tejto rovnice výrazom ωR_z a dosadením za ΔU , t_1 , t_2 prejde do tvaru

$$R_z C 2 E \sin \alpha \sin \Theta = E \cos \alpha \cos \Theta = (2\pi - 2\Theta),$$

čo po úprave dá vzťah pre uhol nesymetrie

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\pi - \Theta}{\omega R_z C \operatorname{tg} \Theta}.$$

Zo známych α a Θ môžeme teraz určiť $U_s = E \cos \alpha \cos \Theta$ a činiteľ zvlňenia

$$\frac{\Delta U}{U_s} = \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \Theta = \frac{\pi - \Theta}{\omega R_z C}.$$

Na rýchly návrh usmerňovača boli vyvinuté rôzne grafické metódy [8]. Spôsob návrhu závisí od začiatočných veličín, preto nemožno dať na postup návrhu jednoznačný recept. Uvedieme ilustračný príklad.

Zdrojom striedavého napätia pre usmerňovač bude transformátor napájaný z energetickej siete $U_{ef} = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Odpor primárneho vinutia 45Ω . Sekundárne napätie 25 V (max. odber $0,7 \text{ A}$), odpor sekundárneho vinutia $1,4 \Omega$. Treba navrhnúť jednocestný usmerňovač, ktorého jednosmerné napätie má byť 15 V pri odbere 30 mA a činiteľ zvlňenia nanajvyš 20% .

Postup:

1. Určíme odpor záťaže $R_z = 15 \text{ V} / 0,03 \text{ A} = 500 \Omega$.
2. Určíme výstupný odpor transformátora. Jeho prevod je $220/25 = 8,8$. Výstupný odpor transformátora je $R_o = (1,4 + 45/8,8^2) \Omega = 1,98 \Omega$.
3. Určíme odpor R_d diódy. Na to potrebujeme poznať maximálny prúd diódou I_m , ktorý závisí od uhla otvorenia. Pre maximálnu hodnotu prúdu možno odvodiť vzťah

$$I_m \approx I_s \frac{R_z}{R_f} \frac{1 - \cos \Theta}{\cos \Theta}.$$

Zvolíme si iteračný postup. Odhadneme začiatočnú hodnotu $R_d \approx mU_T/I_s \approx 1 \Omega$. Odpor fáze $R_f = 2,98 \Omega$ a $R_f/R_z = 5,96 \cdot 10^{-3}$. Z grafu alebo diagramu obr. 57 a určíme $\Theta = 0,376$. Znovu vypočítame

$$R_d \approx \frac{2mU_T}{I_s} \frac{\cos \Theta}{1 - \cos \Theta} \frac{R_f}{R_z} = 0,16 \Omega.$$

Zmení sa R_f na $2,14 \Omega$ a $R_f/R_z = 4,28 \cdot 10^{-3}$. Pre tieto hodnoty je z grafu $\Theta = 0,338$. Zopakujeme postup a zistíme $R_d = 0,14 \Omega$ $R_d/R_z = 4,24 \cdot 10^{-3}$ a $\Theta = 0,337$. Po ďalšom iteračnom kroku zistíme, že z grafu nemôžeme Θ určiť presnejšie, ako bola posledná hodnota, preto pri nej zostaneme.

4. Z činiteľa zvlňenia určíme kapacitu kondenzátora

$$C = \frac{\pi - \Theta}{\omega R_z 0,2} \approx 89,3 \mu\text{F}.$$

Použijeme najbližšiu vyššiu vyrábanú hodnotu $100 \mu\text{F}$ (+30; -20) %. Pre ňu bude činiteľ zvlňenia $100/89,3 \cdot 20 \% = 17,9 \%$.

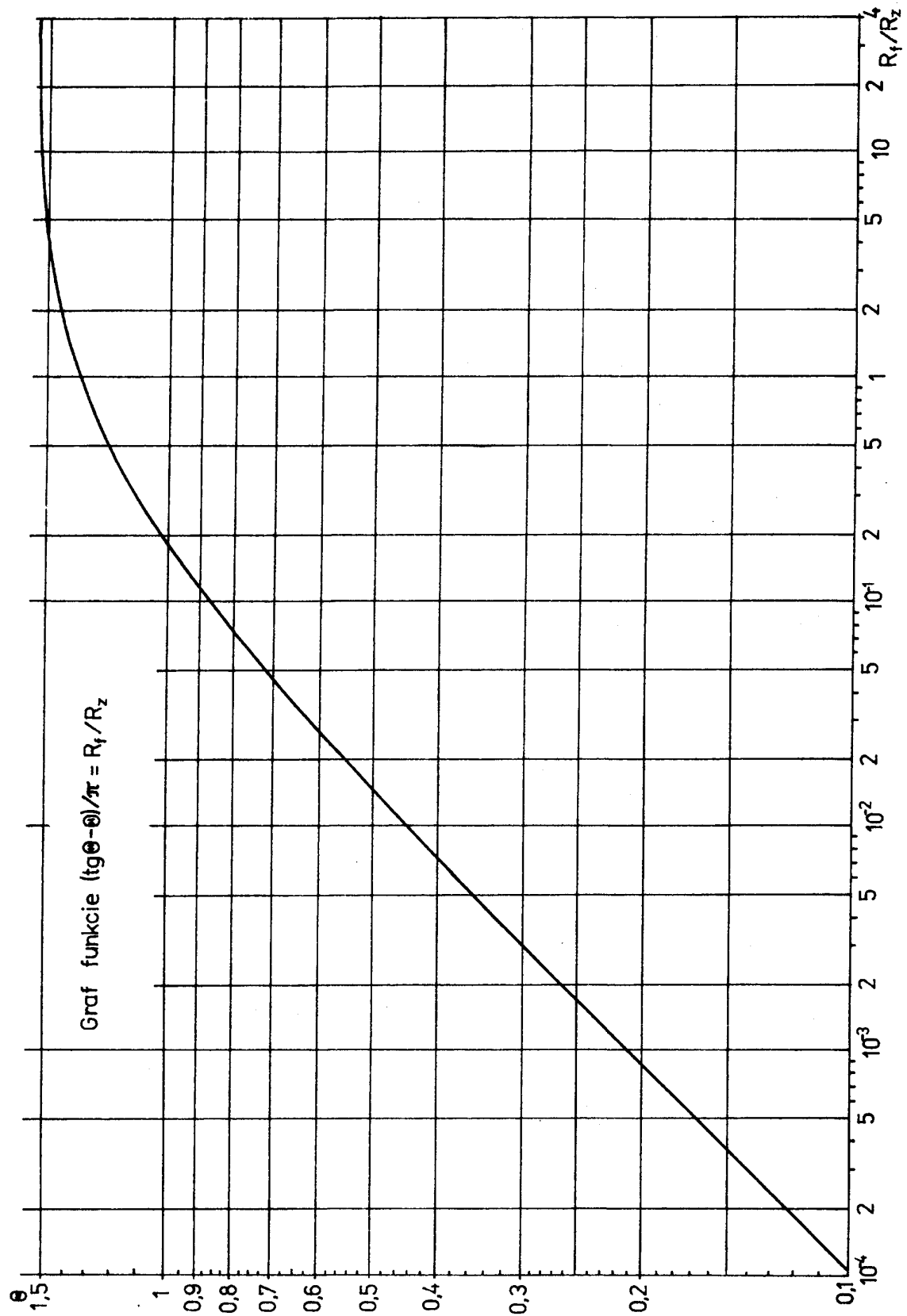
5. Určíme uhol nesymetrie

$$\alpha = \arctg \left(\frac{\Delta U}{U_s} \frac{1}{\operatorname{tg} \Theta} \right) \approx 0,472.$$

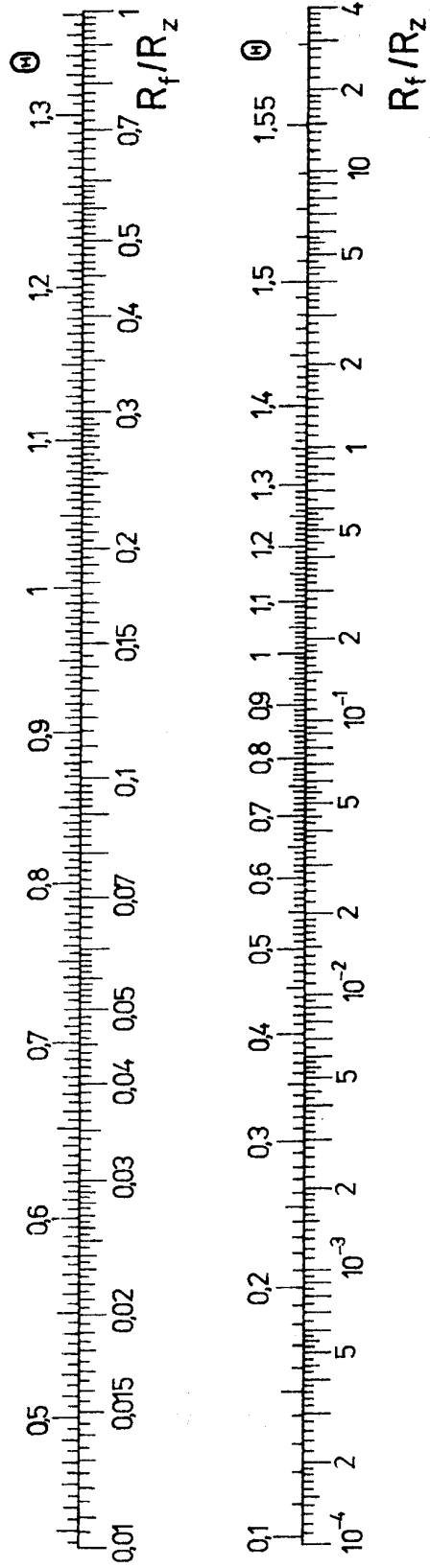
6. Určíme amplitúdu napájacieho striedavého napätia

$$E = \frac{U_s}{\cos \alpha \cos \Theta} = 17,8 \text{ V}.$$

K tejto hodnote treba pripočítať ešte otváracie napätie diódy $U_p = 0,7 + 0,03 \cdot \ln 0,42 \text{ V} = 0,67 \text{ V}$, ($I_m = 0,42 \text{ A}$). Amplitúda striedavého napätia zdroja musí teda byť $18,5 \text{ V}$, v skutočnosti je $25\sqrt{2} \text{ V} = 35,4 \text{ V}$, čo je temer dvojnásobok potrebnej hodnoty.



Obr. 57



Obr. 57a

V praxi je bežný postup – previniť transformátor, resp. navrhnuť transformátor k požadovanému usmerňovaču. Aby sme nemuseli pre jednotlivý prípad cvičenia v praxi použiť tento prácny postup, využijeme závislosť napätia U_s od uhla otvorenia, ktorý je funkciou odporu fáze R_f . Zmeníme hodnotu tohto odporu pridaním ďalšieho – zrážacieho odporu. V laboratórnej a technickej praxi sa tento postup používa iba výnimočne, lebo sa znižuje, teda zhoršuje účinnosť usmerňovača, rastie jeho výstupný odpor a transformátor je zbytočne veľký.

Z podmienok $U_s = E \cos \alpha \cos \Theta$ a $\Delta U = U_s \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \Theta$, vypočítame

$$\Theta = \operatorname{arctg} \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{E}{U_s}\right)^2 - \left(1 - \frac{\Delta U}{U_s}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{E}{U_s}\right)^2 - \left(1 + \frac{\Delta U}{U_s}\right)^2},$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{E}{U_s}\right)^2 - \left(1 - \frac{\Delta U}{U_s}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{E}{U_s}\right)^2 - \left(1 + \frac{\Delta U}{U_s}\right)^2}.$$

V našom prípade je $\Theta = 1,131$ a $\alpha = 0,094$.

Z grafu určíme $R_f/R_z = 0,317$, preto $R_f = 158,5 \Omega$. Vypočítame odpor diódy $R_d = 0,47 \Omega$. Hodnota zrážacieho odporu je $(158,5 - 0,47 - 1,96) \Omega = 156,05 \Omega$. Použijeme najbližšiu vyrábanú hodnotu (v E 24) $150 \Omega \pm 5 \%$ alebo $160 \Omega \pm 5 \%$.

Zopakujeme výpočet podľa bodov postupu 3. až 6. Dostaneme výsledky:

$$R_f = 152,45 \Omega; \quad R_f/R_z = 0,305; \quad \Theta = 1,123 \text{ rad}; \quad R_d = 0,47 \Omega; \quad C = 100 \mu\text{F};$$

$$\Delta U/U_s = 12,8 \%; \quad \alpha = 0,061 \text{ rad}; \quad U_p = 0,64 \text{ V}; \quad E = 35,35 \text{ V}.$$

Postup návrhu je zdĺhavý, pomerne komplikovaný, a to ide o jednoduchý nelineárny elektronický obvod.

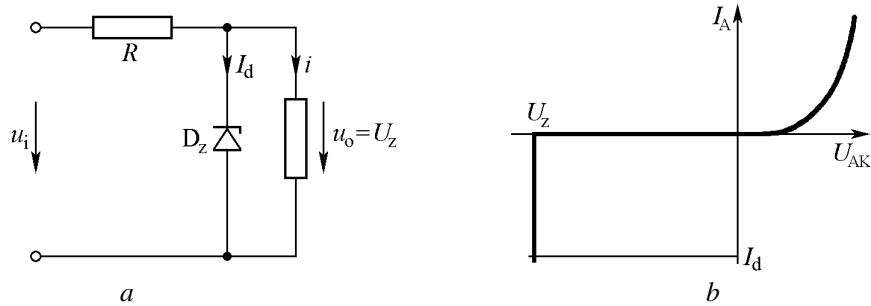
Úloha 14. K danému transformátoru navrhnete usmerňovač, ktorého usmernené napätie $U_s = 15 \text{ V}$, odoberaný prúd 50 mA , zvlnenie $\leq 20 \%$. Pokúste sa vypočítať výstupný odpor usmerňovača pre dané hodnoty U_s a I (predpokladajte malú zmenu odporu záťaže, ktorá vedie k zmene ΔU_s a ΔI . Podiel zmien je výstupný odpor).

Cvičenie 10. Zostavte usmerňovač navrhnutý v úlohe 14. Zmerajte jeho zaťažovaciu charakteristiku pre zaťažovací prúd $I \in \langle 0; 50 \rangle \text{ mA}$. Určte výstupný odpor usmerňovača a zvlnenie pre prúd $I = 30 \text{ mA}$.

8.2 Stabilizátor so Zenerovou diódou

Usmernené napätie, aj keď použijeme vyhladzovací kondenzátor, je zvlnené – obsahuje striedavé napätie, ktoré v mnohých prípadoch môže silne ovplyvňovať funkciu elektronických obvodov. Treba použiť ďalšie filtre, pri väčších odoberaných prúdoch vždy s tlmivkou. Pri malých prúdoch vyhoví namiesto pasívneho filtra jednoduchý stabilizátor so Zenerovou (lavínovou) diódou (obr. 58a), ktorej charakteristika (pozri výsledky úlohy 11 a cvičenia 7) je na obr. 58b.

V priepustnom smere sa správa Zenerova dióda ako obyčajná dióda. V závernom smere sa prúd cez diódu temer skokom zmení, ak anódové napätie dosiahne hodnotu U_z (Zenerovho napätia). Dynamický odpor (R_{dz}) diódy pri Zenerovom napätí je veľmi malý, takže v rozsahu prúdov I_{\min} až I_{\max} je napätie U_z prakticky konštantné.



Obr. 58

Napätie zdroja U_i môže kolísat' o $\Delta U_i = (I_{\max} - I_{\min})R$ (obr. 58a) pri zachovaní napätia U_z . Prúd I_{\min} (typické hodnota 5 mA) udáva výrobca. Pre prúdy $I < I_{\min}$ rastie R_{dz} a dióda je zdrojom šumu. I_{\max} je určený najväčším výkonom $I_{\max} \cdot U_z$, ktorý môže dióda bez poškodenia rozptýliť vo forme tepla.

Základný prúd I_D (pracovný bod) diódy sa volí blízko stredu rozsahu $\langle I_{\min}; I_{\max} \rangle$. Pri zmenách záťaže o ΔR_z sa mení prúd do záťaže o $\Delta I = -\Delta R_z U_z / R_z^2$ a o túto hodnotu sa mení aj prúd cez diódu. Podmienka pre veľkosť prúdu $I_{\min} \leq I_D + \Delta I \leq I_{\max}$, resp.

$$I_{\min} \leq \frac{u_i - U_z}{R} - \frac{U_z}{R_{z \min}}; \quad I_{\max} \geq \frac{u_i - U_z}{R} - \frac{U_z}{R_{z \max}}$$

musí zostať zachovaná. Pri návrhu stabilizátora preto treba poznať možné zmeny vstupného napätia stabilizátora a jeho záťaže.

Dynamický odpor diódy v zenerovej oblasti je síce malý, ale nie je nulový, preto pri zmene prúdu cez diódu sa bude meniť aj jej napätie U_z . Môžeme definovať činiteľ stabilizácie $K = du_i/du_o$ (obr. 58a). Z Kirchhoffovho pravidla pre prúdy platí

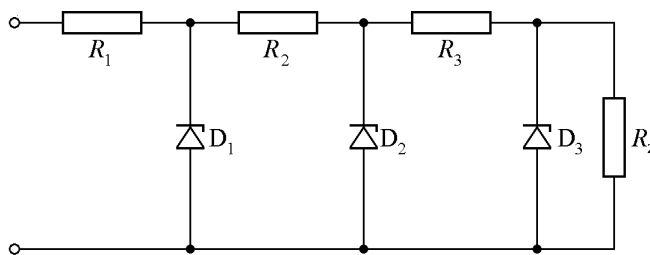
$$\frac{u_i - u_o}{R} = \frac{u_o}{R_z} + i_d(u_o), \quad \text{z toho} \quad u_i = u_o \left(1 + \frac{u_o}{R_z} \right) + R i_d(u_o).$$

Činiteľ stabilizácie stabilizátora zapojeného podľa obr. 58 je

$$K_s = \frac{du_i}{du_o} = 1 + \frac{R}{R_z} + R \frac{di_d(u_o)}{du_o} = 1 + \frac{R}{R_z} + \frac{R}{R_{dz}},$$

kde R_{dz} je dynamický odpor Zenerovej diódy. Činiteľ stabilizácie udáva, koľko krát je zmena vstupného napätia väčšia ako zmena výstupného napätia. Často sa definuje K_s' ako podiel relatívnych zmien napätí:

$$K_s' = \frac{\Delta u_i}{u_i} / \frac{\Delta u_o}{u_o} = \frac{u_o}{u_i} \frac{\Delta u_i}{\Delta u_o}.$$



Obr. 59

Pri väčších odoberaných prúdoch nemusí byť výstupné napätie jednoduchého stabilizátora z obr. 58a dostatočne vyhladené: V takom prípade možno použiť kaskádu stabilizátorov (obr. 59). Výsledný činiteľ stabilizácie je $K_s = K_{s1} \cdot K_{s2} \cdot K_{s3}$. Diódy však treba odstupňovať podľa zenerovho napätia aj výkonu $U_{z3} < U_{z2} < U_{z1}$. S rastúcim počtom stupňov klesá aj veľkosť možného prúdu do záťaže. V praxi je preto výhodnejšie použiť elektronický stabilizátor napätia (kap. 10.2.2).

Príklad: K usmerňovaču riešenému v kap. 8.1 pripojíme stabilizátor, ktorý má stabilizovať napätie 9 V na záťaži, ktorá odoberá prúd 10 mA.

Usmerňovač bol riešený pre odber 30 mA, preto prúd cez Zenerovu diódu bude $(30 - 10) \text{ mA} = 20 \text{ mA}$. Vhodnou Zenerovou diódou je napr. KZ 260/9V1, pre ktorú $P_{\max} = 1,3 \text{ W}$, $U_z = 9 \text{ V}$ (8,5 - 9,6), $I_{\min} = 5 \text{ mA}$, $I_{\max} = 115 \text{ mA}$, $R_{dz} < 4 \Omega$. Podľa obr. 58a. $R \cdot 30 \text{ mA} = u_i - u_z = (15 - 9) \text{ V} = 6 \text{ V}$. Teda $R = 200 \Omega$. $R_z = u_o/i = 9 \text{ V}/10 \text{ mA} = 900 \Omega$. $K_s = 1 + 200/900 + 200/4 = 51,22$. Činiteľ zvlnenia usmerňovača je 12,8 %, preto $\Delta u_i = 15,0,128 \text{ V} = 1,92 \text{ V}$.

$\Delta u_o = \Delta u_i/K_s = 1,92/51,22 \text{ V} = 37,5 \text{ mV}$, čo dáva pre činiteľa zvlnenia stabilizátora hodnotu $0,0375/9 = 0,41 \%$. Pri presnejšom výpočte by bolo treba započítať aj vplyv výstupného odporu usmerňovača.

Kontrola medzných hodnôt prúdov a výkonu Zenerovej diódy:

$$I_{\min} = (u_{i \min} - u_{z \min})/R = 10,6 \text{ mA}$$

$$I_{\max} = (u_{i \max} - u_{z \max})/R = 29,4 \text{ mA}$$

$$P_{\max} = I_{\max} \cdot u_{z \max} = 29,4 [\text{mA}] \cdot 9,0375 [\text{mV}] = 265,7 \text{ mW}, \text{ čo je } < 1,3 \text{ W}.$$

Úloha 15. K usmerňovaču riešenému v úlohe 14 a meranému v cvičení 10 navrhnete stabilizátor so Zenerovou diódou pre záťaž 10 mA pri 9 V.

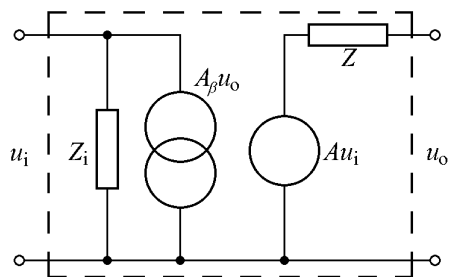
Cvičenie 11. K usmerňovaču z cvičenia 10 pripojte vami navrhnutý stabilizátor z úlohy 15 a zmerajte činiteľa stabilizácie pre zmenu záťaže (5 - 15) mA. Pozorujte osciloskopom časové priebehy napätí v rôznych uzloch obvodu.

9 OPERAČNÉ ZOSILŇOVAČE [9], str. 22 – 68

Operačný zosilňovač bol pôvodne vyvinutý ako univerzálny zosilňovací obvod na vytváranie lineárnych matematických operácií na analógovom počítači. Rozvoj technológie polovodičových prvkov umožnil vyrábať operačné zosilňovače ako integrované polovodičové súčiastky dobrých vlastností a nízkej ceny. Tým ovládol operačný zosilňovač konštrukciu analógových elektronických obvodov.

V praktických zapojeniach s operačnými zosilňovačmi sa temer vždy používa záporná spätná väzba, ktorej obvodové parametre sú rozhodujúce. Preto sa v rovniciach, opisujúcich elektronické obvody, parametre operačného zosilňovača uplatňujú ako príčiny chýb, a nie ako určujúce veličiny. Aj spracovanie signálu elektronickým obvodom je málo citlivé na rozptyl parametrov operačného zosilňovača.

Náhradná schéma všeobecného zosilňovača je na obr. 60. A_β je činiteľ spätného prenosu a u dobre navrhnutých zosilňovačov je $A_\beta = 0$. Ostatné parametre (všeobecne komplexné číslo) umožňujú stanoviť hlavne chyby, ktoré vnesie zosilňovač do elektronického obvodu po pripojení. Aby tieto chyby (ovplyvnenia) boli malé, musí byť $Z_i \rightarrow \infty$ a $Z_o \rightarrow 0$. Pridaním podmienky $A \rightarrow \infty$ sa stáva zo zosilňovača operačný zosilňovač.



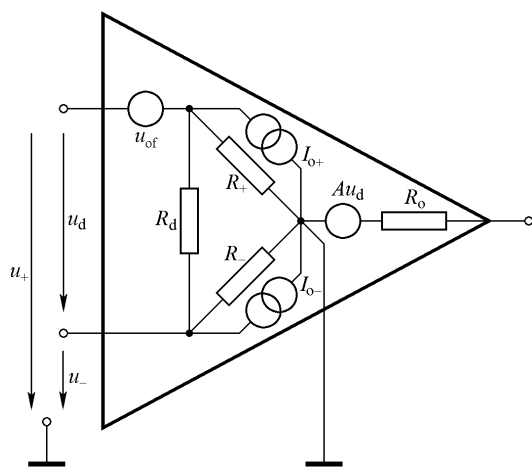
Obr. 60

Prakticky sa navrhujú a priemyselne vyrábajú integrované operačné zosilňovače ako trojstupňové tranzistorové diferenčné zosilňovače s dvojčinným koncovým stupňom. Operačný zosilňovač má dva vstupy: invertujúci (býva označený $-$, N a pod.) a neinvertujúci ($+$, P). Výstupné napätie operačného zosilňovača je kladné, ak je na vstup pripojené napätie s polaritou zodpovedajúcou znamienku vstupu. Výstupné napätie je teda úmerné rozdielu vstupných napätí $u_d = u_+ - u_-$.

Najkritickejšou časťou operačného zosilňovača je vstupný zosilňovací stupeň. Priamo určuje vstupné parametre a významne sa podieľa na prenosových aj výstupných parametroch. Operačné zosilňovače radu MAA 500 a 700, ktoré sú použité v praxi, majú tento vstupný zosilňovací stupeň konštruovaný

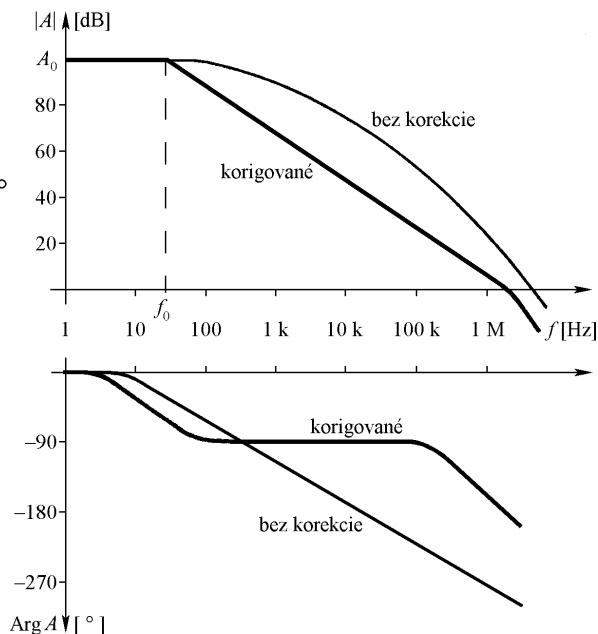
ako diferenčný zosilňovač a bipolárnymi tranzistormi. Vlastnosti dvoch vstupných tranzistorov sa trochu líšia, preto tento zosilňovací stupeň nie je úplne symetrický. Vstupy operačného zosilňovača sú priamo bázy vstupných tranzistorov, preto vstupné prúdy operačného zosilňovača sú rovné bázovým prúdom vstupných tranzistorov. Tieto vlastnosti vstupných častí operačného zosilňovača sú označované ako vstupný ofset.

Chybu spôsobenú vstupným ofsetom možno vykompenzovať pomocnými obvodmi, ktoré predpisuje výrobca. Pre presné aplikácie operačných zosilňovačov je väčšou chybou časová nestálosť ofsetu označovaná ako vstupný drift. Príčinou sú zmeny teploty (aj v mikroskopických rozmeroch samotného operačného zosilňovača), zmeny napájacích napätí a samovoľná časová zmena ako prejav starnutia. Pri náročných zapojeniach preto treba stabilizovať teplotu a napájacie napätie.



U_{of} napät'ový ofset (nesymetria)
 I_{o+}, I_{o-} prúdové ofsety $I_o = (I_{o+} + I_{o-})/2$
 $R_d = U_T/(I_{o+} + I_{o-})$ diferenčný odpor vstupov
 R_+, R_- vstupné odpory ($\approx 500 R_d$)
 A zosilnenie (A_0 je A pre $f \rightarrow 0$ Hz)
 R_o výstupný odpor

Obr. 61



Obr. 62

Zmeny starnutím sú nevratné, neopakovateľné a nie sú kumulatívne. Pre účely praktika môžeme temer vždy tieto zmeny zanedbať. Takisto môžeme zanedbať chyby spôsobené šumom, pretože v zapojeniach s operačnými zosilňovačmi v praktiku nemajú podstatný vplyv na ich vlastnosti.

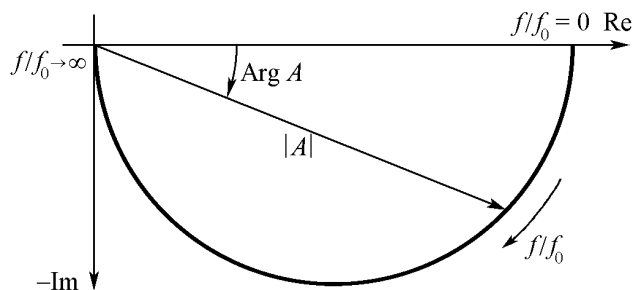
Operačný zosilňovač je predovšetkým zosilňovač jednosmerný. Jeho náhradná schéma (jedna z možných) je na obr. 61. Platí pre kmitočty $f \rightarrow 0$ Hz, ale prenášané sú aj premenné signály.

Každý zo zosilňovacích stupňov operačného zosilňovača predstavuje dolnofrekvenčný priepust (obr. 14). Výsledná kmitočtová charakteristika operačného zosilňovača je na obr. 62. Na vyšších kmitočtoch môže operačný zosilňovač obracať fázu o 180° a viac, čím sa pôvodne záporná spätná väzba, s ktorou vždy pracuje, zmení na kladnú a zapojenie sa rozkmitá. Preto treba amplitúdovú a hlavne fázovú charakteristiku korigovať pomocou kmitočtovo závislých korekčných článkov (obvykle RC obvody). Pozri obr. 62. Tieto korekčné obvody obvyčajne odporúča už výrobca.

Pre kompenzovaný operačný zosilňovač má amplitúdová charakteristika analytický tvar

$$A(jf) = \frac{A_0}{1 + jf/f_0}$$

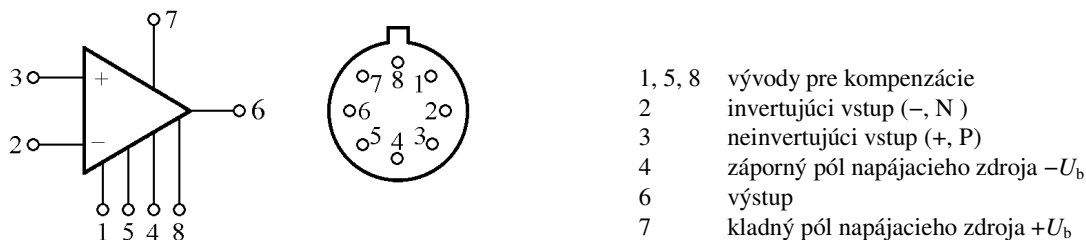
Pri tranzitnom kmitočte f_T je $|A(jf_T)| = 1$. Pre kmitočty vyššie ako f_T je zosilnenie operačného zosilňovača vždy menšie ako jedna. Graf závislosti $A(jf)$ je na obr. 63.



Obr. 63

Schematická značka operačného zosilňovača je na obr. 64. Čísla pripojovacích uzlov svoriek znamenajú poradové číslo vývodov päťice pri pohľade zo strany vývodov. Obvykle sa kreslia iba svorky 2, 3, 6 a schematické značka označuje vykompenzovaný operačný zosilňovač.

Model operačného zosilňovača na obr. 61 je linearizovaný model. Chyby linearizácie rastú so zväčšovaním vstupného a výstupného napätia a ich kmitočtu. Prevodová aj výstupná charakteristika operačného zosilňovača majú ostré zlomy, za ktorými lineárne parametre operačného zosilňovača strácajú zmysel. Výrobca udáva medzné hodnoty niektorých parametrov. Kým nie sú prekročené, možno operačný zosilňovač nahradiť jeho linearizovaným modelom.



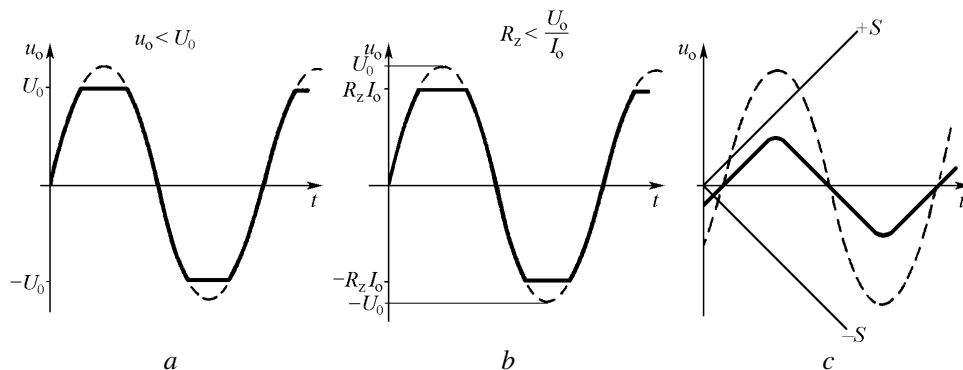
Obr. 64

Najdôležitejšie medzné parametre sú:

U_0 – menovitá hodnota výstupného napätia. Je to najväčšia hodnota výstupného napätia v lineárnej oblasti. Závisí od kmitočtu. Vznik nelinearity po prekročení U_0 ukazuje obr. 65a.

I_0 – menovitá hodnota výstupného prúdu. Pri zaťažovacom odpore R_z a prúde I_0 môže byť výstupné napätie v lineárnej oblasti, ale výstup je preťažený malým zaťažovacím odporom (obr. 65b).

S – rýchlosť prebehu. Je to najväčšia rýchlosť zmeny výstupného napätia v lineárnej oblasti. Ak je rýchlosť zmeny výstupného napätia väčšia ako S , nestačí už operačný zosilňovač túto zmenu sledovať, a tak sa výstupné napätie mení iba rýchlosťou S (obr. 65c).

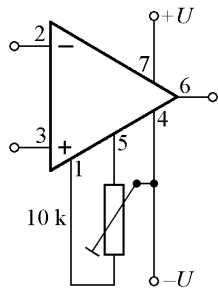


Obr. 65

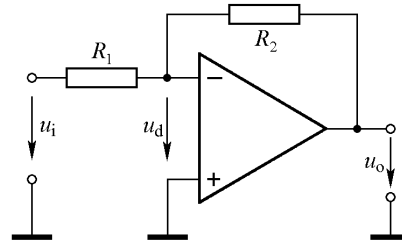
9.1 Použitie operačných zosilňovačov v lineárnej oblasti

V praxi budete používať operačný zosilňovač MAA 741. Z užívateľského hľadiska je najjednoduchší; z kompenzačných vonkajších obvodov potrebuje iba trimer na kompenzáciu napätvej nesymetrie vstupov. Na prípravkoch v praxi je operačný zosilňovač zapojený podľa obr. 66.

Postup kompenzácie napätvej nesymetrie vstupov je nasledovný: Po zapojení operačného zosilňovača do operačnej siete spojíme vstupy so „zemou“. Pripojíme napájacie napätie a trimrom 10 kΩ nastavíme výstupné napätie na hodnotu 0. Výstupné napätie meriame osciloskopom pri citlivosti 10 mV/diel v jednosmernom režime. Takto možno kompenzovať nesymetriu vstupov v rozsahu až ± 13 mV.



Obr. 66



Obr. 67

9.1.1 Invertujúci zosilňovač [9], kap. 23.3; 23.5; 29.2; 42.1

Priemerné hodnoty parametrov modelu operačného zosilňovača podľa obr. 61

$U_{of} \approx 1,5$ mV; $I_o \approx 80$ μ A; $R_d \approx 3$ MΩ; R_+ a $R_- \approx 600$ MΩ (preto ich väčšinou môžeme zanedbať); $A \approx 10^5$; $R_o = 60$ Ω.

Základné zapojenie operačného zosilňovača v lineárnom režime je na obr. 67. Ak použijeme na riešenie vlastností tohto zapojenia náhradnú schému operačného zosilňovača z obr. 60 a označíme $Z_i = R_d$, $Z_o = R_o$, $A_\beta = 0$, tak môžeme po mierne zdĺhavom výpočte odvodiť vzťahy:

$$\text{Pri označení} \quad K_{u0} = -\frac{R_2}{R_1}, \quad M = 1 + \frac{1}{A} + \frac{R_o}{AR_d} - \frac{K_{u0}}{A} \left(1 + \frac{R_1}{R_d} + \frac{R_o}{R_2} \right) \approx 1 - \frac{K_{u0}}{A}$$

je napät'ový prenos pre výstup naprázdno

$$K_u = K_{u0} \frac{1 - \frac{1}{A} \frac{R_o}{R_2}}{M} \approx \frac{K_{u0}}{1 - \frac{K_{u0}}{A}}$$

vstupný odpor pre výstup naprázdno

$$R_i = \frac{R_1}{1 + \frac{1}{M} \frac{K_{u0}}{A} \left(1 + \frac{R_o}{R_2} \right)} \approx \frac{R_1}{1 + \frac{K_{u0}}{A}}$$

a výstupný odpor pre vstup nakrátko

$$R_v = R_o \frac{\frac{1}{A} - \frac{K_{u0}}{A} \left(1 + \frac{R_1}{R_d}\right)}{M} \approx \frac{R_o K_{u0}}{A}.$$

Z týchto vzťahov vidno, že riešenie zapojení s operačným zosilňovačom s uvažovaním jeho reálnych parametrov vedie i v jednoduchých prípadoch na komplikované výrazy.

Aby signálové prúdy boli ovplyvňované pokojovými prúdmi zanedbateľne málo ($< 2\%$) treba voliť odpory R_1 a R_2 také, aby signálové prúdy boli aspoň 50-krát vyššie ako pokojové, t. j. boli $\geq 4 \mu\text{A}$. Najväčšia hodnota $R_2 \leq |U_b|/4 \mu\text{A} \approx 4 \text{M}\Omega$, kde $\pm U_b$ je jednosmerné napájacie napätie operačného zosilňovača.

V praxi, a väčšinou aj v praxi, je $K_u \leq 100$, takže po dosadení číselných hodnôt parametrov do odvodených vzťahov dostaneme výrazy:

$$|K_u| \approx K_{u0} = -R_2/R_1; \quad R_1 \approx R_2; \quad R \leq 0,06 \Omega \text{ (prakticky} = 0)$$

a podmienka pre R_1 je $R_1 \leq R_2 K_{u0}$

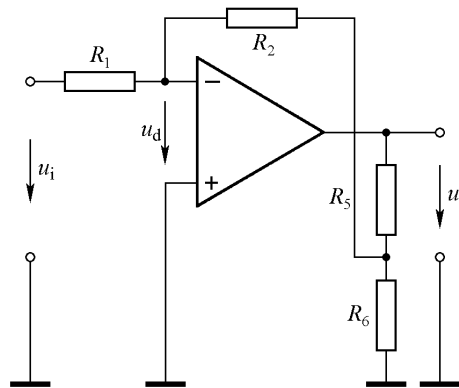
K takýmto výsledkom dospejeme oveľa rýchlejšie a bez prácného počítania takýmto postupom:

Analyzujeme zapojenie z obr. 67 s hodnotami parametrov ideálneho operačného zosilňovača $Z_i \rightarrow \infty$, $Z_o \rightarrow 0$, $A \rightarrow \infty$. Pretože $A \rightarrow \infty$, musí byť zavedená záporná spätná väzba, ktorá upraví zosilnenie na konečnú hodnotu. To robí **vždy** dvojica odporov R_1 , R_2 zapojená podľa obr. 67. Náhradná schéma tohto zapojenia je podobná obvodu z obr. 17a. Aby bolo u_o konečné (pretože $A \rightarrow \infty$), **musí byť** $u_d = 0$. Podľa príkladu z kap. 4.8 je

$$u_d = \frac{u_i R_2 + u_o R_1}{R_1 + R_2} = 0, \quad \text{z toho plynie vzťah pre} \quad K_u = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

Pretože (+) vstup je spojený so zemou (jeho potenciál je rovný nule) a $u_d = 0$, je napätie (-) vstupu $u_- = 0$. Vstupný prúd je $i = u_i/R_1$, teda vstupný odpor je $u_i/i = R_1$. Výstupný odpor zosilňovača so zápornou spätnou väzbou je $R_v = \frac{R_o}{1 - \beta A}$. Keďže $A \rightarrow \infty$; $-\infty < \beta < 0$, je $R_v = 0$.

Tento postup budeme naďalej používať v týchto návodoch. Je plne vyhovujúci aj v praxi pre bežne používané zapojenia. Len pri analýze náročnejších zapojení treba použiť presnejšie postupy.



Obr. 68

Vyššiu hodnotu vstupného odporu možno dosiahnuť zapojením podľa obr. 68 [9], kap. 23.6; 42.6. Podľa Théveninovej vety možno napätie na (-) vstupe od výstupu nahradiť zdrojom napätia

$$u_o \frac{R_6}{R_5 + R_6} \quad \text{s vnútorným odporom} \quad R_2 + \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}.$$

Výsledné napätie na (-) vstupe (pozri predošlý postup) je

$$u_d = \frac{u_i \left(R_2 + \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6} \right) + u_o \frac{R_6}{R_5 + R_6} R_1}{R_1 + R_2 + \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}} = 0.$$

Po úprave dostaneme pre

$$K_{u0} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R_5}{R_6} + \frac{R_5}{R_2} \right)$$

a $R_1 = R_1$.

Aby sme dosiahli vysoké hodnoty R_1 ($\geq 4 \text{ M}\Omega$), viažeme prenos K_u na pomer R_5/R_6 a volíme $R_1 = R_2$. Ľahko možno splniť podmienku $R_5 \ll R_2$.

Úloha 16. Navrhnete spôsob zobrazovania prevodovej charakteristiky zosilňovača osciloskopom.

Úloha 17. Navrhnete zosilňovač s operačným zosilňovačom MAA 741 podľa obr. 67 tak, aby zosilnenie bolo približne 5 a vstupný odpor zosilňovača bol väčší ako $10 \text{ k}\Omega$. S použitím prílohy a vzťahu pre f_H z kap. 9.1.2 určte šírku kmitočtového pásma navrhnutého zosilňovača.

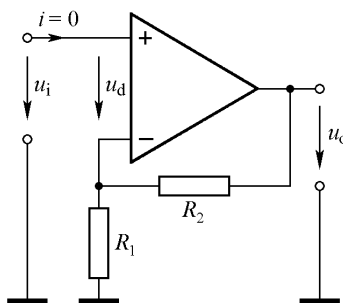
Cvičenie 12. Zapojte zosilňovač podľa vášho návrhu z úlohy 17. Vstupné napätie nastavte tak, aby pri kmitočte 1 kHz bolo výstupné napätie 1 V (efektívna hodnota pre harmonické napätie). Zmerajte zosilnenie. Zopakujte cvičenie pre efektívnu hodnotu výstupného napätia $0,4 \text{ V}$.

Cvičenie 13. Pri konštantnom vstupnom napätí z cvičenia 12 pozorujte a opíšte (ev. zmerajte) závislosť amplitúdy, fázového posunu a skreslenia tvaru výstupného napätia od kmitočtu v rozsahu 20 Hz až 100 kHz . Určte a zdôvodnite hraničný kmitočet zosilňovača.

9.1.2 Neinvertujúci zosilňovač [9], kap. 27.2; 42.8; 29.1

Zapojenie z obr. 67 upravíme podľa obr. 69. Na riešenie použijeme model ideálneho operačného zosilňovača, preto musí byť $u_d = 0$. Z obr. 69 ľahko určíme

$$u_d = u_i - \frac{u_o}{R_1 + R_2} R_0 = 0.$$



Obr. 69

Po úprave určíme:

$$\text{Činiteľ napät'ového prenosu } K_u = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1},$$

$$\text{vstupný odpor } R_i \rightarrow \infty, \text{ pretože } R_i \approx R_d \left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) A,$$

$$\text{výstupný odpor } R_v = 0, \text{ pretože } R_v \approx R_o \frac{K_u}{A} \approx 60 \text{ m}\Omega.$$

Doteraz uvedené vzťahy platia pre nízke kmitočty, keď je A vysoké. Podľa obr. 62 od kmitočtu $f > 10$ Hz sa budú chyby vnesené konečnými hodnotami parametrov operačného zosilňovača zväčšovať. V praxi sa to prejaví poklesom činiteľa napät'ového prenosu K_u a zväčšovaním fázového posunu medzi výstupným (u_o) a vstupným (u_i) napätím. Začne sa uplatňovať aj konečná rýchlosť prebehu – signál sa začne nelineárne (tvarovo) skresľovať. Hraničný kmitočet f_H možno určiť z podmienky poklesu prenosu napätia na úroveň $1/\sqrt{2}$. Do vzťahu pre prenos (kap. 9.1.1)

$$K_u = \frac{K_{u0}}{1 - K_{u0}/A}$$

dosadíme vzťah pre kmitočtovú závislosť (kap. 9)

$$A(f) = \frac{A_0}{1 + f/f_0}$$

a z podmienky $K_u/K_{u0} = 1/\sqrt{2}$ dostaneme vzťah pre hraničný kmitočet

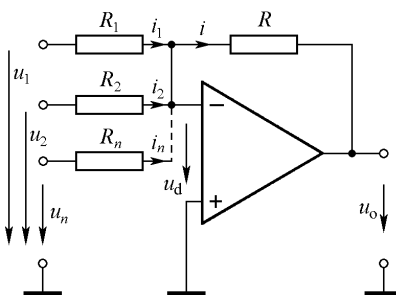
$$f_H = \frac{A_0 f_0}{K_{u0}}.$$

Cvičenie 14. Zapojenie z cvičenia 12 a 13 zmeňte na zapojenie podľa obr. 69. Podľa vášho návrhu z úlohy 16 zobrazte prevodovú charakteristiku zosilňovača pri kmitočte 20 Hz (amplitúda vstupného napätia $> U_b/K_u$). Zo zobrazenia určte dynamický rozsah zosilňovača a jeho zosilnenie.

9.1.3 Sčítavací zosilňovač [9], kap. 23.4; 42.4

Napätie invertujúceho vstupu ($-$) zapojenia z obr. 70 je $u_- = u_d = 0$. Podľa Kirchhoffovho pravidla pre prúdy je

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_n = \frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \dots + \frac{u_n}{R_n}.$$



Obr. 70

Pretože výstupné napätie je určené prúdom i , je

$$u_o = -iR = -R \left(\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \dots + \frac{u_n}{R_n} \right).$$

Ak volíme $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$, potom je výstupné napätie $u_o = -(u_1 + u_2 + \dots + u_n)$.

Zapojenie umožňuje sčítavanie napätí.

Vo všetkých doterajších zapojeniach s operačnými zosilňovačmi sme neuvažovali s vplyvom vstupných pokojových prúdov – zanedbávali sme ho. Pretože sme na (+) a (-) vstupy pripájali nerovnako veľké odpory, zvyšovali sme vstupnú nesymetriu, ktorá sa v niektorých prípadoch nebude dať vykompenzovať 10 kΩ trimrom. Musíme preto voliť úpravu zapojení, ktorá ich činnosť nemení, ale nesymetriu nezväčšuje. Do (+) vstupu zaradíme odpor, na ktorom vstupný kľudový prúd i_+ vyvolá rovnaký spád napätia, ako prúd i_- na odpore vo vstupe (-). Napr. pre zapojenie z obr. 70 musíme do (+) vstupu zaradiť odpor s veľkosťou

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

Hovorí sa tomu kompenzácia prúdového offsetu.

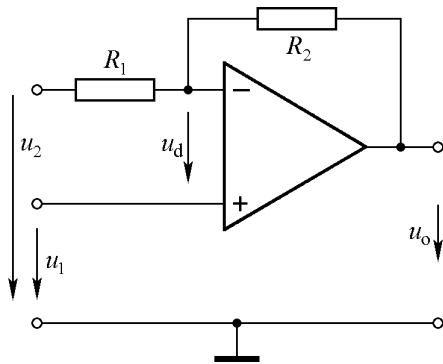
Úloha 18. Navrhňte sčítavací zosilňovač podľa obr. 70 na sčítavanie dvoch napätí. Vstupný odpor každého vstupu nech je väčší ako 10 kΩ.

Cvičenie 15. Zostavte sčítavací zosilňovač podľa vášho návrhu z úlohy 18. Sčítavajte dve jednosmerné, jednosmerné a striedavé, dve striedavé napätia rôznych kmitočtov. Súčty napätí sledujte osciloskopicky a vyhodnoťte.

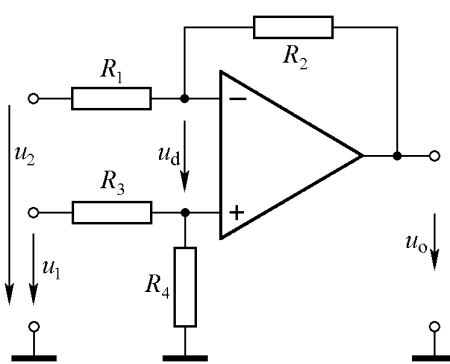
9.1.4 Rozdielový zosilňovač [9], kap. 25.1; 42.13

V zapojení podľa obr. 71 je výstupné napätie

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



Obr. 71



Obr. 72

Výstupné napätie je úmerné rozdielu vstupných napätí, ale činiteľ napäťového prenosu z neinvertujúceho (+) vstupu je vyšší. Zaradením odporového deliča (obr. 72) možno prenos z (+) vstupu upraviť tak, aby sa čo do veľkosti rovnal činiteľu napäťového prenosu z neinvertujúceho (-) vstupu. Výstupné napätie zapojenia z obr. 72 je

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

Z podmienky rovnosti veľkosti prenosov

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_2}{R_1}$$

vyplýva po úprave vzťah $R_1 R_4 - R_2 R_3 = 0$, ktorý pripomína podmienku vyváženia Wheastoneovho mostíka. Potom

$$u_o = \frac{R_2}{R_1} (u_1 - u_2),$$

zosilňovač prenáša iba rozdiel vstupných napätí.

Ak nie je dodržaná správna hodnota odporov R_3 a R_4 , tak po trochu dlhšom počítaní môžeme vzťah pre výstupné napätie upraviť na tvar:

$$u_o = \frac{(u_1 - u_2)(2R_2R_4 + R_1R_4 + R_2R_3) + (u_1 + u_2)(R_1R_4 - R_2R_3)}{2R_1(R_3 + R_4)} = K_- (u_1 - u_2) + K_+ (u_1 + u_2).$$

Zapojenie prenáša rozdiel aj súčet vstupných napätí. Prenášaný súčtový signál je signálom rušivým. Jeho prenos treba potlačiť na minimum. $K_+ = 0$ je podmienka potlačenia súčtového signálu. V praxi sa zavádza činiteľ potlačenia súčtového signálu (CMRR) ako $CMRR = 20 \log(K_+/K_-)$.

Nevýhodou jednostupňového rozdielového zosilňovača je, že nemožno súčasne splniť podmienku $K_+ = 0$, kompenzácie prúdového offsetu a rovnakých vstupných odporov. Naviac sa situácia komplikuje, ak treba použiť rozdielový zosilňovač s premenným zosilnením. Určité zlepšenie prináša úprava podľa obr. 68, ale tiež nevedie k uspokojivému riešeniu náročnejších zapojení. Kvalitný rozdielový zosilňovač možno navrhovať s najmenej dvoma operačnými zosilňovačmi.

Úloha 19. Navrhnete rozdielový zosilňovač s úpravou podľa obr. 68. Odporový delič R_5 , R_6 nech tvorí potenciometer 10 k Ω . Rozdiel vstupných odporov nech je najviac $\pm 10\%$.

Cvičenie 16. Zostavte vami navrhnutý rozdielový zosilňovač z úlohy 19. Presvedčte sa, že prenáša hlavne rozdiel vstupných napätí a nastavte jeho zosilnenie na hodnotu 10.

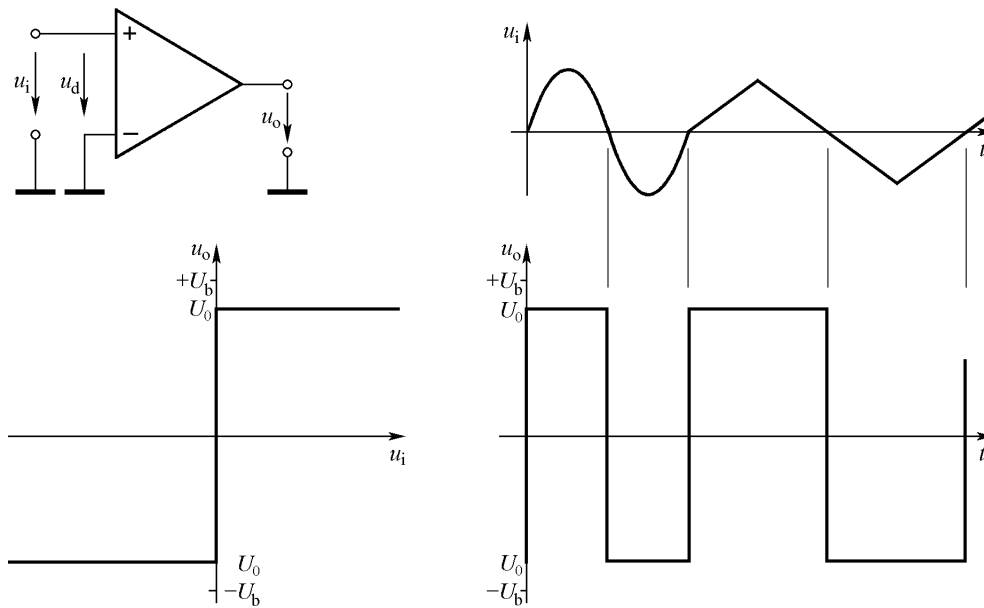
Cvičenie 17. Zmerajte úroveň potlačenia súčtového signálu rozdielového zosilňovača z cvičenia 16 pri kmitočte 1 kHz. Ako by ste zvýšili úroveň potlačenia súčtového signálu?

9.2 Nelineárne použitie operačných zosilňovačov

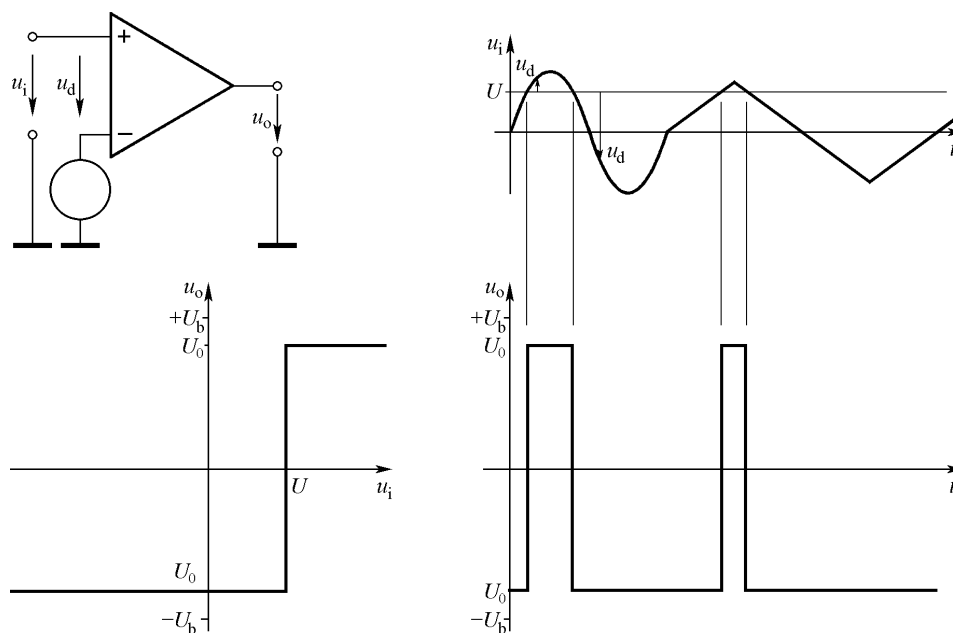
9.2.1 Komparátor

Pri prekročení vstupného dynamického rozsahu operačného zosilňovača (stačí na to $u_d > 0,2$ mV) pracuje tento v stave nasýtenia výstupu. Veľkosť výstupného napätia v tomto režime nezávisí od veľkosti vstupného napätia, ale iba od veľkosti napájacieho napätia $\pm U_b$. Výstupné napätie sleduje polaritu vstupného (u_d) napätia. K zmene stavu výstupného napätia prichádza pri zmene polaritu u_d (prechodom cez nulu). Operačný zosilňovač sa správa ako analógový komparátor.

Zapojenie a chovanie sa jednoduchého komparátora s operačným zosilňovačom ukazuje obr. 73.



Obr. 73



Obr. 74

Napätie, s ktorým bude komparátor porovnávať vstupné napätie, možno priviesť na druhý vstup operačného zosilňovača a môže sa aj regulovateľne meniť. Zapojenie a priebehy napätí sú na obr. 74. Komparátor mení výstupné napätie (preklápa sa) v okamihu, keď u_d prechádza nulou (mení polaritu).

Zmenou veľkosti napätia U možno meniť striedu výstupného obdĺžnikového napätia.

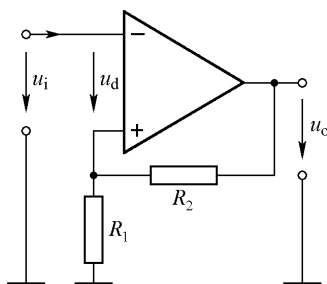
Úloha 20. Navrhnete komparátor v zapojení podľa obr. 74 s ochranou vstupov podľa obr. 77. Napätia U odvodíte z $\pm U_b$ potenciometrom 10 k Ω . V navrhnutom komparátore nech je $U = +1$ V a amplitúda u_i nech je 1 V_{ef} (harmonické napätie). Vypočítajte striedu (pomer doby trvania kladného a záporného napätia počas jednej periódy) výstupného napätia (použite obr. 74).

Cvičenie 18. Zostavte komparátor podľa vášho návrhu z úlohy 20. Pozorujte a vysvetlite tvar prevodovej charakteristiky pre rôzne napätia $U \in \langle -U_b, +U_b \rangle$.

Cvičenie 19. Pozorujte a vysvetlite priebeh výstupného napätia komparátora z cvičenia 18 pre rôzne napätia U a harmonické napätie u_i , ktorým zvonku synchronizujete časovú základňu osciloskopu.

9.2.2 Komparátor s hysterézou

Iný druh komparátora s operačným zosilňovačom vznikne zavedením kladnej spätnej väzby podľa obr. 75.

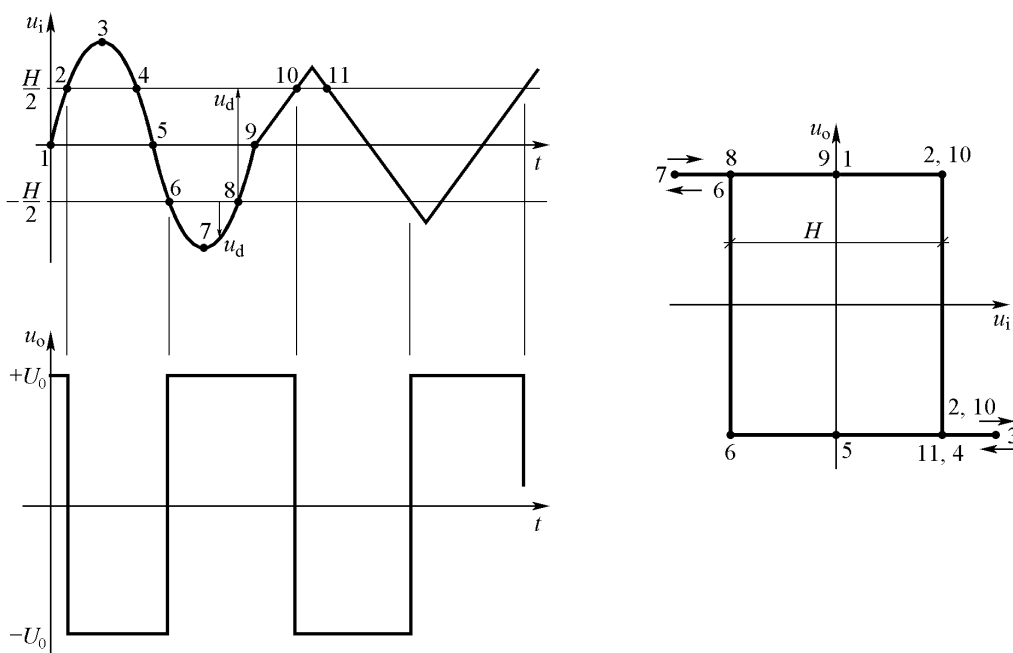


Obr. 75

Po pripojení napájacích napätí $\pm U$ sa vplyvom rušivých polí objaví nejaké napätie u_d dostatočnej veľkosti, aby komparátor prešiel do jedného z nasýtených stavov výstupného napätia. Nech je to napr. $u_o = -U_0$. Na vstup (+) sa cez odporový delič dostáva napätie

$$u_+ = -U_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

ktoré udrží komparátor v danom stave.



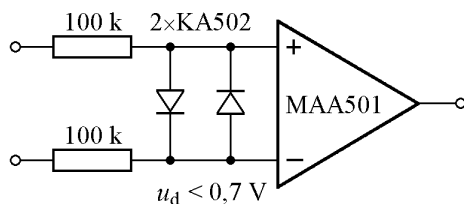
Obr. 76

Podľa Kirchhoffovho pravidla pre napätia je $u_i = u_d + u_+$. Komparátor sa preklolí, ak napätie u_d zmení polaritu (prejde nulovou hodnotou), a $|u_i| > |u_+|$. Výstupné napätie sa skokom zmení z $-U_0$ na $+U_0$ (alebo naopak, podľa daného stavu) a na vstupe (+) sa tiež skokom zmení napätie z u_+ na $-u_+$ a kým napätie u_i nedosiahne vhodnú veľkosť a polaritu, zostáva komparátor v nezmenenom stave.

Vplyvom kladnej spätnej väzby sa prepínacie napätia líšia, komparátor má hysterézu (obr. 76)

$$H = 2U_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Rýchlosť zmeny výstupného napätia – preklopenie komparátora – je určená rýchlosťou prebehu. Preto je výhodné použiť rýchle operačné zosilňovače rady MAA 500 a nekompenzovať ich prenosovú charakteristiku, čo im ponechá vysokú rýchlosť. Nevýhodou je, že operačné zosilňovače rady MAA 500 znesú vstupné napätie $|u_d| < 5$ V. Vstupy treba chrániť, napr. zapojením podľa obr. 48d (spomeňte si na tvar VA charakteristiky). Základné zapojenie komparátora s chránenými vstupmi je na obr. 77.



Obr. 77

Pri komparátoroch s hysterézou treba voliť spätnú väzbu tak, aby sa na vstup (+) dostalo napätie (podľa výrobcu musí byť U_+ , $U_- \leq 10$ V)

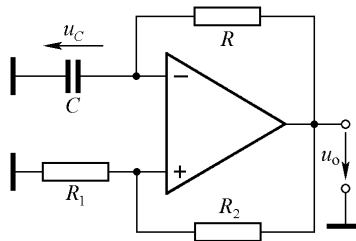
$$\left| \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right| \leq 10 \text{ V}.$$

Úloha 21. S použitím ochrany podľa obr. 77 navrhnete komparátor s hysterézou (obr. 75). Použite $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$ a R_1 ako sériovú kombináciu odporu $1 \text{ k}\Omega$ a potenciometra $10 \text{ k}\Omega$. Tým môžete meniť hysterézu, vypočítajte v akom rozsahu.

Cvičenie 20. Zopakujte cvičenia 18 a 19 pre zapojenie z úlohy 21.

9.2.3 Multivibrátor

Doplníme komparátor s hysterézou integračným RC obvodom podľa obr. 78.



Obr. 78

Po pripojení napájacích napätí $\pm U_b$ je $u_c = 0$ a komparátor sa celkom náhodne preklolí do niektorého nasýteného stavu výstupného napätia. V čase $t = 0$ nech je to $+U_0$. Týmto napätím sa začne cez odpor R nabíjať kondenzátor C . Jeho napätie časom rastie $u_c = U_0(1 - e^{-t/RC})$

Napätie medzi vstupmi operačného zosilňovača sa tiež mení a je

$$u_d = U_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2} - u_c.$$

Pri prechode u_d cez nulu sa komparátor preklolí. Výstupné napätie sa zmení na $-U_0$, na (+) vstupe sa objaví napätie

$$u_+ = -U_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

a kondenzátor sa začne nabíjať prúdom opačného smeru. Priebehy napätí a činnosť multivibrátora ukazuje obr. 79.

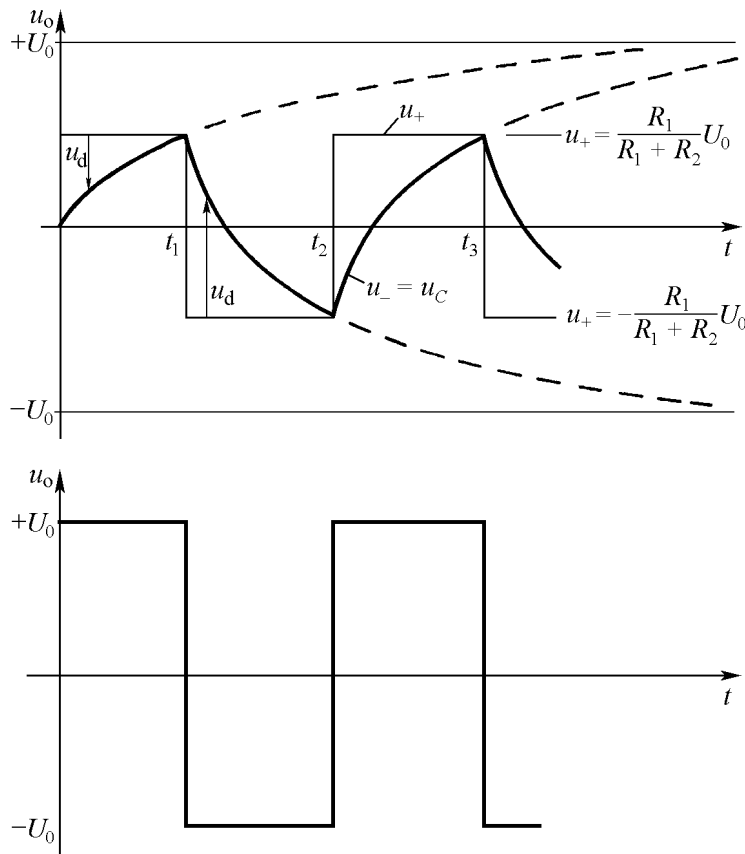
V čase od t_1 po t_2 sa mení napätie na kondenzátore takto:

$$u_c = u_c(t_1) - [u_c(t_1) + U_0][1 - e^{-(t-t_1)/RC}], \quad t \in \langle t_1, t_2 \rangle.$$

V čase t_2 prejde napätie u_d cez nulovú hodnotu. Komparátor sa preklolí a kondenzátor sa začne nabíjať kladným napätím. Napätie na kondenzátore

$$u_c = u_c(t_2) + [-u_c(t_2) + U_0][1 - e^{-(t-t_2)/RC}], \quad t \in \langle t_2, t_3 \rangle$$

rastie až do času t_3 , keď sa komparátor preklolí a celý dej sa opakuje.



Obr. 79

Teraz už ľahko určíme opakovací kmitočet multivibrátora. Za dobu pol periódy $T/2$ sa zmení napätie na kondenzátore o $2\frac{R_1}{R_1 + R_2}U_0$ s časovou konštantou RC , pri napätí nabíjacieho zdroja $U_0 + \frac{R_1}{R_1 + R_2}U_0$. Medzi týmito hodnotami (ide o prechodový jav) platí vzťah

$$2\frac{R_1}{R_1 + R_2}U_0 = U_0\left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right)\left(1 - e^{-T/2RC}\right),$$

ktorý po úprave poskytne vzťah pre dĺžku periódy

$$T = 2RC \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right).$$

Opakovací kmitočet multivibrátora možno teda meniť buď zmenou časovej konštanty integračného člena, alebo zmenou veľkosti spätnej väzby komparátora.

Pri praktickom návrhu multivibrátora treba pamätať na to, že rýchle operačné zosilňovače radu MAA 500 znesú najviac 5 V napätie medzi vstupmi a ochrana diódovým obmedzovačom (podľa obr. 77) je nevhodná, lebo má vplyv na opakovací kmitočet. Preto treba navrhovať odpory vo vetve komparátora tak, aby

$$u_{d\max} = 2\frac{R_1}{R_1 + R_2}U_0 < 5 \text{ V}.$$

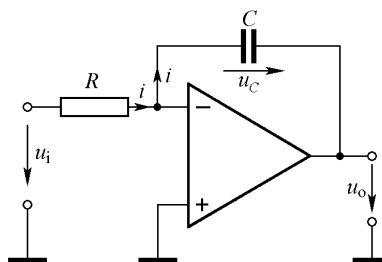
Úloha 22. Multivibrátor zapojený podľa obr. 78 má odpory R_1 a R_2 rovnaké ako komparátor z úlohy 21. R je sériová kombinácia odporu 10 k Ω a potenciometra 100 k Ω , $C = 100$ nF. Vypočítajte najnižší a najvyšší kmitočet multivibrátora.

Cvičenie 21. Zostavte multivibrátor navrhnutý v úlohe 22. Pozorujte a vysvetlite vplyvy zmien veľkosti každého z potencietrov na priebehy napätí na oboch vstupoch a výstupe operačného zosilňovača.

Cvičenie 22. Zmerajte najnižší a najvyšší kmitočet multivibrátora a porovnajte ich s výsledkom úlohy 22. Vysvetlite prípadné rozdiely.

9.2.4 Generátory tvarových priebehov

Preskúmame obvod na obr. 80. Výstupné napätie je $u_o = -u_c$. Prúdom $i = u_i/R$ sa nabíja kondenzátor C a jeho napätie je $u_c = (1/C)\int idt - u_p$, kde u_p je začiatočná hodnota napätia u_o v okamihu pripojenia zdroja napätia u_i .



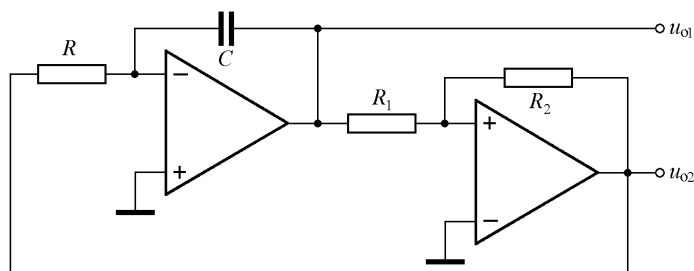
Obr. 80

Po pripojení napätia u_i je výstupné napätie

$$u_o = u_p - \frac{1}{C} \int \frac{u_i}{R} dt = -\frac{1}{RC} \int u_i dt.$$

Obvod vykonáva matematickú operáciu integrácie vstupného napätia podľa času, preto sa nazýva integrátor [9], kap. 23.10; 29.3; 42.12.

Praktické zostavenie integrátora je chýlostivá záležitosť, pretože vplyvy offsetu operačného zosilňovača a zvodového odporu kondenzátora sú veľmi výrazné. Samotný integrátor preto nebudeme v praxi merať, ale použijeme ho v spojení s komparátorom, kde si už nevyžaduje žiadne práce zásahy (obr. 81).

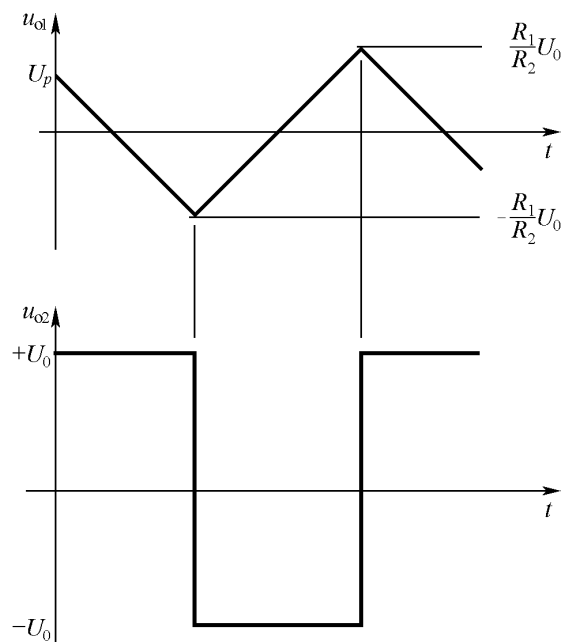


Obr. 81

Po zapnutí zdrojov sa na výstupe komparátora objaví napätie $|u_{o2}| = U_0$. Predpokladajme, že $u_{o2} = +U_0$, ktoré je súčasne vstupným napätím integrátora. Výstupné napätie integrátora je

$$u_{o1} = u_p - \frac{1}{RC} \int U_0 dt = u_p - \frac{U_0 t}{RC}$$

(čas počítame od okamihu preklopenia) a súčasne je vstupným napätím komparátora. Komparátor sa preklopí, ak u_d prechádza nulovou hodnotou. Podľa príkladu z kap. 4.8 tomu zodpovedá $u_{o1} = -R u_{o2} / R_2$. Vstupné napätie integrátora zmení polaritu na $-U_0$. Výstupné napätie integrátora je $u_{o1} = u_p + U_0 t / RC$ (čas zase počítame od okamihu preklopenia). Priebehy napätí sú na obr. 82.

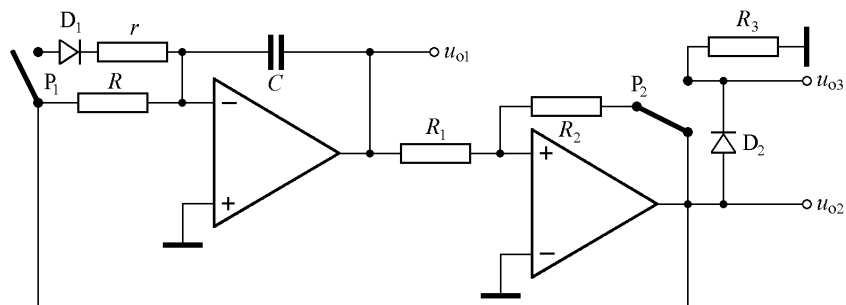


Obr. 82

V ustálenom režime je $u_p = u_{o2} R_1 / R_2$. Opakovací kmitočet možno určiť pomocou obr. 82. Za dobu $T/2$ sa zmení u_{o1} o hodnotu $2U_0 R_1 / R_2$, preto

$$\frac{U_0}{RC} \frac{T}{2} = 2 \frac{R_1}{R_2} U_0, \quad \text{z toho po úprave je} \quad T = 4RC \frac{R_1}{R_2}.$$

Oproti multivibrátoru má toto zapojenie výhodu v tom, že zmena kmitočtu môže byť viazaná na zmenu odporu R_2 , a preto môže byť lineárnou funkciou nastavenia ovládacieho prvku.

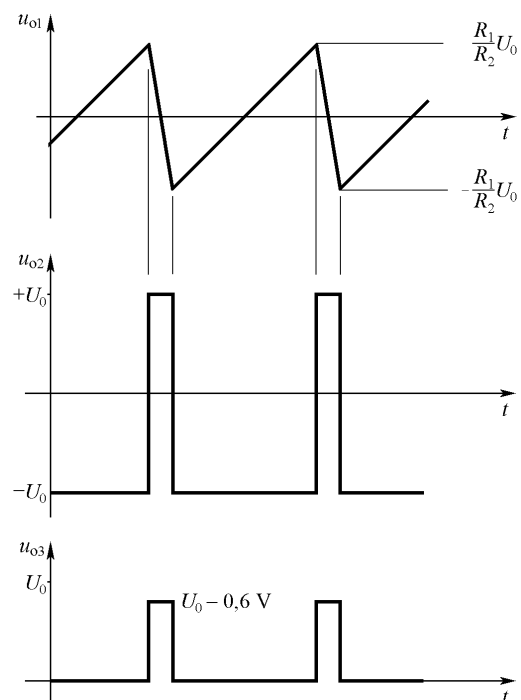


Obr. 83

Úpravami (obr. 83) tohto základného zapojenia možno okrem trojuholníkového a obdĺžnikového tvaru získať ďalšie tvary napätí.

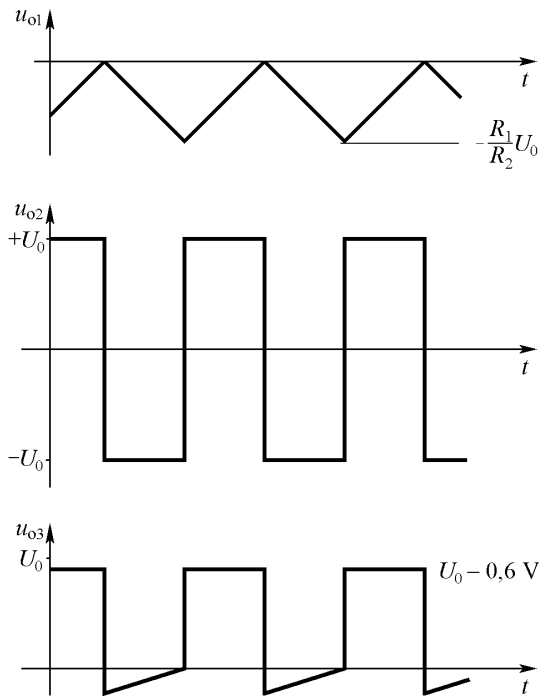
A. Ak sú prepínače P_1 , P_2 v naznačenej polohe (obr. 83) u_{o1} a u_{o2} sú nezmenené voči základnému zapojeniu (obr. 81). Pribudlo napätie u_{o3} , ktoré je odvodené od u_{o2} . Dióda „odreže“ záporné pulzy, takže u_{o3} sú kladné obdĺžnikové pulzy s napätím

$$\begin{aligned} u_{o3} &= u_{o2} - 0,6 \text{ V} & \text{pre} & \quad u_{o2} > 0 \\ u_{o3} &= 0 & \text{pre} & \quad u_{o2} < 0. \end{aligned}$$

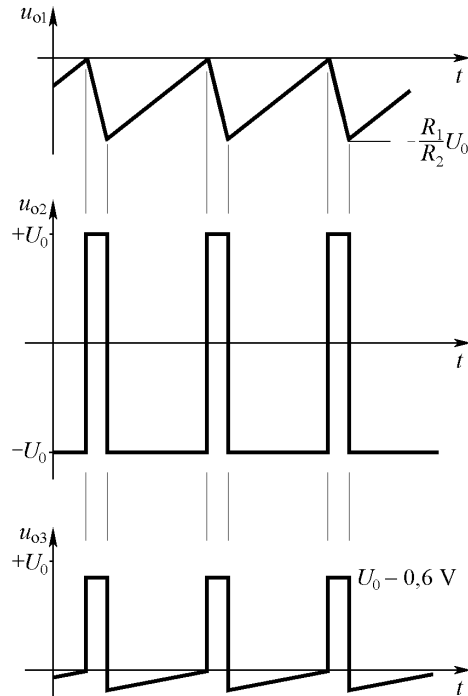


Obr. 84

B. Po zapnutí P_1 sa tvary napätí zmenia (obr. 84). Pre $u_{o2} > 0$ sa kondenzátor C nabíja cez odpor $rR/(r + R) < R$, preto je zmena u_{o1} rýchlejšia a dosiahne preklápacie napätie komparátora skôr.



Obr. 85



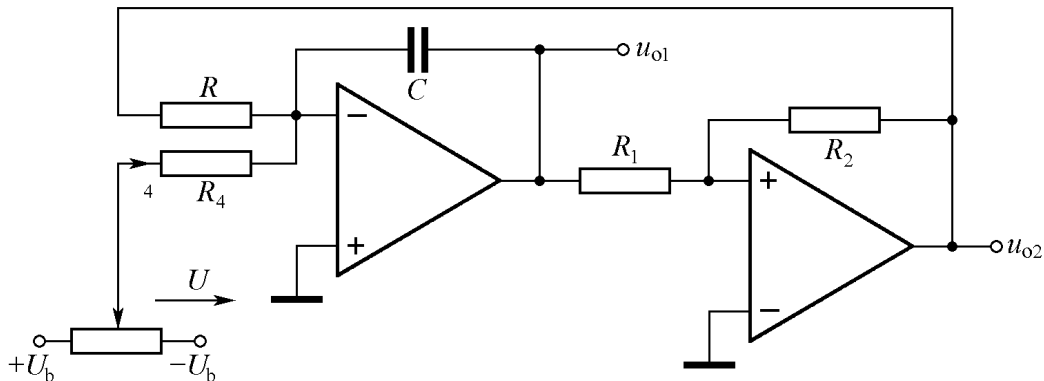
Obr. 86

C. Pri vypnutom P_1 a prepnutí P_2 na diódu sa zmenia pomery na komparátore. Pre $u_{o2} > 0$ je činnosť generátora rovnaká ako v základnom stave. Pre $u_{o2} < 0$ je dióda D_2 uzavretá a odpojí (rozopne) kladnú spätnú väzbu. Prepínacie napätie komparátora je rovné nule a napätie u_{o1} sa deličom R_1, R_2, R_3 dostáva až na výstup (obr. 85)

$$u_{o3} = \left(\frac{t}{RC} - \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} U_0$$

D. Pri zapnutom P_1 a P_2 prepojenom na diódu D_2 sa podobne ako v prípade B zmení časová konštanta integrátora pre $u_{o2} > 0$ a zostupná časť napätia u_{o1} sa urýchli (obr. 86).

Zmenou polarítu jednej alebo oboch diód možno ďalej meniť tvary výstupných napätí. Možno využiť sčítavacie vlastnosti (-) vstupu integrátora úpravou podľa obr. 87. Zmenou napätia potenciometrom P možno meniť veľkosť nabíjacieho prúdu kondenzátora o prúd i_4 . Kladný prúd i_4 urýchľuje nabíjanie kondenzátora pre $u_{o2} > 0$ a spomaľuje pre $u_{o2} < 0$.



Obr. 87

Napätie

$$u_{o1} = \frac{u_{o2}}{RC} t \left(1 + \frac{U}{u_{o2}} \frac{R}{R_4} \right).$$

Zmenou napätia U možno meniť triedu výstupných napätí. Pri návrhu však treba pamätať na to, aby $|i_4| < U_0/R$.

Operačný zosilňovač integrátora pracuje v lineárnom režime, preto možno použiť MAA 741. Operačný zosilňovač komparátora musí byť rýchly, treba použiť niektorý z radu MAA 500 a odpory R_1 a R_2 voliť tak, aby $u_{d\max} < 5$ V. Kmitočet generátora tvarových priebehov možno meniť zmenou odporu R .

Úloha 23. V zapojení podľa obr. 83 sú $R_1 = R_3 = 10$ k Ω , $R_2 = 47$ k Ω , $R = 1$ k Ω , R a C sú rovnaké ako u multivibrátora z úlohy 22. Vypočítajte najnižší a najvyšší možný kmitočet pre rôzne kombinácie zapojenia prepínačov P_1 s P_2 .

Cvičenie 23. Zapojte generátor podľa obr. 83e hodnotami parametrov prvkov z úlohy 23. Zistite kmitočtový rozsah a tvary výstupných napätí pre rôzne kombinácie zopnutí spínačov P_1 a P_2 a polarít diód.

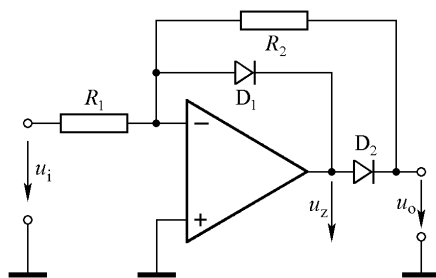
Cvičenie 24. Upravte zapojenie generátora podľa obr. 87, kde $R_4 = 100$ k Ω a $P = 10$ k Ω . Zistite, ako sa menia výstupné napätia generátora so zmenou napätia U .

9.3 Nelineárne obvody s operačným zosilňovačom

Operačná sieť môže obsahovať nelineárne prvky a hoci operačný zosilňovač pracuje v svojej lineárnej oblasti, tak výsledný elektronický obvod je nelineárny. Tak sa môžu stavať logaritmujúce zosilňovače, modulátory, kvadrátory, násobičky, pamäťové obvody atď. Na ukážku si prakticky vyskúšame jednocestný usmerňovač v zapojení podľa obr. 88.

Pre kladné napätie u_i je na výstupe operačného zosilňovača záporné napätie a dióda D_1 je otvorená. Jej dynamický odpor je malý a $u_z = -u_i R_d/R_1$, $|u_z| \leq 0,6$ V. R_d je dynamický odpor diódy a 0,6 V je otváracie napätie diódy D_1 . Dióda D_2 je uzavretá, preto je $u_o = 0$.

Pre záporné napätie u_i je $u_z > 0$ a uzatvára diódu D_1 , otvára diódu D_2 . Napätie $u_z = -u_i R_2/R_1$ a $u_o = u_z - 0,6$ V. Kým sa dióda D_2 neotvorí, pracuje operačný zosilňovač s otvorenou slučkou spätnej väzby, teda so zosilnením $A = -10^5$. Dióda D_2 sa otvorí, ak napätie (-) vstupu dosiahne hodnotu $u_i = 0,6/(-10^5)$ V = -6 μ V. Obvod sa správa ako temer ideálny jednocestný usmerňovač [9], kap. 23.8.



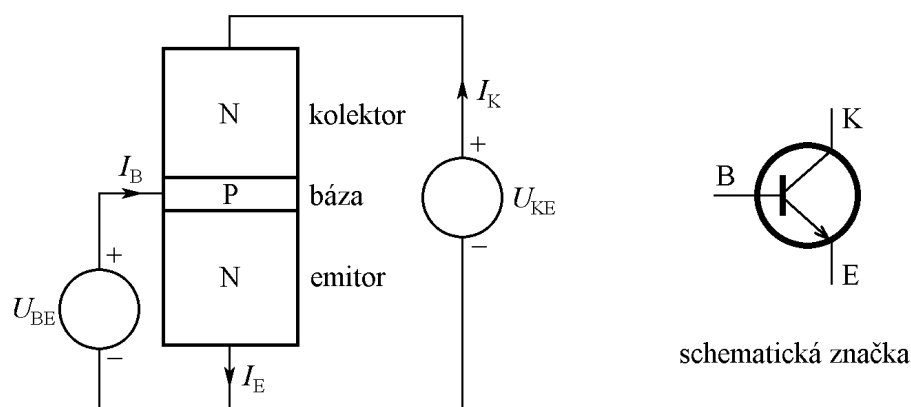
Obr. 88

Úloha 24. Navrhnete usmerňovač s operačným zosilňovačom podľa obr. 88 tak, aby ste mohli usmerňovať napätie s amplitúdou rádovo 0,1 V a usmerené napätie bolo okolo 5 V.

Cvičenie 25. Zostavte usmerňovač podľa vášho návrhu z úlohy 24. Pozorujte a opíšte veľkosť a tvar výstupného napätia usmerňovača v závislosti od kmitočtu s amplitúdy vstupného harmonického napätia.

10 TRANZISTORY [7], kap. 11

V praxi sa stretáme s bipolárnymi kremíkovými plošnými tranzistormi, čo sú polovodičové prvky s tromi elektródami. Fyzicky je to kremíkový monokryštál obsahujúci tri vrstvy so striedaním typu vodivosti (PNP alebo rozšírenejší NPN). Najčastejšie je zapojenie so spoločným emitorom (obr. 89), na ktoré bude zameraný aj ďalší výklad.

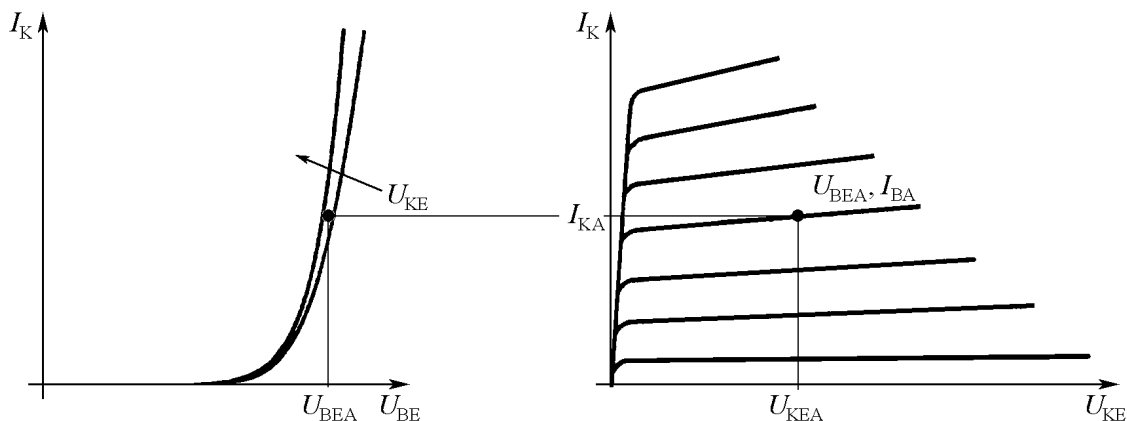


Obr. 89

Na rozhraní dvoch rôznych oblastí sa vytvorí PN prechod. Aj keď nie je pripojený vonkajší zdroj napätia, účinkom koncentračných gradientov vznikne v ňom potenciálový val, ktorý bráni ďalšej difúzii elektrónov z oblasti N do P a dier v obrátenom smere. Vonkajším napätím možno tento potenciálový val buď zvýšiť (záporný smer napätia), čím sa počet prechádzajúcich nábojov zníži – tvorí *záporný prúd* I_s , alebo znížiť (priepustný smer napätia), a tým sa zvýši počet prechádzajúcich nosičov náboja cez PN prechod – prúd vzrastie. Vonkajšie napätie polarizuje PN prechod v priepustnom smere, ak je + pól zdroja pripojený na P a – pól na N oblasť.

V tranzistore sú prechody dva. Jeden (emitor – báza) je vonkajším napätím otvorený. Nosiče náboja prechádzajú z emitora do bázy a tvoria emitorový prúd I_E . Časť z nich odtečie cez bázu do vonkajšieho obvodu, časť rekombinuje v objeme a na povrchu bázy – tvorí báзовý prúd I_B . Ostatné nosiče náboja predifundujú cez bázu až k druhému PN prechodu (báza – kolektor), kde sú strhnuté poľom záporného napätia prechodu a tvoria kolektorový prúd $I_K = A I_E$. Číslo $A = (I_E - I_B)/I_E$ je blízke jednotke.

Všetky uvedené prúdy a napätia môžeme merať a určiť ich vzájomné závislosti. Napríklad prúdy $I_B = I_B(U_{BE}, U_{KE})$ a $I_K = I_K(U_{BE}, U_{KE})$ pozri obr. 90 a výsledky cvičenia 7 z kap. 7.3.1.



Obr. 90

Pretože $I_K = A I_E$ a $I_B = (1 - A) I_E$ je

$$I_K = \frac{A}{1 - A} I_B = B I_B,$$

kde $B \gg 1$ je koeficient statického prúdového zosilnenia. Prechod K – B je zapojený v závernom smere, preto má veľký odpor a tranzistor sa na svorkách K – E chová ako zdroj prúdu $B I_B$.

Ak sa bude meniť napätie U_{BE} , mení sa aj prúd I_B [7], str. 372 – 379, a tým sa mení aj prúd I_K . Tranzistor pracuje ako zosilňovač prúdu.

Z charakteristík, resp. zo vzťahov, ktoré poskytuje teória tranzistorov, môžeme určiť dynamické parametre, ktoré charakterizujú správanie sa tranzistorov pri pripojení na striedavé napätia. Obmedzíme sa na tak malé zmeny napätí a prúdov, aby sme mohli charakteristiky z obr. 90 linearizovať. Rozvinieme vzťahy pre I_B a I_K v okolí pracovného bodu A do Taylorovho radu a zanedbáme členy vyšších rádov:

$$I_B = I_B(U_{BEA}, U_{KEA}) + \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} \Delta U_{BE} + \frac{\partial I_B}{\partial U_{KE}} \Delta U_{KE},$$

$$I_K = I_K(U_{BEA}, U_{KEA}) + \frac{\partial I_K}{\partial U_{BE}} \Delta U_{BE} + \frac{\partial I_K}{\partial U_{KE}} \Delta U_{KE}.$$

$I_B - I_B(U_{BEA}, U_{KEA}) = \Delta I_B$ je zmena bázového prúdu, podobne ako ΔI_K je zmena kolektorového prúdu. Zmeny napätí ΔU a prúdov ΔI budeme ďalej označovať malými písmenami, a pretože závisia od času, budú označovať premenné napätia a prúdy.

Každá z parciálnych derivácií má svoj názov a spolu sa volajú admitančné štvorpólové parametre tranzistora. Napríklad teória poskytuje pre kolektorový prúd vzťah [7] $I_K = I_s(T, U_{KE}) e^{U_{BE}/U_T}$. Potom veličina

$$S = \frac{\partial I_K}{\partial U_{BE}} = \frac{I_s}{U_T} e^{U_{BE}/U_T} = \frac{I_K}{U_T}$$

sa nazýva strmosť tranzistora a nezávisí od individuálnych vlastností tranzistora. Praktické hodnoty sa od tejto teoretickej nelíšia v priemere o viac ako o $\pm 20\%$. Podobne

$$\frac{\partial I_K}{\partial U_{KE}} = \frac{I_K}{U_Y} = \frac{1}{r_{ke}}$$

je výstupná vodivosť tranzistora. U_Y je *Earlyho* napätie a pre kremík (a NPN tranzistory) je približne 150 V. Ďalej je

$$\frac{1}{r_{be}} = \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} = \frac{\partial I_B}{\partial I_K} \frac{\partial I_K}{\partial U_{BE}} = \frac{S}{\beta},$$

kde r_{be} je vstupný odpor tranzistora a

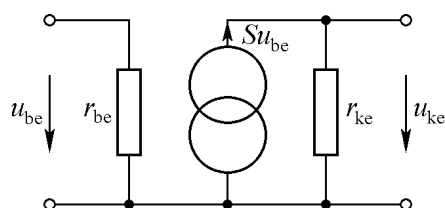
$$\beta = \frac{\partial I_K}{\partial I_B}$$

je dynamický prúdový zosilňovací činiteľ, ktorý výrobca udáva v katalógoch pre každý typ tranzistora zvlášť.

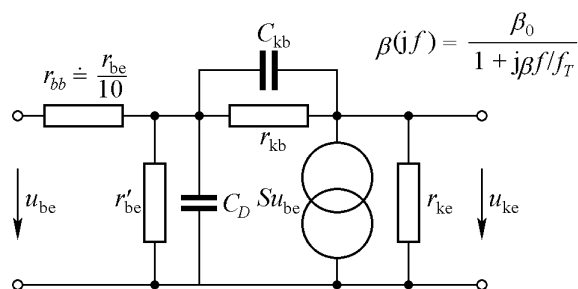
Posledný z parametrov

$$\frac{\partial I_K}{\partial U_{KE}} \approx 10^{-4}$$

je spätná strmosť a predstavuje vlastne spätnú väzbu vo vnútri tranzistora. Pre zapojenia s tranzistorami, ktoré pracujú s nízkymi kmitočtami možno tento parameter zanedbať.



Obr. 91



Obr. 92

Pre uvedený model tranzistora je jeho náhradná schéma na obr. 91. Pre vysoké kmitočty treba brať do úvahy konečnú rýchlosť difúzneho pohybu nosičov náboja, vodivosti materiálov atď., z čoho vyplnú fázové posuny medzi prúdmi a napätiami v tranzistore samotnom. Rozbor takéhoto modelu vedie na náhradnú schému napr. na obr. 92 [7], str. 388 – 398.

V praxi budete používať tranzistory KC 508 typu NPN. Teda pre správnu polarizáciu PN prechodov vyžadujú pripojenie kladného kolektorového a bázového napätia voči emitoru. Výrobca uvádza pre ich použitie nasledovné najdôležitejšie obmedzenia:

1. Maximálne napätie medzi kolektorom a emitorom $U_{KEmax} = 20$ V.
2. Maximálne záverné napätie medzi bázou a emitorom $U_{BEmax} = 5$ V.
3. Maximálny kolektorový prúd $I_{Kmax} = 100$ mA.
4. Maximálny bázový prúd $I_{Bmax} = 15$ mA.
5. Maximálny tepelný výkon, ktorý nespôsobí nadmerné zahrievanie súčiastky $P_{max} = U_{KE}I_K = 300$ mW.

Ako orientačný údaj uvádza výrobca $125 < \beta < 900$

Bežný kolektorový prúd $I_K = 5$ mA.

Tranzistor pracuje primerane až po kmitočty okolo 100 MHz.

Obmedzenia 1. a 2. sú dané tým, že pri vyšších napätiach by mohlo dôjsť k prierazu uzavretého PN prechodu v tranzistore. Uvedené hodnoty nesmú byť prekročené v žiadnom časovom okamihu.

Obmedzenia 3., 4. a 5. súvisia s tým, že príliš veľké prúdy, resp. teploty môžu spôsobiť deštrukciu súčiastky. Vzhľadom k istej tepelnej zotrvačnosti ide o ohraničenie stredných hodnôt. Krátkodobé

(počas zlomku sekundy) môže súčiastkou tiecť prúd I_K až niekoľkonásobne vyšší ako $I_{K_{max}}$. Podobne je to aj s $I_{B_{max}}$ a P_{max} . Bližšie údaje poskytuje výrobca v katalógoch.

Pri pochybnostiach o správnej funkcii tranzistora treba v prvom rade preveriť usmerňovací účinok jednotlivých PN prechodov. Najjednoduchšie to možno urobiť ohmmetrom, ktorý v závislosti od smeru pripojenia PN prechodu ukazuje (ak je tranzistor v poriadku) raz veľký, v opačnom smere malý odpor. Takýmto spôsobom možno ľahko odhaliť skraty a prerušenia v tranzistore.

10.1 Tranzistor ako zosilňovač v zapojení so spoločným emitorom

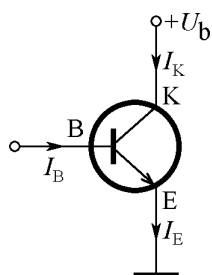
V tomto zapojení tranzistora sa využíva riadenie kolektorového prúdu bázovým prúdom. Prúd medzi elektródami kolektor a emitor tečie iba vtedy, ak tečie prúd medzi elektródami báza a emitor (obr. 93). Kolektorový prúd I_K je omnoho väčší ako bázový I_B a súvis medzi nimi je približne lineárny

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \approx \frac{I_K}{I_B} = B.$$

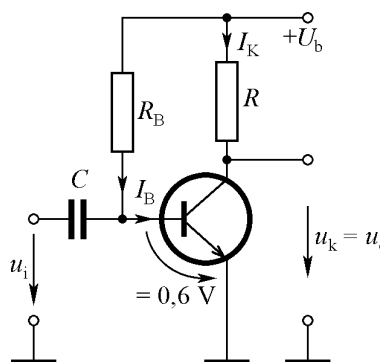
Prúdy I_B a I_K začínajú tiecť, ak napätie medzi bázou a emitorom presiahne otváracie napätie prechodu (diódy) báza – emitor, čo pre kremíkové tranzistory činí približne 0,6 V (kap. 7.3.1). Veľkosť kolektorového prúdu I_K prakticky nezávisí od kolektorového napätia (obr. 90), ktoré musí iba polarizovať prechod (diódu) báza – kolektor v závernom smere.

10.1.1 Zosilňovač napätia s odporovou záťažou

Ovládanie kolektorového prúdu bázovým vedie na využitie tranzistora ako zosilňovača v zapojení podľa obr. 94.



Obr. 93



Obr. 94

Zo zdroja napájacieho napätia $+U_b$ tečie cez odpor R_B prúd $I_B = \frac{U_b - 0,6 \text{ V}}{R_B}$, ktorý vyvolá kolektorový

prúd $I_K \approx I_B$. Napätie na kolektore tranzistora je $U_K = U_b - R_K I_K$.

Odpor R_K teda nastavuje pracovný bod tranzistora. Vplyv vstupného odporu tranzistora je zahrnutý v otváracom napätí 0,6 V prechodu báza – emitor.

Ak budeme meniť veľkosť bázového prúdu, bude sa následne meniť veľkosť kolektorového napätia. Ak bude I_B rásť, bude U_K klesať a naopak.

Zapojenie z obr. 94 sa využíva na zosilnenie malých napätí (napr. z mikrofónu) tak, že takéto napätie privedieme na diódu báza – emitor. Zmeny napätia medzi bázou a emitorom vyvolajú zmeny bázového prúdu a v konečnom dôsledku aj kolektorového napätia, pričom zmeny kolektorového napätia sú omnoho väčšie ako zmeny bázového napätia. Vstupné napätie privádzame na bázu tranzistora preto cez kondenzátor C , aby sa bázový prúd I_B neuzatváral cez zdroj napätia u_i , čím by sa menil pracovný bod tranzistora. Kapacita kondenzátora musí byť tak veľká, aby dobre prenášal (bez straty zosilnenia) aj najnižšie kmitočty zo spektra napätia u_i .

Prúd I_K treba voľiť tak, aby bez existencie signálu ($u_i = 0$) malo kolektorové napätie U_K hodnotu rovnú približne polovici napájacieho napätia U_b . Vtedy má zosilňovač najväčšiu dynamiku. Zmeny bázového napätia potom môžu vyvolať aj vzrast, aj pokles kolektorového napätia.

Zosilnenie (napäťový prenos, pozri kap. 4.9) je definované ako pomer zmeny výstupného napätia k zmene vstupného napätia:

$$K = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_{BE}} = \frac{u_k}{u_{be}}$$

Diferencovaním vzťahu pre kolektorové napätie dostávame $\Delta U_K = R_k \Delta I_K$, resp. $u_k = -R_k i_k$. Pretože $U_b = \text{konšt}$, bude $\Delta U_b = 0$.

Súvis medzi zmenou kolektorového prúdu a zmenou bázového napätia je určený strmosťou (kap. 10).

$$i_k = S u_{be} = \frac{I_K}{U_T} u_{be}, \text{ čiže } u_k = \frac{-R_k I_K}{U_T} u_{be}.$$

Znamienko (–) vyjadruje, že vzrast napätia medzi bázou a emitorom tranzistora vyvolá pokles napätia na jeho kolektore. Zosilnenie zosilňovača so zaťažovacím odporom v kolektorovom obvode tranzistora je rovné

$$K = - \frac{\text{spádu napätia na kolektorovom odpore}}{\text{tepelné napätie } (\approx 26 \text{ mV})}$$

Pri praktickej voľbe veľkostí hodnôt R , C , U_b treba vychádzať z obmedzení udávaných výrobcom (kap. 10).

1. Aby $U_{KE} < 20 \text{ V}$, volíme napr. $U_b = 10 \text{ V}$, čím je požiadavka splnená.

2. Ak chceme pracovať s bežným kolektorovým prúdom $I_K = 5 \text{ mA}$ a bez signálu chceme mať kolektorové napätie $U_K = 5 \text{ V}$ (aby sme ho mohli zväčšovať aj znižovať), potom úbytok napätia na odpore R_k bez signálu je $U_K = 10 \text{ V} - 5 \text{ V} = 5 \text{ V}$, čiže R_k musí mať hodnotu

$$R_k = \frac{U_{R_k}}{I_K} = \frac{5 \text{ V}}{5 \text{ mA}} = 1 \text{ k}\Omega.$$

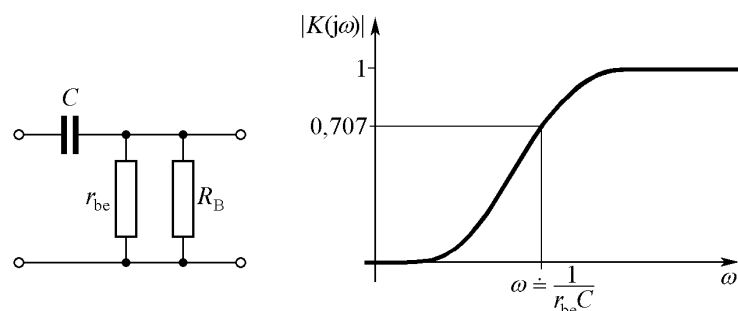
3. Maximálny prúd bude tiecť tranzistorom vtedy, ak zväčšíme napätie medzi bázou a emitorom natoľko, že $U_K = 0$. Vtedy $I_{K_{\max}} = \frac{U_b}{I_K} = \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ mA}$, čo je hodnota menšie, ako je maximálna prípustná hodnota $I_{K_{\max}} = 100 \text{ mA}$.

4. Maximálne teplo sa na tranzistore vyvinie pri $U_K = U_b/2$. Pre zvolené hodnoty U_b a R_k má

hodnotu $P_{\max} = 5 \text{ V} \cdot \frac{5 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 25 \text{ mW}$, čo tiež vyhovuje obmedzeniam od výrobcu.

Voľba $U_{KE} = 5 \text{ V}$ a $I_K = 5 \text{ mA}$ bez signálu (bod 1. a 2.) – pracovný bod tranzistora – nie je veľmi kritická. Tranzistor môže rovnako dobre pracovať aj pri hodnotách U_K a I_K podstatne odlišných od uvedených. Vždy však treba kontrolovať maximálny kolektorový prúd a výkonovú stratu na tranzistore (3. a 4. bod).

5. Nakoniec ešte zostáva voľba veľkosti kondenzátora C , ktorý slúži na privedenie vstupného signálu a súčasne na jednosmerné oddelenie bázy tranzistora od zdroja signálu. Kondenzátor, ktorý je pre striedavé signály vlastne zapojený paralelne s r_{be} , tvorí s odporom r_{be} (hodnotu R_B môžeme zanedbať, lebo je zvyčajne omnoho väčšia než r_{be}) dolnofrekvenčnú zádrž, ktorá prenáša bez zoslabenia len kmitočty vyššie než $\omega_d = 1/r_{be}C$ (obr. 95).



Obr. 95

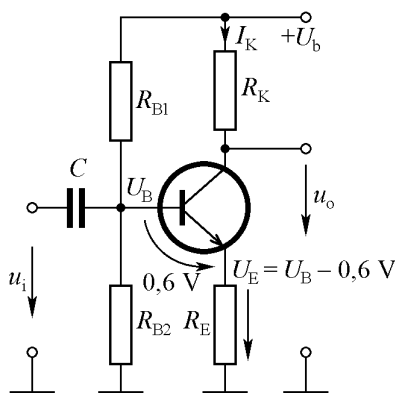
Ak poznáme pracovný bod tranzistora, môžeme určiť r_{be} (kap. 10)

$$r_{be} = \frac{\beta U_T}{I_K} = \frac{125 \cdot 25 \text{ mV}}{5 \text{ mA}} = 625 \Omega.$$

Ak chceme, aby zosilňovač preniesol všetky kmitočty vyššie než 100 Hz (akustické kmitočty), potom môžeme určiť kapacitu

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \text{ Hz} \cdot 625} \approx 2,5 \mu\text{F}.$$

Použijeme najbližšiu hodnotu, ktorú máme v praxi k dispozícii, t. j. $C = 1 \mu\text{F}$. Za β sme použili pri výpočte r_{be} najmenšiu katalógovú hodnotu ($\beta = 125$), ktorá vedie na najväčšiu hodnotu kapacity C .



Obr. 96

Zapojenie zosilňovača na obr. 94 je veľmi jednoduché, má však jednu nevýhodu: veľkosť bázového prúdu treba nastaviť tak, aby kolektorový prúd $I_K = B \cdot I_B$ mal požadovanú hodnotu. Pri zámene tranzistora za iný sa zmení B (aj β) a treba opätovne nastaviť I_B . I_K sa mení aj pri zmene teploty (kap. 10). Zapojenie, v ktorom I_K prakticky veľmi málo závisí od tranzistora a teploty, je na obr. 96. Napr. zmenou teploty nech vzrastie prúd o ΔI_K . Tým vzrastie aj napätie na emitore o $\Delta U_E = \Delta I_K R_E$. Napätie U_B sa nemení, preto sa napätie U_{BE} zmenší o ΔU_E , a teda tranzistor sa trochu uzavrie, t. j. zmenší sa prúd I_K . Výsledná zmena ΔI_K nebude nulová, ale podstatne menšia ako v zapojení na obr. 94.

Odpormi R_{B1} a R_{B2} sa nastaví napätie na hodnotu $U_B = U_b R_{B1} / (R_{B1} + R_{B2})$. Prúd deličom R_{B1} , R_{B2} sa volí podstatne väčší ako prúd bázy, aby sa vplyv vstupného odporu tranzistora dal zanedbať (jeho teplotná závislosť, výmena tranzistora a pod.).

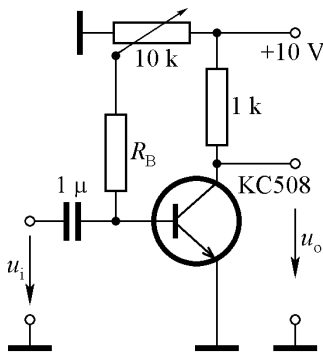
$$\text{Kolektorový prúd má hodnotu } I_K = \frac{U_B - 0,6 \text{ V}}{R_e}.$$

Napätie na kolektore je $U_K = U_b - I_K R_k = U_b - R_k (U_B - 0,6 \text{ V}) / R_e$. Zosilnenie (kap. 4.9) je

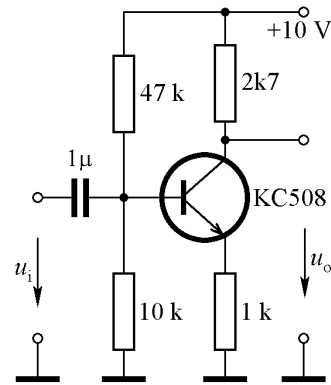
$$K = \frac{dU_K}{dU_B} = - \frac{R_k}{R_e},$$

teda
$$K = - \frac{\text{spád napätia na kolektorovom odpore}}{\text{spád napätia na emitorovom odpore}}.$$

Praktické zapojenia zosilňovačov, ktoré sú vhodné pre vyšetovanie ich vlastností, sú na obr. 97 a 98.



Obr. 97



Obr. 98

Úloha 25. Určte hodnotu odporu R_B na obr. 97 tak, aby sa potenciometrom P dalo nastaviť kolektorové napätie v rozsahu 0 – 10 V pri $\beta = 125$. Bude sa dať pre tento odpor R_B nastaviť U_K v uvedenom rozsahu aj pre tranzistor s $\beta = 900$?

Úloha 26. Aké sú hodnoty $I_{K \max}$ a $P_{K \max}$ pre kolektorový odpor a hodnotou 4,7 kΩ tranzistora z obr. 97?

Úloha 27. Vypočítajte zosilnenie zosilňovača s obr. 97 pre $U_K = 5 \text{ V}$ a 8 V.

Úloha 28. Vypočítajte I_K a zosilnenie zosilňovača z obr. 98.

Cvičenie 26. Zostavte zosilňovač z úlohy 25 a overte interval nastavenia U_K .

Cvičenie 27. Overte vzťah $I_K = \beta I_B$ ($\beta \approx \beta$). Prúdy určujte zo spádov napätí na príslušných odporoch. Určte približnú hodnotu β .

Cvičenie 28. Na vstup zosilňovača privedte harmonický signál a amplitúdou 0,14 V a kmitočtom 1 kHz. Pozorujte a opíšte tvar výstupného napätia pre rôzne hodnoty U_K . Potom porovnajte a opíšte výstupné napätie pre rôzne hodnoty vstupného napätia a rôzne hodnoty U_K . Ujasnite si činnosť zosilňovača.

Cvičenie 29. Zmerajte závislosť zosilnenia od spádu napätia na odpore 1 kΩ. Merajte pri neskreslenom výstupnom napätí.

Cvičenie 30. Zmerajte dolný hraničný kmitočet pre $U_K = 5 \text{ V}$. Presvedčte sa, že výstupné napätie pokleslo účinkom impedancie väzobného kondenzátora. Vypočítajte r_{be} a porovnajte s teoretickou hodnotou.

Cvičenie 31. Vymeňte tranzistor za iný kus a zistite čo sa zmenilo.

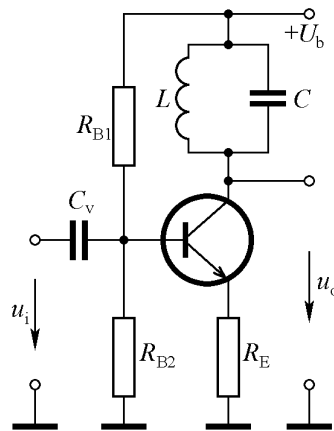
Cvičenie 32. Zostavte zosilňovač podľa obr. 98 a zmerajte jeho zosilnenie. Zopakujte cvičenie 31.

Cvičenie 33. Pripojte vstup zosilňovača z cvičenia 32. na vstup zosilňovača z cvičenia 26. a zmerajte celkové i čiastkové zosilnenia.

10.1.2 Selektívny zosilňovač

Ak nahradíme odpor R_k v predchádzajúcich zapojeniach paralelným rezonančným obvodom LC (obr. 99), dostaneme zosilňovač, ktorý zosilňuje iba tie signály, ktorých kmitočet sa veľmi nelíši od

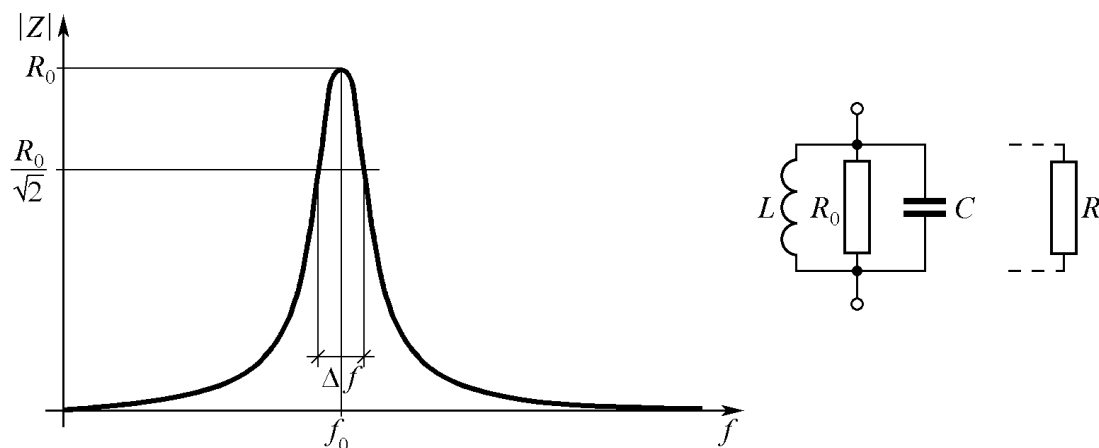
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \text{resp.} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$



Obr. 99

Paralelný rezonančný obvod sa totiž správa tak, že pri kmitočte f_0 je ako obyčajný odpor R_0 a pri zväčšení alebo zmenšení kmitočtu signálu jeho impedancia prudko klesá (obr. 100) a navyše dochádza na nej k fázovým posunom.

Kmitočet, pri ktorom klesne $|Z|$ na $1/\sqrt{2}$ maximálnej hodnoty R_0 , je určený kvalitou Q rezonančného obvodu (obr. 100) $Q = f_0/\Delta f$.



Obr. 100

Maximálna impedancia R_0 závisí od kvality obvodu a súčiastok, pričom platí $R_0 = Q\omega_0 L = Q/\omega_0 C$.

Keby v rezonančnom obvode nedochádzalo k stratám (na odporoch, vyžarovaním a pod.), blížila by sa hodnota R_0 k nekonečnu. Ak pripojíme paralelne k rezonančnému obvodu ďalší odpor R , vzniknú v tomto odpore ďalšie straty energie a maximálna impedancia klesne na hodnotu $R_{ef} = R_0R/(R_0 + R)$ a zmení sa aj kvalita obvodu Q . Zosilnenie zosilňovača je $K = |Z|/R_e$ a má kmitočtovú závislosť podobnú, ako je na obr. 100.

Úloha 29. Cievka L (obr. 101 a 103) má 200 závitov na feritovej tyčke, počet závitov cievky L_1 sa dá meniť. Indukčnosť $L = 1,8$ mH. Vypočítajte rezonančný kmitočet LC obvodu z obr. 101 a obr. 103.

Úloha 30. Za predpokladu, že kvalita LC obvodu je $Q = 100$, vypočítajte jeho rezonančný odpor R_0 .

Úloha 31. Vypočítajte zosilnenie zosilňovača z obr. 101 pri rezonančnom kmitočte.

Úloha 32. Vypočítajte kolektorové prúdy tranzistorov v zapojeniach na obr. 101 a obr. 103.

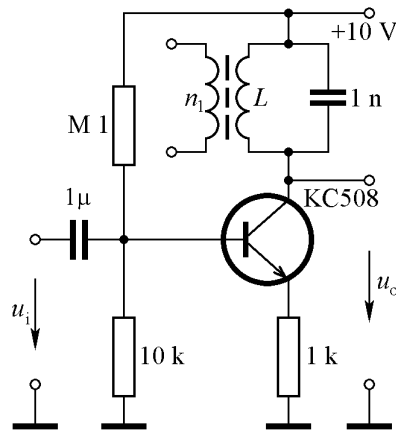
Cvičenie 34. Zapojte zosilňovač podľa obr. 101 a určte veľkosť kolektorového prúdu.

Cvičenie 35. Privedte na vstup zosilňovača z cvičenia 34 harmonické napätie

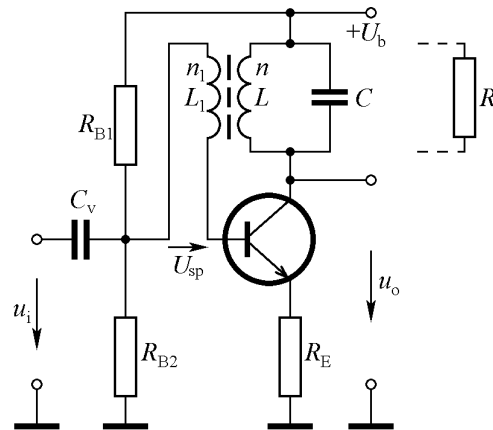
$$u_i = 10 \text{ mV} \sin(2\pi f \cdot 100 \text{ kHz} \cdot t)$$

a zmenou kmitočtu sa presvedčte o selektívnych vlastnostiach zosilňovača. Určte rezonančný kmitočet, zosilnenie pri ňom a vypočítajte z nameraných hodnôt R_0 a Q .

Cvičenie 36. Zmeňte tvar vstupného napätia na trojuholníkový, potom obdĺžnikový a pre ne oscilograficky zobrazte výstupné napätia. Vysvetlite pozorovaný jav.



Obr. 101



Obr. 102

10.1.3 Oscilátor

Vlastnosti selektívneho zosilňovača môžeme podstatne meniť zavedaním spätnej väzby, t. j. pripočítaním časti výstupného napätia k vstupnému. Označme $U_{sp} = \beta \cdot U_o$ (obr. 102). Ak zosilnenie zosilňovača bez spätnej väzby bolo K , potom po pripočítaní napätia U_{sp} k vstupnému napätiu bude zosilnenie určené Blackovým vzťahom

$$K_{sv} = \frac{K}{1 - \beta K}$$

Pomerne jednoducho možno pripočítať časť výstupného napätia k vstupnému, ak cievku L nahradíme transformátorom (obr. 102). Pri ideálnom transformátore je na sekundárnom vinutí napätie $U_{sp} = n_1 U_o / n$, kde n_1 a n sú počty závitov sekundárnej a primárnej cievky. Pretože v reálnom transformátore dochádza k stratám (vyžarovaním, na odporoch, v jadre, rozptylom magnetického poľa a pod.), je napätie na sekundárnom vinutí vždy menšie

$$U_{sp} = k \frac{n_1}{n} U_0, \quad k \in (0, 1), \quad \text{teda} \quad \beta = k \frac{n_1}{n}.$$

Ak zosilňovač na obr. 99 má za rezonancie zosilnenie $K = R_{ef}/R_e$, potom zosilňovač na obr. 102 bude mať za rezonancie zosilnenie

$$K_{sv} = \frac{\frac{R_{ef}}{R_e}}{1 - k \frac{n_1}{n} \frac{R_{ef}}{R_e}}$$

Stupeň spätnej väzby, a tým i zosilnenie možno najjednoduchšie meniť zväčšovaním alebo zmenšovaním počtu závitov n_1 . Znamienko spätnej väzby, t. j. či napätie U_{sp} k vstupnému napätiu pripočítame, alebo ho od neho odpočítame, možno meniť zámennou vývodov sekundárnej cievky. Výraz kn_1R_{ef}/nR_e v menovateli vzťahu pre K_{sv} sa podľa znamienka spätnej väzby buď od jednotky odpočíta, alebo sa k nej pripočíta. Zosilnenie teda pri kladnej spätnej väzbe stúpne a pri zápornej klesne.

Zaujímavý prípad nastane, ak sa menovateľ výrazu pre zosilnenie so spätnou väzbou K_{sv} bude rovný nule. Zosilnenie by malo nadobúdať nekonečnú hodnotu, teda aj pre vstupné napätie rovné nule bude na výstupe zosilňovača nenulové výstupné napätie. V praxi to znamená, že sa zosilňovač rozkmitá a vznikne z neho generátor sínusových kmitov (podmienka pre nulovú hodnotu menovateľa K_{sv} je splnená len pre jediný kmitočet). Fyzikálne to znamená asi toľko, že časť náhodne vybudených kmitov v LC obvode (napr. pri zapnutí napájacieho napätia, alebo šumami v obvode) sa privedie spätnou väzbou na vstup zosilňovača, ten ich zosilní a privedie na LC obvod. Ak privedená energia presahuje straty v rezonančnom obvode, potom v ňom vzniknú netlmené kmity.

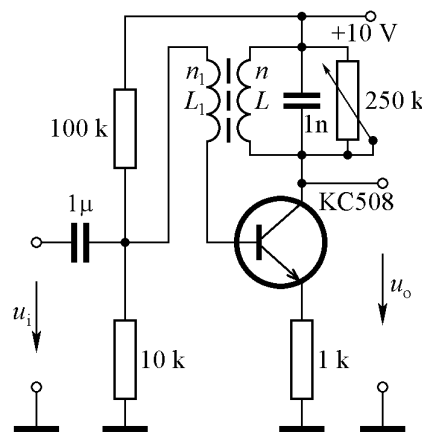
Čím sú straty v LC obvode väčšie, tým väčšiu časť napätia z LC obvodu musíme priviesť na vstup zosilňovača, a teda tým väčší musí byť počet závitov n_1 . Minimálny počet závitov n_1 potrebný na vznik netlmených kmitov možno určiť z podmienky

$$1 = k \frac{n_1}{n} \frac{R_{ef}}{R_e}$$

a po úprave (dosadení za R_{ef}) je

$$n_1 = \frac{nR_e}{kR_0} + \frac{nR_e}{k} \frac{1}{R}$$

Praktické zapojenie a spôsob zavedenia spätnej väzby je znázornené na obr. 103.



Obr. 103

Úloha 33. Určte minimálne počty závitov cievky L_1 pre vznik netlmených kmitov v zapojení podľa obr. 103, ak je:

- a) $R \rightarrow \infty$
- b) $R = 50 \text{ k}\Omega$

Predpokladajte, že koeficient $k = 0,5$.

Cvičenie 37. Zostavte zosilňovač podľa obr. 103, počet závitov $n_1 = 3$, odpor $R \rightarrow \infty$. Výmenou vývodov cievky L_1 sa presvedčte o účinku spätnej väzby. Merajte pri neskreslenom výstupnom napätí.

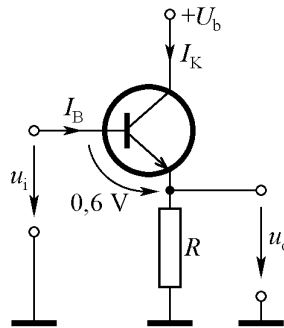
Cvičenie 38. V zosilňovači z cvičenia 37 zvyšujte postupne počet závitov n_1 až po nasadenie vlastných kmitov. Porovnajme minimálny počet závitov pre splnenie podmienky samobudenia s teoretickou hodnotou z úlohy 33. Odhadnite koeficient k .

Cvičenie 39. Zmerajte kmitočet oscilátora z cvičenia 38 a porovnajme ho s teoretickou hodnotou z úlohy 29. Vysvetlite príčiny rozdielu.

Cvičenie 40. Zopakujte cvičenie 38 pri pripojenom odpore R a zmerajte závislosť $n_1 = n_1(1/R)$. Z grafu tejto závislosti určte R_0 a k . Výsledky porovnajme a predošlými výsledkami.

10.2 Tranzistor v zapojení so spoločným kolektorom

Ďalším, veľmi často používaným zapojením tranzistora, je zapojenie so spoločným kolektorom (obr. 104). Využíva sa v ňom tá vlastnosť tranzistora, že i pri veľkých zmenách kolektorového prúdu sa napätie medzi bázou s emitorom mení iba málo okolo hodnoty 0,6 V. Napätie na emitore tranzistora je teda približne $U_o \approx U_i - 0,6 \text{ V}$ a prúd odporom R je približne rovný kolektorovému prúdu $I_K \approx (U_i - 0,6 \text{ V})/R$.



Obr. 104

Presný vzťah pre zosilnenie zosilňovača s tranzistorom v zapojení so spoločným kolektorom možno určiť takto:

Ak zväčšíme vstupné napätie o u_i , zväčší sa napätie medzi bázou a emitorom o u_{be} , a tým sa zväčší kolektorový prúd I_K o i_k . Ten vyvolá vzrast napätia na odpore R o hodnotu $u_o = R \cdot i_k$. Súvis medzi u_{be} a i_k je určený strmou tranzistora (kap. 10) a je $u_{be} = i_k U_T / I_K$. Pretože je $u_i = u_{be} + u_o$, po úprave dostaneme zosilnenie

$$K = \frac{u_o}{u_i} = \frac{1}{1 + \frac{U_T}{R I_K}} = \frac{1}{1 + \frac{\text{tepelné napätie (= 26 mV)}}{\text{spád napätia na odpore } R}} \approx 1$$

Výraz v menovateli, ktorý pripočítame k jednotke, je pomerne malý (pre napätie 2,5 V na odpore R nadobúda hodnotu približne 0,01), čiže zosilnenie sa len veľmi málo líši od jednotky.

10.2.1 Emitorový sledovač

Zmeny výstupného napätia v zapojení podľa obr. 104 sú vo fáze (sledujú) so zmenami vstupného napätia. Preto sa aj vžil pre toto zapojenie názov „emitorový sledovač“.

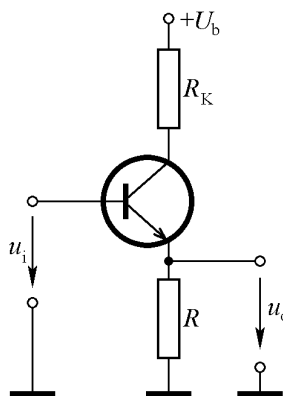
Význam takéhoto zosilňovača spočíva v tom, že prúd i_b vstupujúci do zosilňovača je β -krát menší, než prúd tečúci odporom R . Vstupný odpor emitorového sledovača je

$$R_i = \frac{u_i}{i_b} \approx \frac{u_i}{i_k/\beta} \approx \frac{u_o}{i_k} \beta = \beta R.$$

Emitorový sledovač používame všade tam, kde nemôžeme pripojiť odpor R priamo na zdroj signálu, lebo by z neho odoberal neprípustne veľký prúd.

Schopnosť emitorového sledovača dodávať do záťaže pomerne veľký prúd nás súčasne núti chrániť tranzistor pred preťažením. Pri náhodnom skrate medzi výstupom zosilňovača a „zemou“ ($R = 0$) by tranzistorom tiekol taký veľký prúd, že by došlo k jeho okamžitému zničeniu. Takáto situácia môže nastať v praxi najmä pri neopatrnom zaobchádzaní so spojovacími vodičmi alebo ich chybnom spojení.

Najjednoduchšou ochranou proti skratu na výstupe emitorového sledovača je zaradenie odporu R_K do kolektorového obvodu (obr. 105). Pri skrate vstupe voči zemi potečie tranzistorom prúd $I_{\max} = U_b/R_K$.



Obr. 105

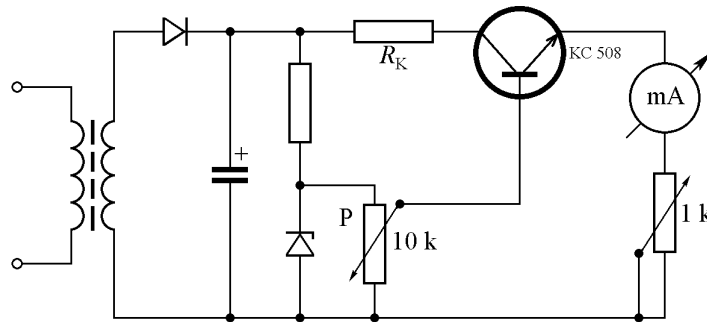
V zariadeniach, kde odpor R_K narušuje správnu činnosť sledovača, sa používajú zložitejšie zapojenia na ochranu tranzistora (tzv. elektronické poistky). U zariadení, kde je nepravdepodobné náhodné skrato vanie výstupu sledovača sa často od ochrany upúšťa.

Pri praktickom návrhu platia rovnaké obmedzenia ako pri zapojení so spoločným emitorom. Pozornosť treba venovať okrem kolektorového prúdu hlavne maximálnemu výkonu P_{\max} , ktorý sa v tranzistore mení na teplo.

10.2.2 Regulovaný zdroj stabilizovaného napätia

Doplnením stabilizátora napätia so Zenerovou diódou (kap. 8.2) o emitorový sledovač získame veľmi jednoduchý regulovateľný zdroj jednosmerného napätia (obr. 106).

Z bežka potenciometra P môžeme odoberať ľubovoľné napätie z intervalu 0 V až Zenerovo napätie. Na napájanie emitorového sledovača sme použili nestabilizované napätie z filtračného kondenzátora, nakoľko veľkosť kolektorového prúdu len málo závisí od kolektorového napätia.



Obr. 106

Úloha 34. Akú hodnotu musí mať odpor R_K v zapojení podľa obr. 106, aby pri skrate emitora na záporný pól zdroja netiekol tranzistorom väčší prúd ako 100 mA? Usmerňovač a stabilizátor použite podľa vašich návrhov z úloh 14 a 15 a meraní v cvičeniach 10 a 11.

Úloha 35. V akom rozsahu sa bude dať regulovať výstupné napätie stabilizátora z obr. 106?

Úloha 36. S použitím úlohy 4 určte bázový prúd tranzistora a napätie bázy, ak $\beta = 125$ a odoberaný prúd zo stabilizátora (obr. 106) je 50 mA. Ako by ste znížili závislosť bázového napätia tranzistora od odoberaného prúdu?

Cvičenie 41. Zostavte stabilizovaný zdroj podľa obr. 106 a zistite v akom rozsahu možno regulovať výstupné napätie. Porovnajete s výsledkami úlohy 35.

Cvičenie 42. Pozorujte osciloskopom časové priebehy napätí v rôznych uzloch stabilizovaného zdroja pre rôzne polohy bežcov oboch potenciometrov a ujasnite si funkciu jednotlivých častí zapojenia.

Cvičenie 43. Zmerajte závislosť výstupného napätia od napätia na bežci potenciometra P a vysvetlite jej priebeh.

Cvičenie 44. Zmerajte závislosť výstupného napätia od výstupného prúdu pre maximálne výstupné napätie naprázdno a potom pre polovičnú hodnotu maximálneho výstupného napätia naprázdno. Maximálny prúd = 50 mA. Vysvetlite priebeh nameraných závislostí.

Cvičenie 45. Pri výstupnom napätí 1 V a prúde 50 mA zmerajte kolektorové napätie tranzistora a vypočítajte tepelný výkon, ktorý v ňom vzniká. Presvedčte sa hmatom, že tranzistor sa zahrieva.

10.3 Tranzistor v spínacom režime

Pre veľké signály je doteraz používaný model tranzistora (kap. 10) nevhodný. Pre veľké signály môže byť napätie U_{BE} (obr. 107):

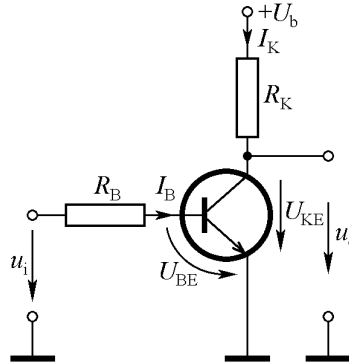
1. $U_{BE} < 0,6$ V. Vtedy je prechod báza-emitor uzavretý ($I_B = 0$) a cez tranzistor tečie zvyškový prúd $I_K = I_{KE0}$. Ak sa U_{BE} zmenší na hodnotu $U_{BE} < 0$, bude prechod báza-emitor polarizovaný v závernom smere a cez tranzistor bude tiecť zvyškový prúd $I_K \approx I_{KB0} \approx I_{KE0}/B$. Hovoríme, že tranzistor je v nevodivom stave. Napätie na výstupe je $u_o = U_b$.

2. $U_{BE} > 0,6$ V. Prechod báza-emitor je úplne otvorený a cez tranzistor tečie veľký prúd $I_K \approx B \cdot I_B$, ktorý je obmedzený odporom R_K v kolektorovom obvode na hodnotu $I_K \approx U_b/R_K$. Napätie na kolektore klesne na hodnotu $U_{KE} \approx 0$. Tranzistor je vo vodivom stave a napätie na výstupe je $u_o = U_{KE}$.

Tranzistor teda pracuje ako bezkontaktný spínač. Na spínacie účely sa hodia tranzistory, ktoré:

- a) potrebujú malý výkon na uvedenie do vodivého stavu,
- b) rýchlo prechádzajú z vodivého stavu do nevodivého a naopak,
- c) majú veľký odpor v nevodivom stave a malé zvyškové napätie U_{KE} vo vodivom stave.

Takéto tranzistory (spínacie) sú vhodné na spracovávanie impulzných signálov, čo má veľký význam napr. pre číslicové elektronické obvody. [7], kap. 11.8.

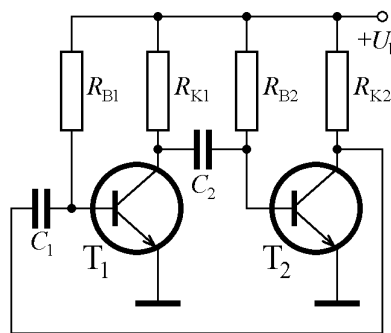


Obr. 107

10.3.1 Multivibrátor

Obvod na obr. 108 predstavuje dva tranzistorové zosilňovacie stupne v zapojení so spoločným emitorom zaradené v kaskáde. Takýto zosilňovač má pomerne veľké zosilnenie K , pokiaľ je kmitočet signálu natoľko vysoký, že ho prenáša hornofrekvenčný priepust tvorený kondenzátormi C a vstupnými odporami tranzistorov. Spojením výstupu zosilňovača s jeho vstupom zavedieme do zosilňovača kladnú spätnú väzbu $\beta = 1$. Blackova podmienka $\beta K \geq 1$ je splnená pre širokú oblasť kmitočtov a obvod sa stane generátorom (kap. 10.1.3) kmitov. Amplitúda kmitov narastá, tranzistory prestanú pracovať v lineárnej oblasti a prejdú do spínacieho režimu. Analýza obvodov v nelineárnej oblasti je zložitejšia, lebo nemôžeme použiť doterajšie zjednodušenia platné pre malé signály.

Analyzujeme zapojenie na obr. 108. Odpor R_B a R_K volíme tak, aby bez zaradenia kondenzátorov C_1 a C_2 boli tranzistory T_1 a T_2 otvorené.



Obr. 108

1. Tesne po zapnutí sú oba kondenzátory bez náboja, a preto napätie kolektora T_1 je rovné napätiu bázy T_2 a napätie kolektora T_2 je rovné napätiu bázy T_1 . Tranzistory nie sú úplne rovnaké, jeden z nich sa otvára rýchlejšie; nech je to T_1 . Jeho kolektorové napätie klesne, čím sa tranzistor T_2 uzavrie a jeho kolektorové napätie stúpne, a tým urýchli otváranie tranzistora T_1 . Dej sa lavínovito rozrastá až do úplného otvorenia T_1 a zatvorenia T_2 . Kondenzátor C_1 je jedným koncom zapojený na kolektor T_2 ,

ktorého napätie je U_b a druhým koncom na bázu T_1 , ktorej napätie je $= 0,6$ V. Jeho napätie je teda $U_b - 0,6$ V. Kondenzátor C_2 je jedným, koncom pripojený na kolektor T_1 , ktorého napätie je ≈ 0 V, a druhým koncom cez odpor R_{B2} na zdroj U_b , z ktorého sa začne nabíjať. Napätie kondenzátora C_2 (a tým aj napätie bázy T_2) exponenciálne narastá. Keď dosiahne hodnotu približne $0,6$ V, otvorí sa tranzistor T_2 , jeho kolektorové napätie poklesne. Tento pokles napätia uzavrie tranzistor T_1 , ktorého kolektorové napätie vzrastie. Tým sa ešte viac otvorí T_2 , dej sa lavínovito rozrastá až k úplnému zatvoreniu T_1 a otvoreniu T_2 .

2. Predtým kladne nabitá doska kondenzátora C_1 na napätie U_b je pripojená cez T_2 na „zem“, preto na báze tranzistora T_1 bude napätie $-(U_b - 0,6$ V), ktoré udržiava T_1 v zatvorenom stave. Kondenzátor C_1 sa ale začne nabíjať cez odpor R_{B1} a otvorený tranzistor T_2 zo zdroja U_b . Napätie bázy T_1 exponenciálne narastá (obr. 109).

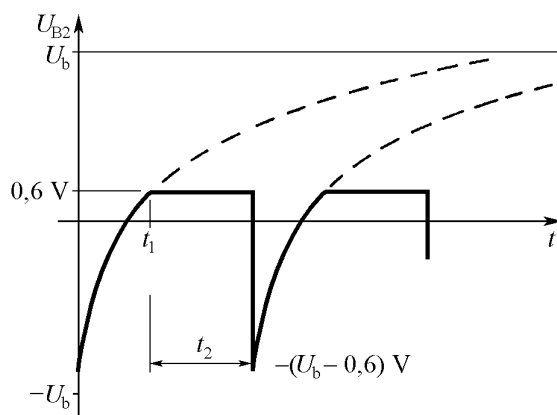
$$U_{B1} = -(U_b - 0,6 \text{ V}) + (2U_b - 0,6 \text{ V})(1 - e^{-t/C_1 R_{B1}}) = U_b - (2U_b - 0,6 \text{ V})e^{-t/C_1 R_{B1}},$$

kým nedosiahne hodnotu $0,6$ V. Tým sa tranzistor otvorí (priebeh podľa bodu 1.) a potom sa dej podľa bodu 2. opakuje, len tranzistory T_1 a T_2 (aj C_1 a C_2) si vymenia činnosť.

Jeden kyv t_1 spĺňa rovnicu (pozri obr. 109)

$$U_b - 0,6 \text{ V} = (2U_b - 0,6 \text{ V})e^{-t_1/C_2 R_{B2}},$$

teda $t_1 = R_{B2} C_2 \ln \frac{2U_b - 0,6 \text{ V}}{U_b - 0,6 \text{ V}} \approx R_{B2} C_2 \ln 2$, ak $U_b \gg 0,6$



Obr. 109

Podobne druhý kyv má dĺžku $t_2 = R_{B1} C_1 \ln \frac{2U_b - 0,6 \text{ V}}{U_b - 0,6 \text{ V}} \approx R_{B1} C_1 \ln 2$ a perióda kmitov je

$$T = (R_{B1} C_1 + R_{B2} C_2) \ln 2.$$

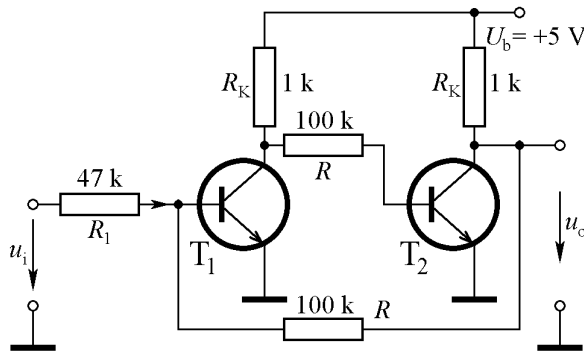
Pretože v rôznych častiach obvodu má napätie periodický neharmonický priebeh, ktorý sa dá predstaviť ako súčet harmonických kmitov mnohých frekvencií (kap. 3; [2], kap. 2.1), nazýva sa zapojenie z obr. 108 multivibrátorom.

Úloha 37. Navrhňte symetrický ($R_{B1} = R_{B2}$, $R_{K1} = R_{K2}$, $C_1 = C_2$) multivibrátor zapojený podľa obr. 108 tak, aby jeho kmitočet bol 500 Hz až 1 kHz. Bázové odpory voľte 100 k Ω .

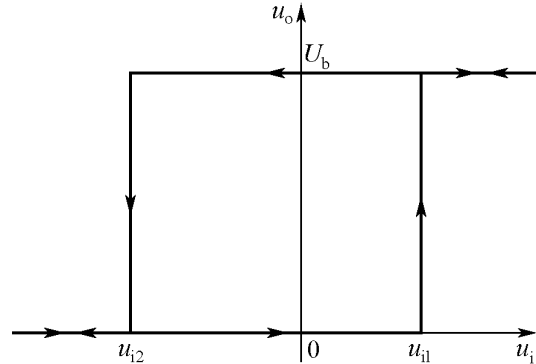
Cvičenie 46. Zostavte multivibrátor podľa vášho návrhu z úlohy 37. Napájacie napätie voľte najviac 5 V. Zmerajte opakovací kmitočet a pozorujte osciloskopom časové priebehy signálu v rôznych uzloch obvodu.

10.3.2 Klopný obvod

Ak v zapojení multivibrátora nahradíme väzbové kondenzátory C odpormi R (obr. 110), bude podmienka $\beta K \geq 1$ splnená aj pre jednosmerný signál. Odpor R_B sme vynechali, lebo ich funkciu plnia odpory R .



Obr. 110



Obr. 111

Takýto obvod sa môže nachádzať v dvoch stabilných stavoch:

1. T_1 otvorený, T_2 zavretý
2. T_1 zavretý, T_2 otvorený

Ak je napr. T_2 uzavretý, na jeho kolektore je napätie blízke U_b , a to cez odpor R udržuje tranzistor T_1 otvorený, na ktorého kolektore je napätie blízke 0. Toto udržuje tranzistor T_2 uzavretý. Takýto stav sa v obvode zachová až dovtedy, kým pomocou nejakého ďalšieho napätia neuzavrieme tranzistor T_1 . Vtedy sa tranzistor T_2 otvorí a udržuje opäť ľubovoľne dlho tranzistor T_1 uzavretý.

Stav obvodu možno meniť napríklad privádzaním vstupného napätia U_i cez odpor R_1 na bázu tranzistora T_1 . Určíme napätia U_i , ktoré sú potrebné na zmenu stavu obvodu.

Nech je tranzistor T_1 uzavretý a tranzistor T_2 otvorený ($U_o \approx 0$). Ak chceme zmeniť stav obvodu, musí napätie na báze tranzistora T_1 dosiahnuť hodnotu otváracieho napätia 0,6 V. Ak zanedbáme bázový prúd tranzistora T_1 , potom tesne pred otvorením tranzistora T_1 bude splnená rovnica

$$\frac{U_{i1} - 0,6 \text{ V}}{R_1} = \frac{0,6 \text{ V}}{R}, \quad \text{teda} \quad u_{i1} = 0,6 \text{ V} \left(1 + \frac{R_1}{R} \right)$$

Ak je tranzistor T_1 otvorený a tranzistor T_2 uzavretý ($U_o = U_b$), potom zmenu stavu obvodu dosiahneme tak, že pomocou U_{i2} musíme zmenšiť napätie na báze tranzistora T_1 pod hodnotu 0,6 V. To sa stane, ak prúd pretekajúci na bázu tranzistora T_1 cez odpor R z kolektora tranzistora T_2 , t. j. $(U_b - 0,6 \text{ V})/R$, bude odtekať nie do bázy, ale cez odpor R_1 na vstup, t. j. cez odpor R_1 musí tiecť prúd

$$\frac{0,6 \text{ V} - U_{i2}}{R_1} = \frac{U_b - 0,6 \text{ V}}{R}, \quad \text{a teda} \quad u_{i2} = u_{i1} - \frac{R_1}{R} U_b$$

Prevodová charakteristika je znázornená na obr. 111.

Úloha 38. Vypočítajte preklápacie napätia klopného obvodu zapojeného podľa obr. 110.

Cvičenie 47. Zobrazte prevodovú charakteristiku klopného obvodu z obr. 110

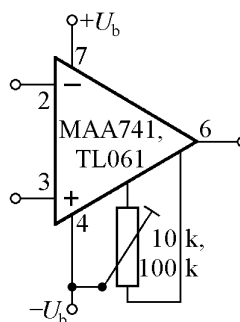
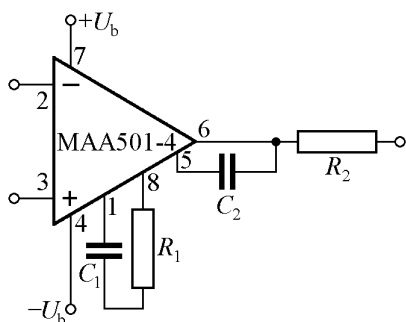
Cvičenie 48. Zmerajte preklápacie napätia klopného obvodu a porovnajte s výsledkom úlohy 38.

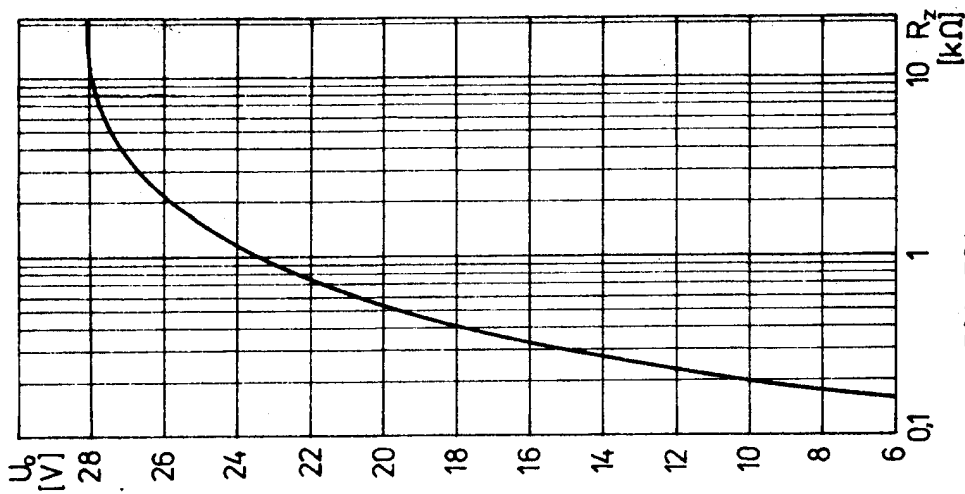
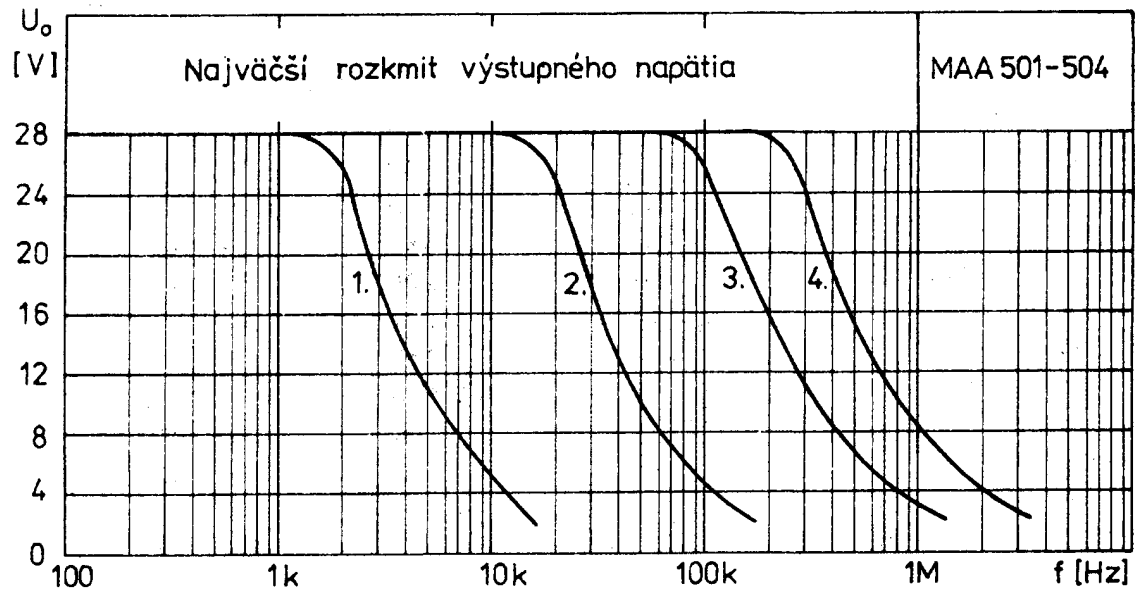
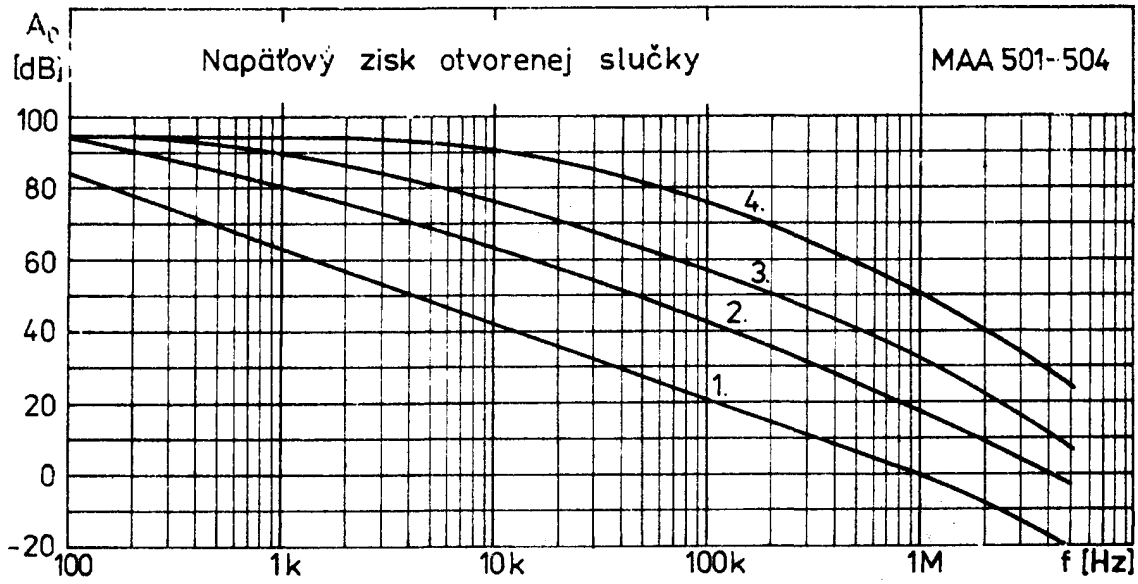
DODATKY

V tejto časti návodov sú uvedené najdôležitejšie hodnoty parametrov operačných zosilňovačov MAA 501 až 504, MAA 741, TL061 a tranzistorov KC 508, ktoré sú potrebné na návrh zapojení. Uvedené hodnoty parametrov a grafy charakteristík treba brať ako orientačné pomôcky. Konkrétna súčiastka môže mať (a obvykle aj má) iné hodnoty parametrov, ktoré pre presnejší návrh obvodu treba zmerať priamo na nej.

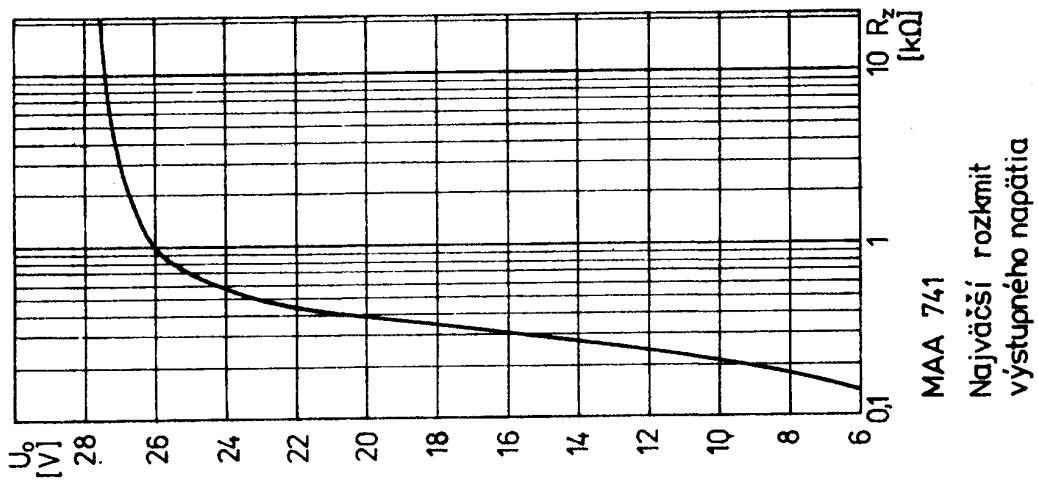
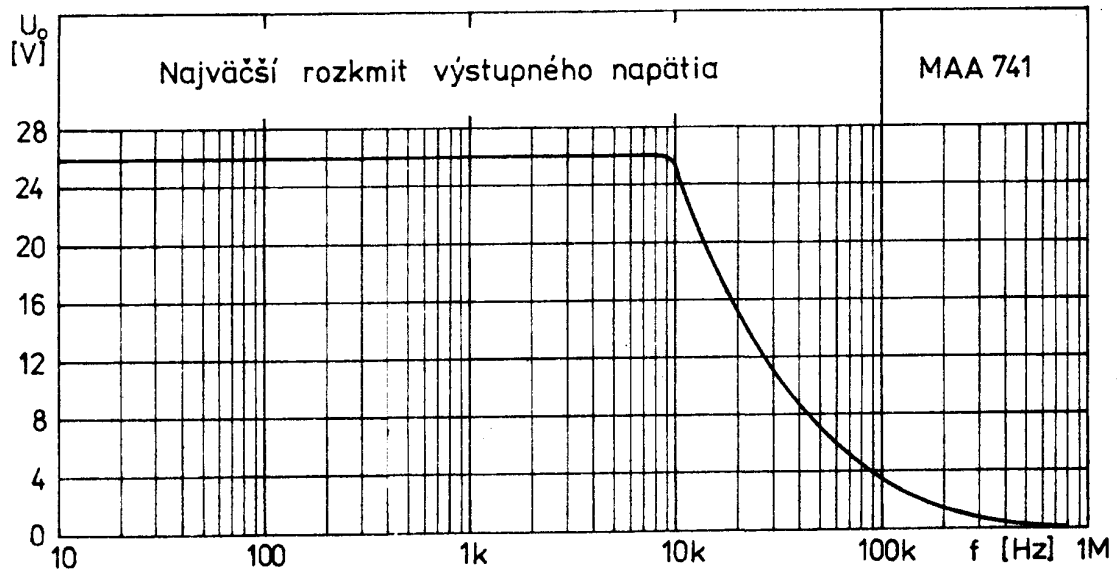
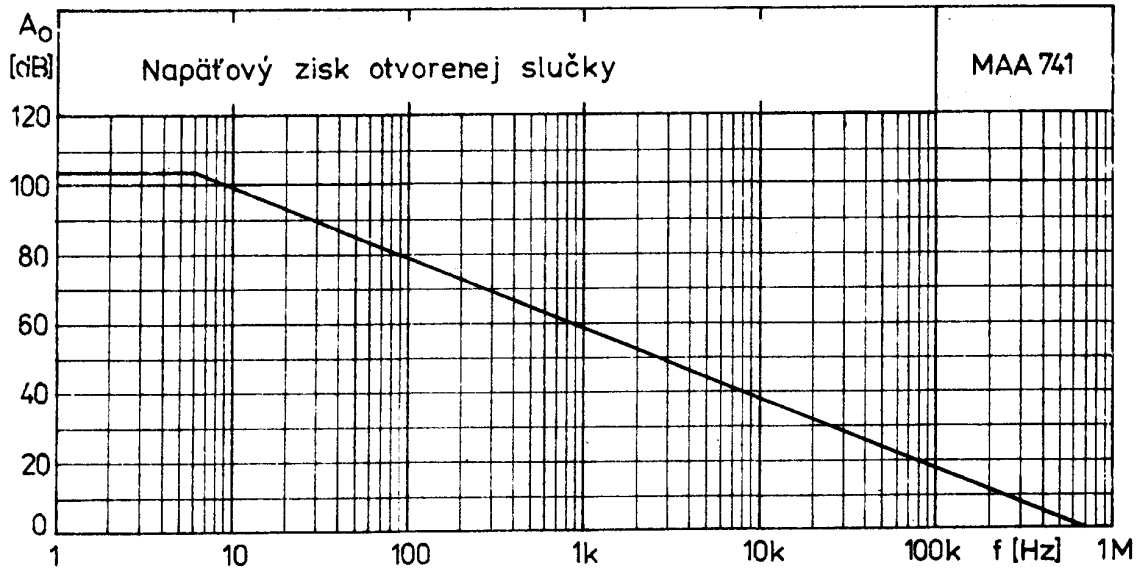
		MAA 501 – 504	MAA 741	TL061
Napájacie napätie/prúd	U_b [V]/[mA]	$\leq \pm 18/3$	$\leq \pm 22/1,3$	$\leq \pm 18/1$
Stratový výkon	P [mW]	300	500	680
Vstupné napätie	U_i [V]	$< \pm 10$	$\leq \pm 15$	$\leq \pm 15$
Vstupné napätie rozdielové	U_d [V]	$\leq \pm 5$	$\leq \pm 30$	$\leq \pm 30$
Vstupný pokojový prúd	I_i [nA]	200	80	$30 \cdot 10^{-6}$
Vstupný odpor	R_i [M Ω]	0,4	3	$1 \cdot 10^6$
Výstupný odpor	R_o [Ω]	150	60	60
Napät'ové zosilnenie	A_0	45 000	150 000	150 000
Potlačenie súčtového signálu	CMMR [dB]	90	90	80
Rýchlosť prebehu	S [V/ μ s]	24	0,5	3,5
Napät'ová nesymetria vstupov	ΔU_i [mV]	1	1,5	6
Prúdová nesymetria vstupov	ΔI_i [nA]	50	10	??

Odporúčané zapojenia pre kmitočtovú kompenzáciu (MAA 501 – 4) a pre kompenzáciu napät'ovej nesymetrie vstupov (MAA 741, TL061).

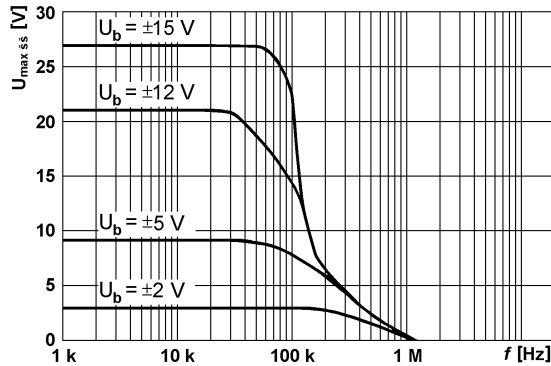




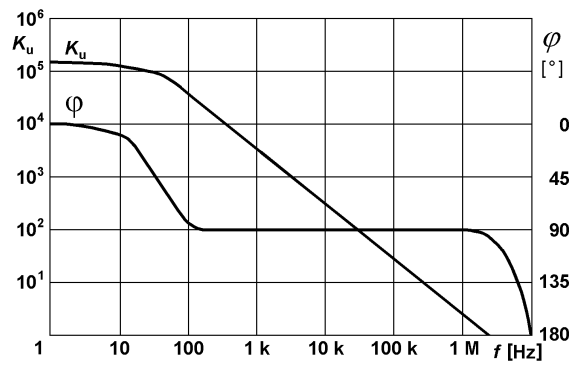
MAA 501 - 504
Najväčší rozkmit
výstupného napätia



TL061



Rozkmit výstupného napätia v závislosti od kmitočtu



Prenos napätia a fázy v závislosti od kmitočtu

Napät'ovú nesymetriu vstupov MAA 501 – 4 možno kompenzovať privedením vhodného napätia na (+) vstup cez odpor 2 – 10 M Ω .

MAA 741 a TL061 nepotrebujú kmitočtovú kompenzáciu.

Odpor R_2 treba použiť, ak operačný zosilňovač pracuje s kapacitnou záťažou.

Por. č.	K_u	R_1	C_1	C_2	R_2
1.	1	1,5 k	5 n	200 p	50
2.	10	1,5 k	500 p	20 p	50
3.	100	1,5 k	100 p	3 p	50
4.	1000	0	10 p	3 p	50

KC 508

Napätie kolektor-emitor

$$U_{KE} \leq 20 \text{ V}$$

Napätie báza-emitor

$$U_{BE} > -5 \text{ V}$$

Trvalý kolektorový prúd

$$I_K \leq 100 \text{ nA}$$

Trvalý básový prúd

$$I_B \leq 15 \text{ mA}$$

Stratový výkon bez chladiča

$$P \leq 300 \text{ mW}$$

Prúdový zosilňovací činiteľ nakrátko pri 1 kHz

$$\beta \leq 125 - 900$$

Hraničný kmitočet

$$f_T > 100 \text{ MHz}$$

Kapacita kolektora

$$C_{KB} < 4,5 \text{ pF}$$

Zvyškový prúd kolektora

$$I_{KB0} \leq 0,2 \text{ pA}$$

Vstupná kapacita

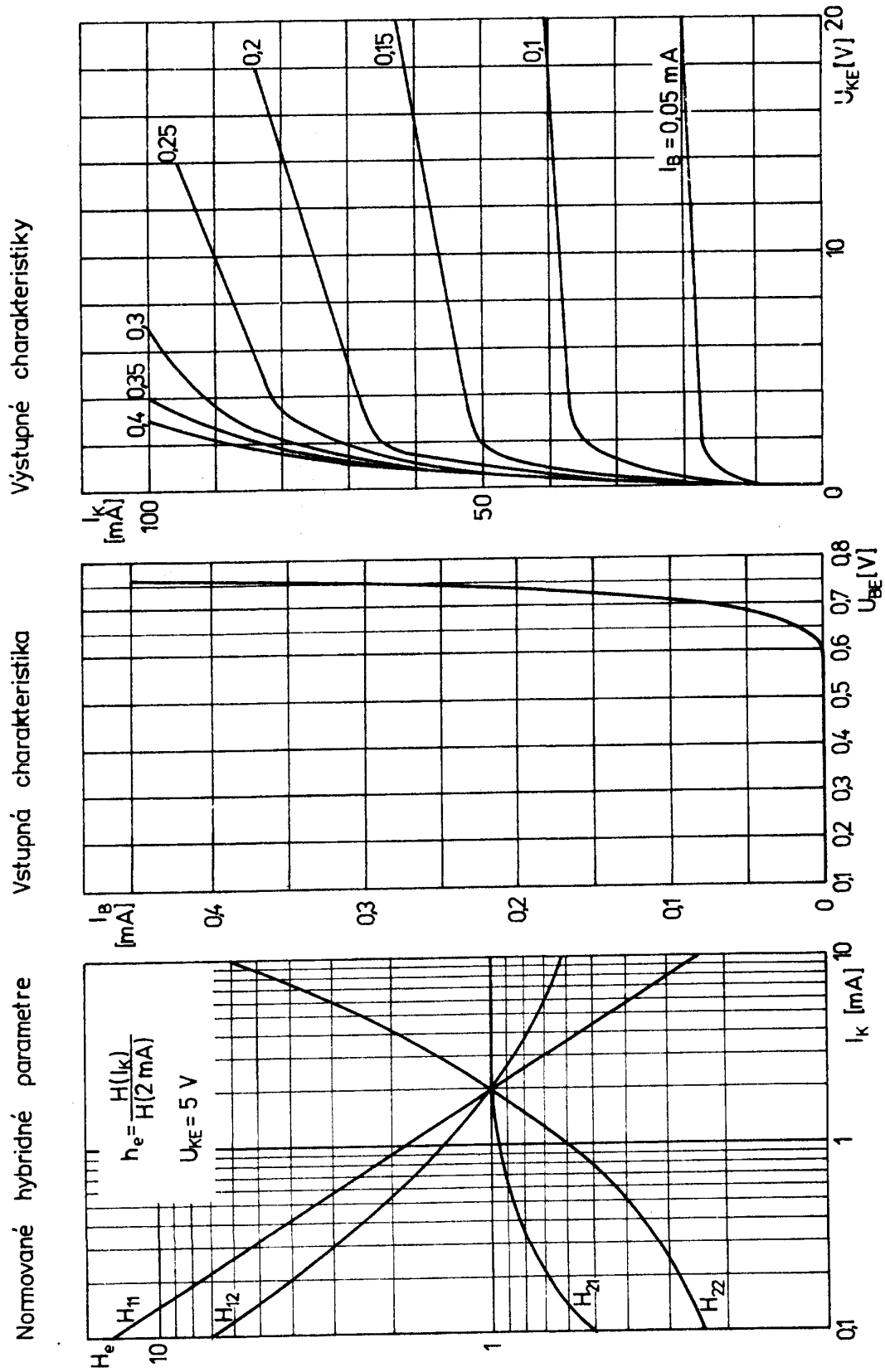
$$C_{EB} \leq 6,8 \text{ pF}$$

Saturačné napätie kolektora

$$U_{KES} < 0,25 \text{ V} \quad \text{pre } I_K = 10 \text{ mA}$$

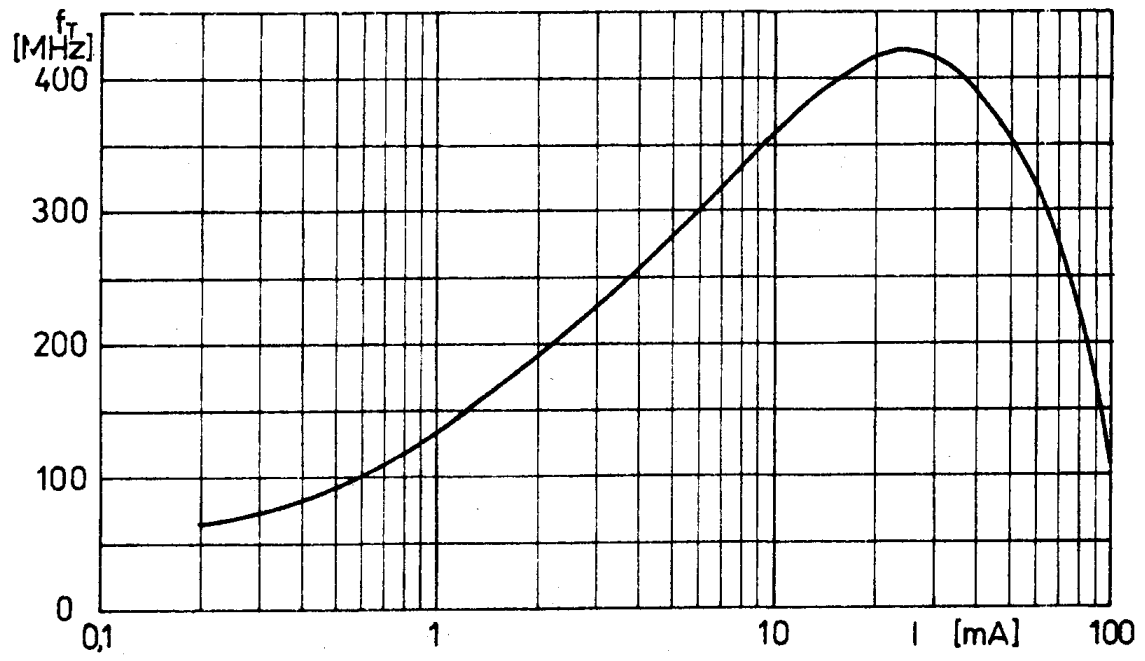
$$< 0,6 \text{ V} \quad \text{pre } I_K = 100 \text{ mA}$$

KC 508



Medzný kmitočet

KC 508



ÚLOHY

Sú to pracovné úkony, ktoré musíte zvládnuť v rámci teoretickej prípravy na praktické cvičenia. Výsledky spracovania úloh väčšinou slúžia na zostavenie a vyšetrovanie elektronických obvodov.

Výber súčiastok v praktiku je obmedzený. Všetky obvody uvedené v týchto návodoch však možno zostaviť so súčiastok podľa zoznamu, ktorý vám budú v laboratóriu k dispozícii.

Odpory a toleranciou $\pm 5\%$: 100 Ω , 1 k Ω , 10 k Ω , 22 k Ω , 47 k Ω , 100 k Ω , 1 M Ω .

Potenciometre s lineárnym priebehom odporu a toleranciou $\pm 20\%$: 10 k Ω , 100 k Ω .

Kondenzátory s toleranciou $\pm 10\%$: 10 nF, 47 nF, 100 nF, elektrolytické (-10% až $+50\%$): 100 μ F.

Operačné zosilňovače : MAA 741, MAA 501 (504), TL061.

Tranzistory: KC 508.

Diódy: KA 502 (KA 262), KY 723 (KY 132/300), KZ 260/9V1.

Transformátor: 9 WN 661 63.4 z 220 V/45 Ω na 13 V/0,7 A/1,4 Ω a 25 V/0,6 A/3,5 Ω .

Číslo v zátvorkách na konci úloh a cvičení je číslo strany, na ktorej sa úloha alebo cvičenie vyskytuje.

ÚLOHY

1. Meraním na plochej batérii 3 R 12 sme zistili, že napätie naprázdno je 4,8 V. Pri zaťažení prúdom 3 A kleslo svorkové napätie na 1,2 V. Určte parametre modelov napäťového a prúdového zdroja meranej batérie. (9)

2. Metódami Kirchoffových rovníc, slučkových prúdov a uzlových napätí (každou samostatne) vypočítajte prúd I v obvode na obr. 12. (18)

3. Vypočítajte napätie u v zapojení podľa obr. 15. (21)

4. Potenciometrom sa delí napätie U na hodnotu kU podľa polohy bežca potenciometra; $k \in \langle 0, 1 \rangle$ (obr. 18). Určte výstupný odpor na svorkách podľa obrázku. Kedy je výstupný odpor najväčší a aké je vtedy výstupné napätie kU ? (24)

5. Dva zosilňovače, prvý má zisk 23 dB, druhý 17 dB, sú zapojené v kaskáde (vstup druhého na výstup prvého). Aký je výsledný zisk, jednotlivé a celkové zosilnenia? (31)

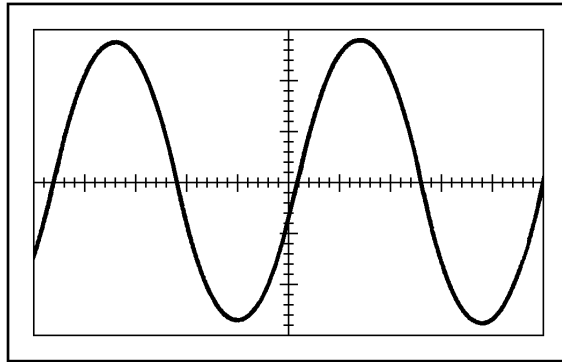
6. Vypočítajte strednú hodnotu dvojcestne ideálne usmerného harmonického napätia za dobu rovnú celistvému násobku periódy. (35)

7. Vypočítajte stredné absolútne hodnoty harmonického, trojuholníkového a obdĺžnikového striedavého napätia za čas rovný celistvému násobku periódy. (53)

8. Čo bude ukazovať striedavý elektronický voltmeter pri meraní napätí z úlohy 7? (53)

9. Pohľad na obrazovku osciloskopu je na obr. II.1. Parametre zobrazenia sú $K_x = 5$ ms/cm a $K_y = 200$ mV/cm. Určte periódu, kmitočet a efektívnu hodnotu meraného napätia. (53)

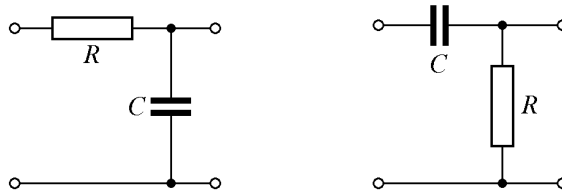
10. Zložte graficky dve navzájom kolmé harmonické napätia s pomerom kmitočtov 1 : 2 alebo 2 : 3 so vzájomným fázovým posunom 45° (nižšieho kmitočtu). (53)



Obr. II.1

11. Citlivosti osciloskopu sú $K_x = K_y = 2 \text{ V/cm}$. Nakreslite VA charakteristiky na milimetrový papier pre zapojenia z obr. 48. (55)

12. Vypočítajte amplitúdové a fázové charakteristiky pre obvody z obr. II.2 a nakreslite ich grafy. Amplitúdu výstupného napätia normujte amplitúdou vstupného napätia, kmitočtet normujte časovou konštantou obvodu. Stupnicu pre normovaný kmitočtet voľte logaritmickú v rozsahu 0,01 – 100. Určte prenosové charakteristiky a zakreslite ich do Gaussovej roviny a lineárnymi stupnicami na reálnej a imaginárnej osi. (57)



Obr. II.2

13. Pre zapojenie z úlohy 12 zobrazte prechodové javy a zakreslite prechodové charakteristiky. Napätie odozvy normujte vstupným napätiovým skokom, čas normujte časovou konštantou. Charakteristiky zakreslite v lineárnej mierke pre normovaný čas v intervale 0 – 7. (58)

14. K danému transformátoru navrhňte usmerňovač, ktorého usmernené napätie $U_s = 15 \text{ V}$, odobieraný prúd 50 mA, zvlnenie $\leq 20 \%$. Pokúste sa vypočítať výstupný odpor usmerňovača pre dané hodnoty U_s a I (predpokladajte malú zmenu odporu záťaže, ktorá vedie k zmene ΔU_s a ΔI . Podiel zmien je výstupný odpor). (65)

15. K usmerňovaču riešenému v úlohe 14 a meranému v cvičení 10 navrhňte stabilizátor so Zenerovou diódou pre záťaž 10 mA pri 9 V. (67)

16. Navrhňte spôsob zobrazovania prevodovej charakteristiky zosilňovača osciloskopom. (73)

17. Navrhňte zosilňovač s operačným zosilňovačom MAA 741 podľa obr. 67 tak, aby zosilnenie bolo približne 5 a vstupný odpor zosilňovača bol väčší ako 10 k Ω . S použitím prílohy a vzťahu pre f_H z kap. 9.1.2 určte šírku kmitočtového pásma navrhnutého zosilňovača. (73)

18. Navrhňte sčítavací zosilňovač podľa obr. 70 na sčítavanie dvoch napätí. Vstupný odpor každého vstupu nech je väčší ako 10 k Ω . (75)

19. Navrhňte rozdielový zosilňovač s úpravou podľa obr. 68. Odporový delič R_5, R_6 nech tvorí potenciometer 10 k Ω . Rozdiel vstupných odporov nech je najviac $\pm 10 \%$. (76)

20. Navrhňte komparátor v zapojení podľa obr. 74 s ochranou vstupov podľa obr. 77. Napätia U odvodte z $\pm U_b$ potenciometrom 10 k Ω . V navrhnutom komparátore nech je $U = +1 \text{ V}$ a amplitúda

u_i nech je 1 V_{ef} (harmonické napätie). Vypočítajte striedu (pomer doby trvania kladného a záporného napätia počas jednej periódy) výstupného napätia (použite obr. 74). (77)

21. S použitím ochrany podľa obr. 77 navrhnete komparátor s hysterézou (obr. 75). Použite $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$ a R_1 ako sériovú kombináciu odporu 1 k Ω a potenciometra 10 k Ω . Tým môžete meniť hysterézu, vypočítajte v akom rozsahu. (79)

22. Multivibrátor zapojený podľa obr. 78 má odpory R_1 a R_2 rovnaké ako komparátor z úlohy 21. R je sériová kombinácia odporu 10 k Ω a potenciometra 100 k Ω , $C = 100 \text{ nF}$. Vypočítajte najnižší a najvyšší kmitočet multivibrátora. (81)

23. V zapojení podľa obr. 83 sú $R_1 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$, $R = 1 \text{ k}\Omega$, R a C sú rovnaké ako v multivibrátore z úlohy 22. Vypočítajte najnižší a najvyšší možný kmitočet pre rôzne kombinácie zapojenia prepínačov P_1 s P_2 . (85)

24. Navrhnete usmerňovač s operačným zosilňovačom podľa obr. 88 tak, aby ste mohli usmerňovať napätie s amplitúdou rádovo 0,1 V a usmernené napätie bolo okolo 5 V. (85)

25. Určte hodnotu odporu R_B na obr. 97 tak, aby sa potenciometrom P dalo nastaviť kolektorové napätie v rozsahu 0 – 10 V pri $\beta = 125$. Bude sa dať pre tento odpor R_B nastaviť U_K v uvedenom rozsahu aj pre tranzistor s $\beta = 900$? (92)

26. Aké sú hodnoty $I_{K \text{ max}}$ a $P_{K \text{ max}}$ pre kolektorový odpor a hodnotou 4,7 k Ω tranzistora z obr. 97? (92)

27. Vypočítajte zosilnenie zosilňovača s obr. 97 pre $U_K = 5 \text{ V}$ a 8 V. (92)

28. Vypočítajte I_K a zosilnenie zosilňovača z obr. 98. (92)

29. Cievka L (obr. 101 a 103) má 200 závitov na feritovej tyčke, počet závitov cievky L_1 sa dá meniť. Indukčnosť $L = 1,8 \text{ mH}$. Vypočítajte rezonančný kmitočet LC obvodu z obr. 101 a obr. 103. (94)

30. Za predpokladu, že kvalita LC obvodu je $Q = 100$, vypočítajte jeho rezonančný odpor R_0 . (94)

31. Vypočítajte zosilnenie zosilňovača z obr. 101 pri rezonančnom kmitočte. (94)

32. Vypočítajte kolektorové prúdy tranzistorov v zapojeniach na obr. 101 a obr. 103. (94)

33. Určte minimálne počty závitov cievky L_1 pre vznik netlmených kmitov v zapojení podľa obr. 103, ak je:

a) $R \rightarrow \infty$

b) $R = 50 \text{ k}\Omega$

Predpokladajte, že koeficient $k = 0,5$. (95)

34. Akú hodnotu musí mať odpor R_K v zapojení podľa obr. 106, aby pri skrate emitora na záporný pól zdroja netiekol tranzistorom väčší prúd ako 100 mA? Usmerňovač a stabilizátor použite podľa vašich návrhov z úloh 14 a 15 a meraní v cvičeniach 10 a 11. (98)

35. V akom rozsahu sa bude dať regulovať výstupné napätie stabilizátora z obr. 106? (98)

36. S použitím úlohy 4 určte báзовý prúd tranzistora a napätie bázy, ak $\beta = 125$ a odoberaný prúd zo stabilizátora (obr. 106) je 50 mA. Ako by ste znížili závislosť báзовého napätia tranzistora od odoberaného prúdu? (98)

37. Navrhnete symetrický ($R_{B1} = R_{B2}$, $R_{K1} = R_{K2}$, $C_1 = C_2$) multivibrátor zapojený podľa obr. 108 tak, aby jeho kmitočet bol 500 Hz až 1 kHz. Báзовé odpory voľte 100 k Ω . (100)

38. Vypočítajte preklápacie napätia klopneho obvodu zapojeného podľa obr. 110. (101)

CVIČENIA

1. Prived'ite na Y vstup osciloskopu napätia rôznych priebehov, sledujte a opíšte vplyvy nastavenia rýchlosti behu časovej základne, zosilnenia Y zosilňovača (citlivosti K_y), účinok internej a externej synchronizácie a pod. (53)

2. Nastavte si na obrazovke osciloskopu vhodný priebeh a určte rozkmit napätia, dĺžku periódy, kmitočet. Vysvetlite a zdôvodnite váš postup merania s dosiahnuté výsledky. (53)

3. Napätie na Y vstupe osciloskopu z cvičenia 2. ponechajte nezmenené a vypnite časovú základňu. Vysvetlite čo možno určiť alebo zmerať zo vzniknutého obrazca. Určte, zmerajte, zdôvodnite. (53)

4. Napätie z cvičenia 3. prived'ite na X vstup osciloskopu a okalibrujte ho (určte citlivosť K_x). (53)

5. Privádzajte postupne harmonické, trojuholníkové, obdĺžnikové, harmonické jednocestne usmerené nefiltrované, potom kondenzátorom filtrované napätie na Y vstup osciloskopu (so zapnutou časovou základňou) a súčasne ich merajte jednosmerným aj striedavým elektronickým voltmetrom. Porovnajate namerané hodnoty s výsledkami úlohy 8. Vysvetlite a zdôvodnite súhlas i rozdiely. (53)

6. Skladajte na osciloskope v dvoch navzájom kolmých smeroch dve harmonické napätia rôznych kmitočtov. Jedno z napätí odvod'te od energetickej siete $f = 50 \text{ Hz} \pm 1\%$. Na základe Lissajousových obrazcov okalibrujte stupnicu generátora na rozsahu 10 – 100 Hz. (54)

7. Zobrazte VA charakteristiky zapojené z obr. 48 a zakreslite ich. do spoločného grafu s úlohou 11. Prediskutujte a vyhodno'te výsledky. (55)

8. Zostavte si obvody z úlohy 12, zmerajte ich amplitúdové a fázové charakteristiky, určte prenosovú charakteristiku a zakreslite ich do spoločných grafov s úlohou 12. (57)

9. Pre obvody z cvičenia 8 zobrazte prechodové javy. Zobrazené priebehy zakreslite do spoločného grafu s úlohou 13. Pri meraní použite vonkajšiu synchronizáciu vstupným napät'ovým skokom. Vysvetlite príčiny rozdielov charakteristík nameraných a vypočítaných. (58)

10. Zostavte usmerňovač navrhnutý v úlohe 14. Zmerajte jeho zaťažovaciu charakteristiku pre zaťažovací prúd $I \in \langle 0; 50 \rangle \text{ mA}$. Určte výstupný odpor usmerňovača a zvlnenie pre prúd $I = 30 \text{ mA}$. (65)

11. K usmerňovaču z cvičenia 10 pripojte vami navrhnutý stabilizátor z úlohy 15 a zmerajte činiteľa stabilizácie pre zmenu záťaže $\langle 5 - 15 \rangle \text{ mA}$. Pozorujte osciloskopom časové priebehy napätí v rôznych uzloch obvodu. (67)

12. Zapojte zosilňovač podľa vášho návrhu z úlohy 17. Vstupné napätie nastavte tak, aby pri kmitočte 1 kHz bolo výstupné napätie 1 V (efektívna hodnota pre harmonické napätie). Zmerajte zosilnenie. Zopakujte cvičenie pre efektívnu hodnotu výstupného napätia 0,4 V. (73)

13. Pri konštantnom vstupnom napätí z cvičenia 12 pozorujte a opíšte (ev. zmerajte) závislosť amplitúdy, fázového posunu a skreslenia tvaru výstupného napätia od kmitočtu v rozsahu 20 Hz až 100 kHz. Určte a zdôvodnite hraničný kmitočet zosilňovača. (73)

14. Zapojenie z cvičenia 12 a 13 zmeňte na zapojenie podľa obr. 69. Podľa vášho návrhu z úlohy 16 zobrazte prevodovú charakteristiku zosilňovača pri kmitočte 20 Hz (amplitúda vstupného napätia $> U_b/K_u$). Zo zobrazenia určte dynamický rozsah zosilňovača a jeho zosilnenie. (74)

15. Zostavte sčítavací zosilňovač podľa vášho návrhu z úlohy 18. Sčítavajte dve jednosmerné, jednosmerné a striedavé, dve striedavé napätia rôznych kmitočtov. Súčty napätí sledujte osciloskopicky a vyhodnoťte. (75)

16. Zostavte vami navrhnutý rozdielový zosilňovač z úlohy 19. Presvedčte sa, že prenáša hlavne rozdiel vstupných napätí a nastavte jeho zosilnenie na hodnotu 10. (76)

17. Zmerajte úroveň potlačenia súčtového signálu rozdielového zosilňovača z cvičenia 16 pri kmitočte 1 kHz. Ako by ste zvýšili úroveň potlačenia súčtového signálu? (76)

18. Zostavte komparátor podľa vášho návrhu z úlohy 20. Pozorujte a vysvetlite tvar prevodovej charakteristiky pre rôzne napätia $U \in \langle -U_b, +U_b \rangle$. (77)

19. Pozorujte a vysvetlite priebeh výstupného napätia komparátora z cvičenia 18 pre rôzne napätia U a harmonické napätie u_i , ktorým zvonku synchronizujete časovú základňu osciloskopu. (78)

20. Zopakujte cvičenia 18 a 19 pre zapojenie z úlohy 21. (79)

21. Zostavte multivibrátor navrhnutý v úlohe 22. Pozorujte a vysvetlite vplyvy zmien veľkosti každého z potenciometrov na priebehy napätí na oboch vstupoch a výstupe operačného zosilňovača. (81)

22. Zmerajte najnižší a najvyšší kmitočť multivibrátora a porovnajte ich s výsledkom úlohy 22. Vysvetlite prípadné rozdiely. (81)

23. Zapojte generátor podľa obr. 83e hodnotami parametrov prvkov z úlohy 23. Zistite kmitočťový rozsah a tvary výstupných napätí pre rôzne kombinácie zopnutí spínačov P_1 a P_2 a polarít diód. (85)

24. Upravte zapojenie generátora podľa obr. 87, kde $R_4 = 100 \text{ k}\Omega$ a $P = 10 \text{ k}\Omega$. Zistite, ako sa menia výstupné napätia generátora so zmenou napätia U . (85)

25. Zostavte usmerňovač podľa vášho návrhu z úlohy 24. Pozorujte a opíšte veľkosť a tvar výstupného napätia usmerňovača v závislosti od kmitočtu s amplitúdy vstupného harmonického napätia. (85)

26. Zostavte zosilňovač z úlohy 25 a overte interval nastavenia U_K . (92)

27. Overte vzťah $I_K = \beta I_B$ ($\beta \approx \beta$). Prúdy určujte zo spádov napätí na príslušných odporoch. Určte približnú hodnotu β . (92)

28. Na vstup zosilňovača privedte harmonický signál s amplitúdou 0,14 V a kmitočtom 1 kHz. Pozorujte a opíšte tvar výstupného napätia pre rôzne hodnoty U_K . Potom porovnajte a opíšte výstupné napätie pre rôzne hodnoty vstupného napätia a rôzne hodnoty U_K . Ujasnite si činnosť zosilňovača. (92)

29. Zmerajte závislosť zosilnenia od spádu napätia na odpore 1 k Ω . Merajte pri neskreslenom výstupnom napätí. (92)

30. Zmerajte dolný hraničný kmitočť pre $U_K = 5 \text{ V}$. Presvedčte sa, že výstupné napätie pokleslo účinkom impedancie väzobného kondenzátora. Vypočítajte r_{be} a porovnajte s teoretickou hodnotou. (92)

31. Vymeňte tranzistor za iný kus a zistite čo sa zmenilo. (92)

32. Zostavte zosilňovač podľa obr. 98 a zmerajte jeho zosilnenie. Zopakujte cvičenie 31. (92)

33. Pripojte vstup zosilňovača z cvičenia 32. na vstup zosilňovača z cvičenia 26. a zmerajte celkové i čiastkové zosilnenia. (92)

34. Zapojte zosilňovač podľa obr. 101 a určte veľkosť kolektorového prúdu. (94)

35. Privedte na vstup zosilňovača z cvičenia 34 harmonické napätie

$$u_i = 10 \text{ mV} \sin(2\pi f \cdot 100 \text{ kHz} \cdot t)$$

a zmenou kmitočtu sa presvedčte o selektívnych vlastnostiach zosilňovača. Určte rezonančný kmitočť, zosilnenie pri ňom a vypočítajte z nameraných hodnôt R_0 a Q . (94)

36. Zmeňte tvar vstupného napätia na trojuholníkový, potom obdĺžnikový a pre ne oscilograficky zobrazte výstupné napätia. Vysvetlite pozorovaný jav. (94)

37. Zostavte zosilňovač podľa obr. 103, počet závitov $n_1 = 3$, odpor $R \rightarrow \infty$. Výmenou vývodov cievky L_1 sa presvedčte o účinku spätnej väzby. Merajte pri neskreslenom výstupnom napätí. (96)

38. V zosilňovači z cvičenia 37 zvyšujte postupne počet závitov n_1 až po nasadenie vlastných kmitov. Porovnajete minimálny počet závitov pre splnenie podmienky samobudenia s teoretickou hodnotou z úlohy 33. Odhadnite koeficient k . (96)

39. Zmerajte kmitočet oscilátora z cvičenia 38 a porovnajete ho s teoretickou hodnotou z úlohy 29. Vysvetlite príčiny rozdielu. (96)

40. Zopakujte cvičenie 38 pri pripojenom odpore R a zmerajte závislosť $n_1 = n_1(1/R)$. Z grafu tejto závislosti určte R_0 a k . Výsledky porovnajete a predošlými výsledkami. (96)

41. Zostavte stabilizovaný zdroj podľa obr. 106 a zistíte v akom rozsahu možno regulovať výstupné napätie. Porovnajete s výsledkami úlohy 35. (98)

42. Pozorujte osciloskopom časové priebehy napätí v rôznych uzloch stabilizovaného zdroja pre rôzne polohy bežcov oboch potenciometrov a ujasnite si funkciu jednotlivých častí zapojenia. (98)

43. Zmerajte závislosť výstupného napätia od napätia na bežci potenciometra P a vysvetlite jej priebeh. (98)

44. Zmerajte závislosť výstupného napätia od výstupného prúdu pre maximálne výstupné napätie naprázdno a potom pre polovičnú hodnotu maximálneho výstupného napätia naprázdno. Maximálny prúd = 50 mA. Vysvetlite priebeh nameraných závislostí. (98)

45. Pri výstupnom napätí 1 V a prúde 50 mA zmerajte kolektorové napätie tranzistora a vypočítajte tepelný výkon, ktorý v ňom vzniká. Presvedčte sa hmatom, že tranzistor sa zahrieva. (98)

46. Zostavte multivibrátor podľa vášho návrhu z úlohy 37. Napájacie napätie voľte najviac 5 V. Zmerajte opakovací kmitočet a pozorujte osciloskopom časové priebehy signálu v rôznych uzloch obvodu. (100)

47. Zobrazte prevodovú charakteristiku klopného obvodu z obr. 110. (101)

48. Zmerajte preklápacie napätia klopného obvodu a porovnajete s výsledkom úlohy 38. (101)

LITERATÚRA

- [1] MAYER, D.: *Úvod do teorie elektrických obvodů*. Praha : SNTL, ALFA, 1978.
- [2] ANGOT, A.: *Užitá matematika pro elektrotechnické inženýry*. Praha : SNTL, 1972.
- [3] PÍRKO, Z. – VEIT, J.: *Laplaceova transformace*. Praha : SNTL, ALFA, 1970.
- [4] SIGORSKIJ, V. P.: *Riešenie elektrónkových a tranzistorových obvodov*. Bratislava : SVTL, SNTL, 1963.
- [5] LABAJ, Z. – STANĚK, U.: *Tranzistorové a elektronkové voltmetry*. Praha : SNTL, 1970.
- [6] MATYÁŠ, V.: *Elektronické měřicí přístroje*. Praha : SNTL, ALFA 1981.
- [7] FRANK, H. – ŠNEJDAR, V.: *Principy a vlastnosti polovodičových součástek*. Praha : SNTL, 1976.
- [8] JURKOVIČ, K. – ZODL, J.: *Príručka nízkofrekvenčnej techniky*. Bratislava : ALFA, 1985.
- JURKOVIČ, K. – ŠKROVÁNEK, A.: *Príručka nízkofrekvenčnej techniky*. Bratislava : SVTL, 1965.
- [9] DOSTÁL, J.: *Operační zesilovače*. Praha : SNTL, 1981.

RNDr. Peter Kohaut, doc. RNDr. František Kundracik, PhD.

ŠPECIÁLNE PRAKTIKUM Z ELEKTRONIKY I

Vedúci katedry: doc. RNDr Andrej Jaroševič, CSc.
Vydala Katedra rádiofyziky FMFI Univerzity Komenského, Bratislava
Technicky redigoval a spracoval: Peter Kohaut
Korigovali autori

Rozsah 115 strán, 10,68 AH, 11,11 VH, upravené elektronické vydanie, fomát A/4, zadané do výroby vo februári 2003, vyšlo v apríli 2003.

ISBN 80 – 223 – 0774 – 0