I. ELEKTRONICKÉ OBVODY

Návrhy na složení obvodů, výpočty hodnot jednotlivých součástek elektronických obvodů i jejich praktická realizace tvoří podstatnou část mladého vědního oboru – elektroniky. Proto se elektronickými obvody budeme podrobně zabývat.

Elektronický obvod vzniká spojením jedné součástky nebo většího počtu součástek se zdrojem elektrické energie. Po připojení zdroje prochází obvodem elektrický proud. Součástky, ze kterých se elektronický obvod skládá, se nazývají obvodové součástky.

1. SOUČÁSTKY ELEKTRONICKÝCH OBVODŮ

Pojmem obvodová součástka označujeme základní, dále nedělitelnou část elektronického obvodu, která má přesně dané elektrické vlastnosti. Základními obvodovými součástkami jsou cívka, kondenzátor a rezistor, ze složitějších prvků jmenujme diodu a tranzistor. Obvodové součástky jsou charakterizovány parametry. Kondenzátor charakterizuje parametr kapacita C, cívku charakterizuje indukčnost L a rezistor je charakterizován odporem R.

Obvodové součástky můžeme podle chování a zapojení v obvodu rozdělit do několika skupin. Podle toho, zda součástky mají schopnost chovat se v obvodu jako zdroj (zdroj dodává do obvodu výkon) nebo jako spotřebič (spotřebič výkon odebírá), rozdělujeme je na aktivní a pasívní.

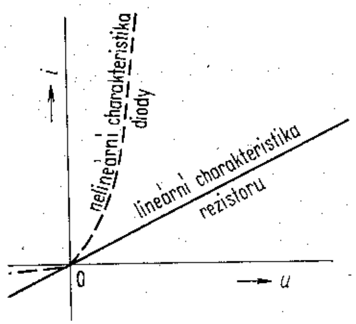
Aktivní nazýváme tedy ty součástky, které se v obvodu chovají jako zdroj elektrické energie. Aktivní jsou tedy zdroje elektrické energie (baterie) nebo součástky, které se jako zdroje chovají. Příkladem součástek, které se v obvodu chovají jako spotřebiče i jako zdroje, jsou např. fotodioda nebo tranzistor jako zesilovací součástka.

Pasívními součástkami jsou rezistory, kondenzátory, cívky, ale také polovodičové součástky, jako jsou diody, termistory a varikapy, které jsou všechny pouze prostým spotřebičem elektrické energie a v obvodu se nikdy nechovají jako zdroj.

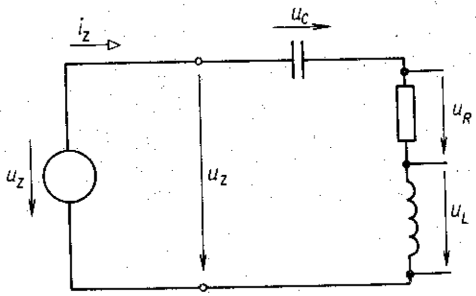
Jiným hlediskem pro rozdělování obvodových součástek je jejich kmitočtová závislost. Za *kmitočtově nezávislé* obvodové součástky považujeme při relativně nižších kmitočtech rezistor, diodu i tranzistor. Jejich elektrické hodnoty se totiž s kmitočtem nemění. Teprve při poměrně vysokých kmitočtech se začne uplatňovat jejich kmitočtová závislost. Ta je ovšem způsobena vedlejšími, nežádoucími (parazitními) vlivy. Čím vyšší je kmitočet, tím více se různé parazitní kapacity a indukčnosti uplatňují. Při velmi vysokých kmitočtech zcela znemožňují původní funkci součástky.

Za *kmitočtově závislé* obvodové součástky považujeme kondenzátory, jejichž impedance se se vzrůstajícím kmitočtem zmenšuje, a cívky, jejichž impedance se s kmitočtem zvětšuje.

Při velmi vysokých kmitočtech se u kondenzátorů začne uplatňovat parazitní sériová indukčnost a u cívek paralelní kapacita, takže se obě součástky mohou chovat výjimečně.



Obr. 1. Lineární a nelineární závislost proudu *i* na napětí *u*



Obr. 2. Znázornění různých obvodových veličin

Dalším důležitým hlediskem pro rozdělení obvodových součástek je závislost jejich základních hodnot na velikosti připojeného napětí a procházejícího proudu, která se nazývá *charakteristická funkce*. Grafický záznam charakteristické funkce je voltampérová charakteristika. Podle jejího tvaru rozdělujeme součástky na *lineární* a *nelineární*. Na obr. 1 je nakreslena závislost proudu procházejícího rezistorem *R* na napětí.

Charakteristika má tvar přímky. Jde tedy o součástku lineární; proud roste lineárně s napětím. Podobně je tomu u kondenzátoru a cívky.

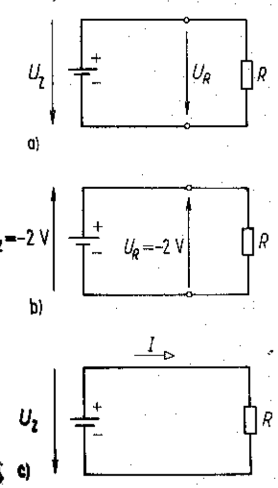
Všechny diody, tranzistor, termistor a všechny ostatní polovodičové součástky nemají závislost mezi proudem a napětím lineární. Jako příklad je na obr. 1 vynesena charakteristika polovodičové diody. Proud procházející diodou nelze určit z Ohmova zákona. Elektronické součástky, které vykazují tuto vlastnost, nazýváme nelineární.

Poznámka. Je třeba upozornit, že lineární součástky nevykazují linearitu vždy. Odpor se např. poněkud mění s teplotou (při velkém proudu se součástka ohřeje, a tím změní své vlastnosti) apod.

1.1. Obvodové veličiny

Napětí *U* a elektrický proud *I* v obvodu se nazývají *základní obvodové veličiny*. V obvodu na obr. 2 jsou obvodovými veličinami napětí u_Z a proud i_Z zdroje, napětí u_R na rezistoru *R*, napětí u_L na cívce *L* a napětí u_C na kondenzátoru *C*. Dohodneme se, že malými písmeny budeme značit okamžité hodnoty napětí a proudu a velkými písmeny stejnosměrné hodnoty a efektivní hodnoty střídavých veličin.

K vystižení elektrických poměrů obvodu však nestačí znát pouze hodnoty napětí a proudu v obvodu. Je nutné znát také polaritu napětí a směr procházejícího proudu.



Obr. 3. Různě zvolená orientace proudu a napětí

Polarita napětí a směr proudu se označují jednosměrnou šipkou, která udává tzv. orientaci napětí nebo proudu. *Orientace* spolu s údajem o velikosti teprve jednoznačně určuje příslušnou obvodovou veličinu. Velikost napětí musí být doplněna znaménkem.

Napětí je kladné, jestliže šipka směřuje od bodu s vyšším potenciálem k bodu s nižším potenciálem. To je znázorněno na obr. 3a. Na obr. 3b jsme u téhož obvodu zvolili šipky, které označují vzájemně obrácenou orientaci. Je to správně; napětí musíme však označit jako záporné, znaménkem minus.

Zcela obdobně je to s orientací proudu. Pokud šipka směru proudu souhlasí s technickým směrem proudu (tedy od vyššího potenciálu k nižšímu potenciálu – od plus k minus), je znaménko u čísla udávajícího velikost proudu kladné (obr. 3c). Jestliže šipku obrátíme, nedopustíme se chyby, ovšem velikost proudu musíme označit jako zápornou.

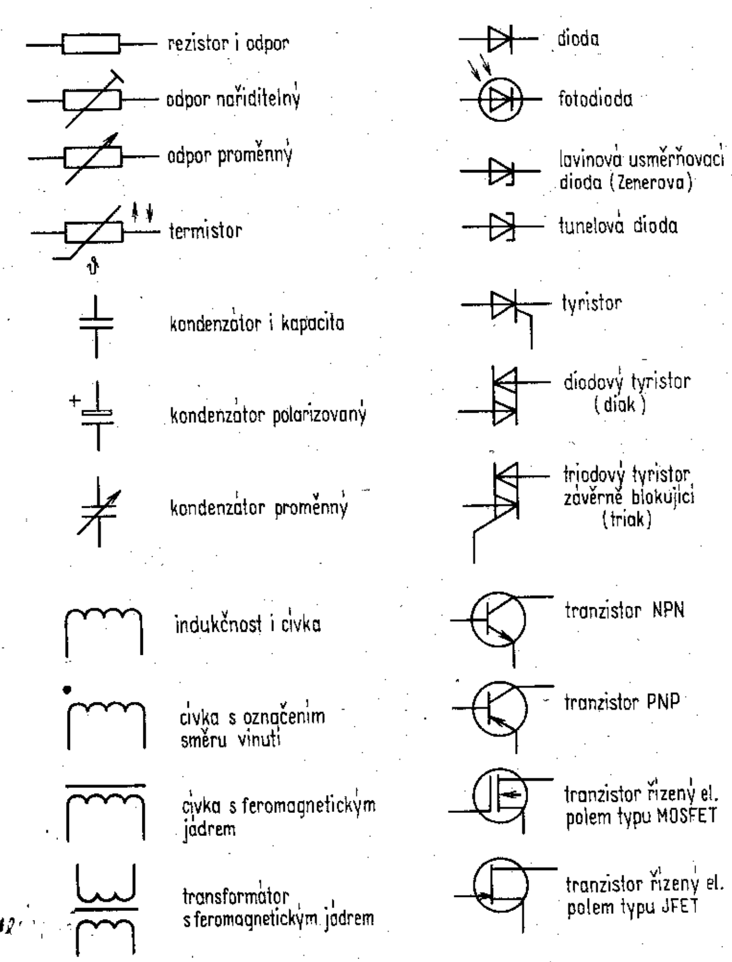
Pro lepší přehlednost je výhodné šipky vyznačující orientaci proudu a napětí vzájemně graficky odlišit. Hroty šipek napětí jsou otevřené, zatímco hroty šipek proudu zavřené (obr. 3).

1.2. Schéma a schematické značky

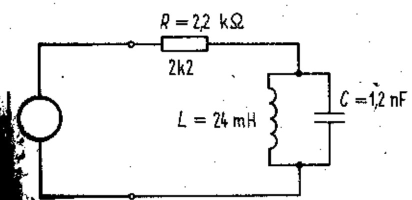
Použité součástky a jejich vzájemné propojení se vyznačují v zapojovacím plánu obvodu, kterému se říká schéma. Při kreslení schématu se musí používat dohodnuté schematické značky, které jsou symbolickým znázorněním všech součástek obvodu a jejich propojení. Na obr. 4 jsou uvedeny nejběžnější schematické značky elektronických součástek, na obr. 5 je příklad schematického znázornění jednoduchého elektrického obvodu.

Obvod na obr. 5 obsahuje zdroj střídavého napětí U_Z, rezistor R, cívku L a kondenzátor C. V schématu jsou také vyznačeny hodnoty součástek.

Pro snazší čitelnost hodnot na součástkách i ve schématech a pro stručnější psaní textu se hodnoty odporů a kondenzátorů označují zkráceně (neboli kódově). Bohužel ani u nás není kódové označení jednotné. Podle jednoho způsobu se místo označení 1 Ω, 23 Ω, 1 kΩ, 1,2 kΩ, 1 MΩ, 2,2 MΩ zkráceně píše 1, 23, 1k, 1k2, 1M, 2M2 apod. U kondenzátorů **se místo** hodnot 150 pF, 10 nF, 1,8 nF, 5 μF zkráceně píše 150, 10k, 1k8, **5M apod.** Podle tzv. značení A (kódu A) podniku TESLA se hodnoty



Obr. 4. Schematické značky hlavních elektronických obvodových součástek



Obr. 5. Příklad elektrického obvodu

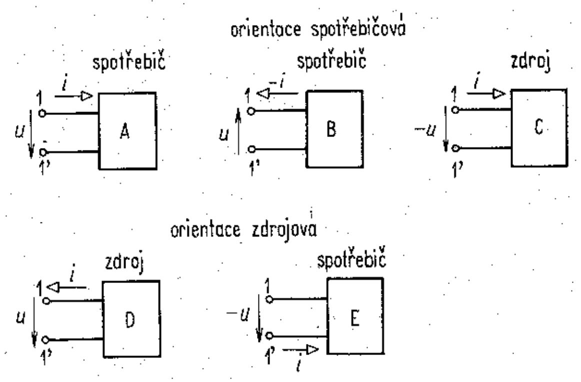
označují tak, jak bylo již uvedeno, pouze s tím rozdílem, že jednotky odporu v Ω a kapacity v pF se vyjadřují písmenem j: 15 Ω se označí 15j, 2,5 pF se označí 2j5.

Od let 1982 a 1983 výrobce našich součástek – k. p. TESLA Lanškroun používá ve svém katalogu výhradně tzv. kód B. Podle něj se hodnoty 0,1 Ω, 1 Ω, 10 Ω, 100 Ω, 2 kΩ, 200 kΩ a 3,3 MΩ označují R10, 1R0, 10R, 100R, 2K0, 200K a 3M3. U kondenzátorů je jednotkou kapacity farad. Hodnoty 0,15 pF, 1 pF, 10 pF, 1500 pF, 0,1 µF, 15 µF a 1500 µF se označují p15, 1p0, 10p, 1n5, 100n, 15µ a 1m5.

1.3. Elektrický dvojpól

Moderní, pro pochopení principů velmi názorná a jednoduchá cesta k poznání funkce elektrických součástek v obvodech vede přes základy teorie dvojpólů a čtyřpólů.

Elektrický dvojpól je jakákoliv elektrická součástka, která je do obvodu připojena dvěma svorkami $1-1'$ (obr. 6). Dvojpól si představme jako „černou skříňku", u které se zatím nestaráme o to, co je uvnitř. Zajímáme se však podrobně, jaké má tato skříňka – dvojpól vnější elektrické vlastnosti.



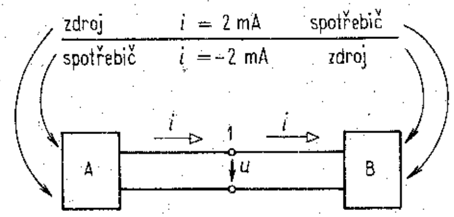
Obr. 6. Zdrojová a spotřebičová orientace u a i

Dnes se místo názvu dvojpól začíná používat název jednobran, neboť **skříňka** má jednu bránu, tvořenou dvojicí svorek $1-1'$. My se ale **v dalším** výkladu přidržíme klasického označení dvojpól.

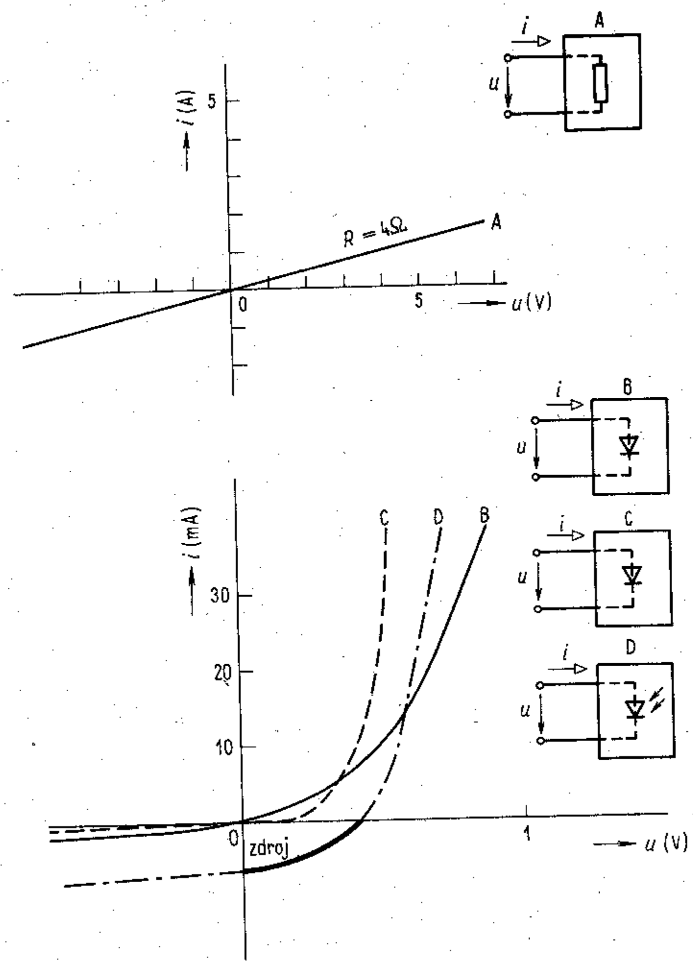
Abychom mohli jednoznačně popsat vlastnosti dvojpólu, musíme mít určenou orientaci proudu a napětí. To je vyznačeno na obr. 6. Při popisu, studiu nebo rozboru funkce nějakého obvodu nemusíme zpočátku vědět, jaký je skutečný technický směr procházejícího proudu a polarita napětí. Řešíme to tím, že si orientaci proudu sami zvolíme a vyznačíme ji ve schématu šipkami. Pak se ale může ukázat, že skutečný technický směr proudu v obvodu je obrácený, než jak ukazuje šipka. Nevznikla žádná chyba, neboť rozdíl mezi zvolenou orientací a skutečným technickým směrem proudu se koriguje znaménkem: proud je záporný, tedy $-i$. Podobně je tomu s napětím. Ukazuje-li šipka orientace od kladného potenciálu k zápornému (od plus k minus), je napětí kladné $(+u)$. Je-li však šipka orientace obrácená, tedy od záporného potenciálu ke kladnému (od minus k plus), je napětí záporné $(-u)$.

Dvojpól se může chovat buď jako spotřebič elektrické energie, nebo jako zdroj. To poznáme podle vzájemné orientace proudu a napětí a z voltampérové charakteristiky. Je výhodné si pamatovat: Směřují-li obě šipky označující orientaci napětí u a proudu i z jedné svorky nebo do jedné svorky, jde o orientaci spotřebičovou. To, zda je součástka zdrojem nebo spotřebičem, rozhodneme podle znaménka příkonu, tj. součinu proudu a napětí. Je-li příkon kladný, chová se dvojpól jako spotřebič elektrické energie (dvojpól A a B na obr. 6). Je-li součin napětí a proudu záporný, součástka dodává záporný „výkon", tj. výkon odebírá („záporný spotřebič"), a je tedy z fyzikálního hlediska zdrojem elektrické energie (dvojpól C).

Jsou-li obě šipky označující orientaci napětí u a proudu i jakoby v sérii (jedna do svorky a druhá z ní), jde o zdrojovou orientaci (dvojpól D a E). Je-li přitom součin napětí a proudu kladný, chová se dvojpól jako zdroj elektrické energie (dvojpól D). Je-li příkon záporný, součástka odebírá výkon, je to tedy „záporný" zdroj neboli spotřebič (dvojpól E).



Obr. 7. Při spojení dvou dvojpólů, mezi kterými prochází proud, se jeden vždy chová jako zdroj a druhý jako spotřebič elektrické energie



Obr. 8. Voltampérové charakteristiky různých dvojpólů

Dva dvojpóly na obr. 7 jsou spojeny a tvoří uzavřený systém. Prochází-li obvodem proud i, vždy se jeden dvojpól musí chovat jako zdroj a druhý jako spotřebič. Za určitých podmínek může dojít k výměně funkcí obou dvojpólů. Vlastnosti dvojpólu zůstávají zachovány. Tato výměna funkcí (zdroje za spotřebič a spotřebiče za zdroj) může nastat např. při

spojení dvou fotodiod, které budou střídavě různě osvětlovány, a v dalších případech.

Abychom mohli zcela jednoznačně popsat elektrické chování dvojpólu, musíme znát závislost proudu na napětí na svorkách $1-1'$.

Závislost napětí u na proudu i dvojpólu graficky vyjadřujeme pomocí *voltampérové charakteristiky*.

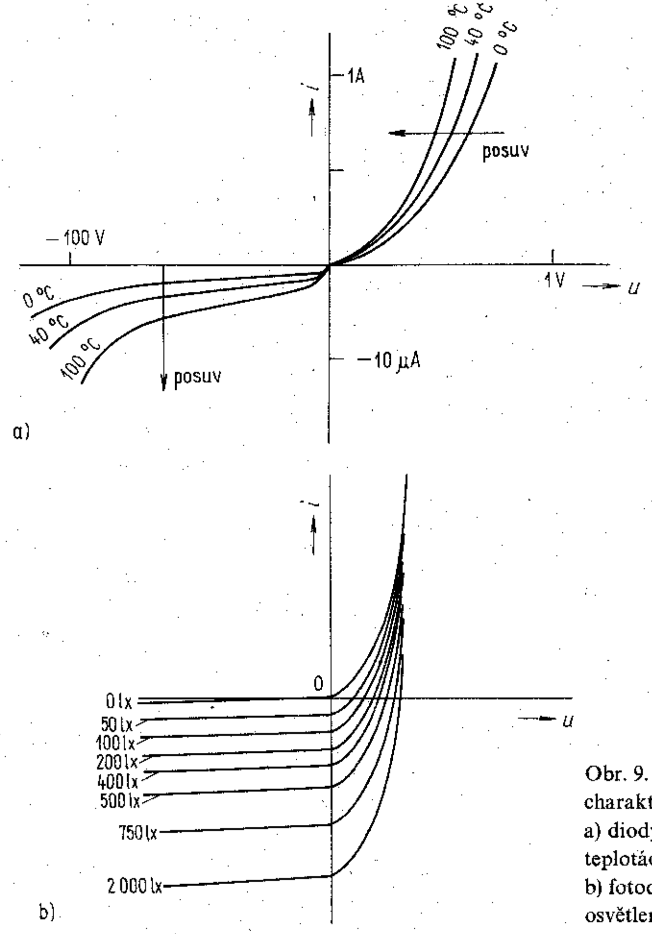
Na obr. 8 jsou různé typy voltampérové charakteristiky. Charakteristika dvojpólu A je přímka. Jde tedy o lineární spotřebič. Takovou charakteristiku má např. rezistor. Protože kreslení charakteristiky pro lineární rezistory by bylo zbytečné, vyjadřuje se závislost napětí na proudu konstantou. V našem případě je poměr

$$u/i = R = 4 \qquad (\mathrm{V, A; \Omega})$$

... plyne z obrázku. Uvedený výraz je Ohmův zákon. Konstanta R je ...trický odpor v ohmech (Ω).

...harakteristika dvojpólu B odpovídá germaniové diodě, charakteristika ...pólu C odpovídá křemíkové diodě. Dvojpól D je osvětlená fotodioda, ...voltampérová charakteristika neprobíhá nulovým bodem. Při kladném ...í 0,5 V se obrací směr proudu. Část charakteristiky probíhá ve ...adrantu, ve kterém je vyznačena plnou čarou. V této části charakteris... ...e dvojpól chová jako zdroj elektrické energie, v ostatních částech ...spotřebič. Výrobci součástek někdy při uvádění charakteristik ...jí v různých kvadrantech souřadnicové soustavy různá měřítka. ...u části charakteristiky přehlednější, a usnadní se tak přesné ...dnot. Poznáte to jednak podle změny měřítka na ose a jednak ...hlého zlomu na charakteristice. Tento zlom je ovšem způsoben ...ým zobrazením souvislé čáry při změně měřítka, ve skutečnosti ... nebo skok v hodnotách součástka nevykazuje.

...rovou charakteristikou spolu s orientací proudu a napětí ...načně popsány základní vlastnosti dvojpólu. Voltampérová ... je pro daný dvojpól platná jen při určitých podmínkách. ... mění svůj odpor v závislosti na teplotě. Proto jeho ...harakteristika nebo velikost odporu platí jen při určité ...diody, zejména germaniové, je teplotní závislost poměrně ... její vliv na voltampérovou charakteristiku zachytit ...do souřadnicových os vynést soustavu voltampérových ...á platí při určité teplotě okolí (obr. 9a).



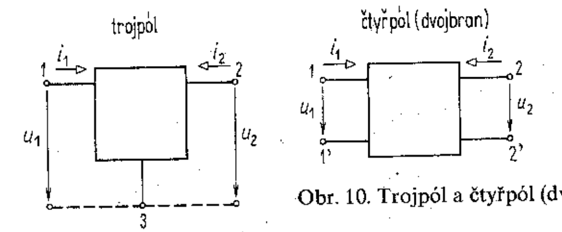
Obr. 9. Voltampérové charakteristiky
a) diody při různých teplotách,
b) fotodiody při různém osvětlení

U některých dvojpólů je závislost voltampérové charakteristiky na další fyzikální veličině (teplota, tlak, osvětlení, ale i napětí nebo proud) pro jejich funkci žádaná. Hovoříme pak o *řízeném dvojpólu* (libovolnou fyzikální veličinou), který je charakterizován plochou v trojrozměrném prostoru. Typickým řízeným dvojpólem je fotodioda, kde řídicí veličinou je osvětlení. Její voltampérové charakteristiky pro různá osvětlení jsou na obr. 9b.

1.4. Elektrický čtyřpól

Některé elektronické součástky (např. tranzistory) mají více než dva vývody, nazývají se vícepóly. Vývody vícepólu tvoří spolu dvojice. Dvojice svorek, které slouží k přivádění signálu, se nazývají vstupní svorky, svorky, kterými se signál odebírá, se nazývají výstupní svorky. Tranzistor má tři svorky pro emitor, bázi a kolektor, je to tedy trojpól. Také elektronka je trojpól; za svorky z hlediska signálu považujeme katodu, anodu a řídicí mřížku. Příkladem vícepólu se čtyřmi svorkami – tedy čtyřpólu – je transformátor.

Trojpól je pro sledování funkce málo názorný, změníme proto jednoduchým způsobem trojpól na čtyřpól: jednu svorku původního trojpólu použijeme pro dvě svorky společně (obr. 10). Vznikne tím čtyřpól neboli dvojbran. My se přidržíme staršího, vžitého označení čtyřpól. Svorky (bránu) 1 – 1′ považujeme za vstupní, svorky 2 – 2′ (druhá brána) jsou výstupní.



Obr. 10. Trojpól a čtyřpól (dvojbran)

Vstupními svorkami prochází proud i_1 při napětí u_1, výstupními svorkami prochází proud i_2 při napětí u_2. Nesmíme zapomenout na orientaci proudu a napětí. Obvyklá (spotřebičová) orientace je vyznačena na obr. 10.

Na obě strany čtyřpólu, vstup a výstup, nemůžeme pohlížet jako na dva samostatné dvojpóly. Čtyřpóly jsou oproti dvojpólům složitější – na výstup působí vstup a naopak vstup je více či méně ovlivňován výstupem.

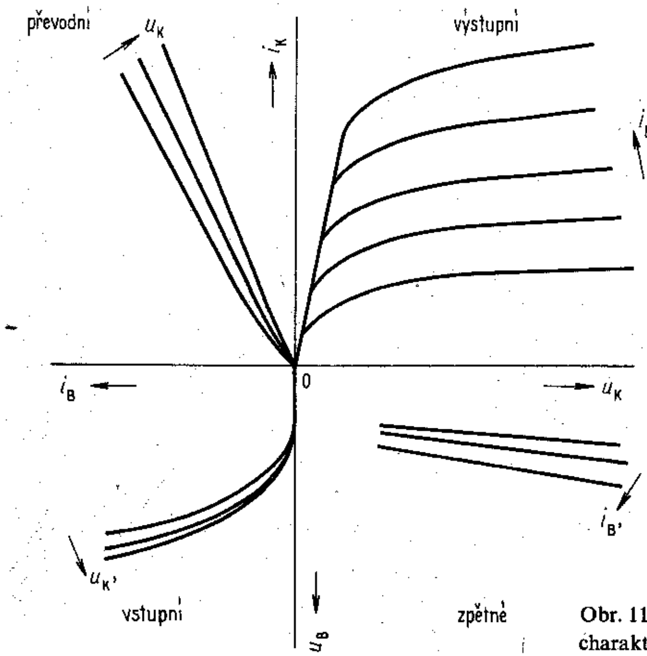
Podobně jako dvojpól je i čtyřpól buď lineární, nebo nelineární. Elektrické poměry lineárního dvojpólu můžeme poměrně snadno popsat číselnými hodnotami a obvod řešit matematicky. To si ukážeme v odstavci 2.1. Vlastnosti nelineárního čtyřpólu můžeme však popsat pouze soustavou charakteristických funkcí, jejichž grafickou podobou jsou voltampérové charakteristiky čtyřpólu.

Budeme si pamatovat, že v každé soustavě charakteristik se graficky zobrazuje vždy závislost tří proměnných hodnot ze čtyř: z napětí u_1, u_2 a z proudů i_1, i_2.

Je-li v grafu uvedena závislost dvou vstupních proměnných a jedné výstupní proměnné (u_1, i_1, u_2) nebo (u_1, i_1, i_2), popisuje soustava charakteristik poměry na vstupu. Je-li v grafu znázorněna závislost dvou výstupních proměnných a jedné vstupní proměnné, tj. (u_2, i_2, u_1) nebo (u_2, i_2, i_1), popisuje soustava charakteristik poměry na výstupu.

Z předcházejícího výkladu plyne, že chování čtyřpólu je dostatečně popsáno dvěma soustavami charakteristik:

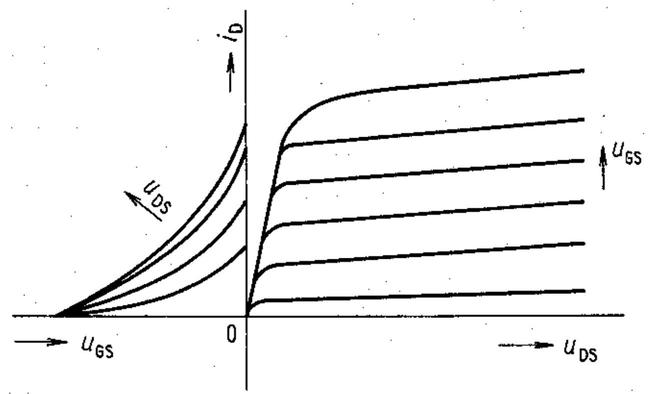
1. *Soustavou vstupních charakteristik*, které udávají vztah mezi vstupními veličinami, nebo zpětnými charakteristikami, které udávají vztah mezi vstupní veličinou jako závisle proměnnou a výstupní veličinou jako nezávisle proměnnou.



Obr. 11. Úplná soustava charakteristik čtyřpólu

2. *Soustavou výstupních charakteristik*, které udávají vztah mezi výstupními veličinami, nebo převodními charakteristikami, které udávají vztah mezi výstupní veličinou jako závisle proměnnou a vstupní veličinou jako nezávisle proměnnou.

Na obr. 11 jsou všechny čtyři soustavy charakteristik čtyřpólu. Všimněte si obvodových veličin na osách a srovnejte je do přehledné tabulky. Jde o charakteristiky tranzistoru.

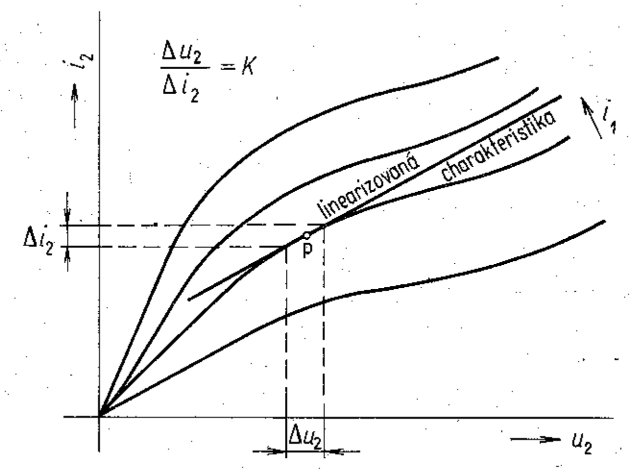


Obr. 12. Výstupní a převodní charakteristiky čtyřpólu

Na obr. 12 jsou výstupní a převodní charakteristiky tranzistoru řízeného elektrickým polem (FET). Protože proud řídicí elektrody G považujeme za nulový, vstupní a zpětné charakteristiky nemusíme uvažovat.

1.5. Parametry čtyřpólu

Práce s voltampérovými charakteristikami není někdy jednoduchá a charakteristiky určitého čtyřpólu (elektronky, tranzistory apod.) nebývají vždy k dispozici. Pak k úvahám a výpočtům používáme tzv. čtyřpólové parametry (parametry dvojbranu). Ty získáme měřením nebo ze známých charakteristik tím, že v určitém zvoleném bodě nahradíme křivku charakteristiky přímkou. Říkáme, že křivku linearizujeme. To je znázorněno ve výstupních charakteristikách na obr. 13. Potom v okolí zvoleného tzv. pracovního bodu P můžeme s dostatečnou přesností matematicky



Obr. 13. Princip linearizace

vyjadřovat závislost obvodových veličin, tj. v našem případě vzájemnou závislost i_2, u_2 a i_1 pomocí velmi jednoduchých vztahů.

$$\Delta u_2/\Delta i_2 = K$$

(i_1 je konstantní, neboli změny Δi_1 jsou rovny nule), což tvarem odpovídá Ohmovu zákonu. K je konstanta a udáváme ji v ohmech. Ale pozor! Nejde o stejnosměrnou hodnotu výstupního odporu čtyřpólu, ale o hodnotu tzv. diferenciálního odporu. Je to hodnota, která udává závislost změn proudu Δi_2 na změnách napětí Δu_2 a nikoli závislost stejnosměrného proudu I_2 na stejnosměrném napětí U_2. Uvědomte si dobře rozdíl mezi diferenciálními hodnotami (změnami), se kterými pracujeme, a stejnosměrnými hodnotami, které nás zde nezajímají.

Odvození diferenciálního odporu z charakteristik bylo pouze ukázkou, jak lze získat jeden z tzv. diferenciálních parametrů čtyřpólu, kterých lze z různých závislostí odvodit mnoho. Přitom je nutné vždy pamatovat na to, že každá hodnota diferenciálního čtyřpólového parametru platí vždy pro určitý pracovní bod a jeho okolí. V katalozích a údajích výrobců se přesto udávají číselné hodnoty některých čtyřpólových parametrů. Ty ovšem také platí pouze pro určité okolí pracovního bodu. Ten je zvolen tak, aby údaj s co největší přesností platil pro dostatečně širokou, v praxi používanou oblast daného čtyřpólu.

V praxi se nejčastěji používají diferenciální čtyřpólové parametry. Admitanční parametry y mají význam diferenciální admitance a jednotku vodivosti (S). Hybridní parametry h mají různé fyzikální jednotky i význam.

Parametry označené ! si dobře zapamatujte.

$y_{11} = \left(\frac{\Delta i_1}{\Delta u_1}\right)_{u_2=\mathrm{konst}}$ – vstupní diferenciální vodivost při konstantním napětí u_2 (při výstupu nakrátko)

$y_{12} = \left(\frac{\Delta i_1}{\Delta u_2}\right)_{u_1=\mathrm{konst}}$ – zpětná diferenciální vodivost při konstantním napětí u_1 (při vstupu nakrátko)

! $y_{21} = \left(\frac{\Delta i_2}{\Delta u_1}\right)_{u_2=\mathrm{konst}}$ – převodní diferenciální vodivost při konstantním napětí u_2 (při výstupu nakrátko)

$y_{22} = \left(\frac{\Delta i_2}{\Delta u_2}\right)_{u_1=\mathrm{konst}}$ – výstupní diferenciální vodivost při konstantním napětí u_1 (při vstupu nakrátko)

! $h_{11} = \left(\frac{\Delta u_1}{\Delta i_1}\right)_{u_2=\mathrm{konst}}$ – vstupní diferenciální odpor při konstantním napětí u_2 (při výstupu nakrátko), (Ω)

$h_{12} = \left(\frac{\Delta u_1}{\Delta i_2}\right)_{i_1=\mathrm{konst}}$ – činitel zpětného přenosu napětí při konstantním proudu i_1 (při vstupu naprázdno), (bez rozměru)

!! $h_{21} = \left(\frac{\Delta i_2}{\Delta i_1}\right)_{u_2=\mathrm{konst}}$ – proudový zesilovací činitel při konstantním napětí u_2 (při výstupu nakrátko), (bez rozměru)

$h_{22} = \left(\frac{\Delta i_2}{\Delta u_2}\right)_{i_1=\mathrm{konst}}$ – výstupní diferenciální vodivost při konstantním proudu i_1 (při vstupu naprázdno), (S)

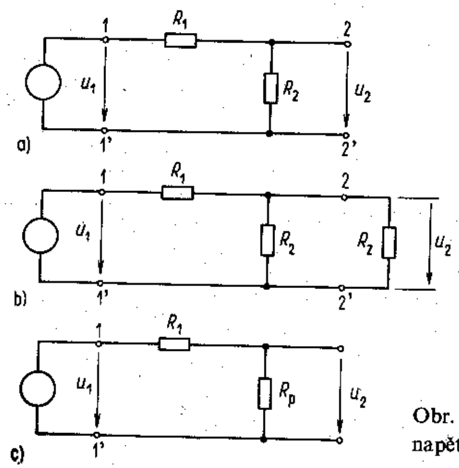
Zatím jsme uvažovali nelineární čtyřpóly, tj. takové, u kterých není závislost mezi proudy a napětími lineární. Ovšem čtyřpól může být i velmi jednoduchý, složený pouze z lineárních obvodových součástek. Práce s charakteristikami lineárních čtyřpólů a s diferenciálními parametry by byla nepohodlná. Proto vlastnosti lineárních čtyřpólů obvykle vyjadřujeme jen matematicky.

2. VLASTNOSTI JEDNODUCHÝCH ELEKTRICKÝCH OBVODŮ

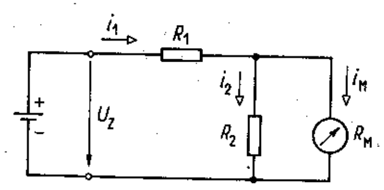
Znalost vlastností jednoduchých elektrických obvodů složených z pasívních obvodových součástek tvoří nezbytný základ pro pochopení dějů ve složitějších elektronických obvodech. Jde především o pochopení funkce děličů proudu a napětí ze součástek kmitočtově nezávislých a kmitočtově závislých, o pochopení podstaty kmitavého obvodu a o řešení obvodů s nelineárními dvojpóly.

2.1. Odporové děliče

Spojíme-li vzájemně dva rezistory nebo více rezistorů, rozděluje se na nich elektrické napětí nebo proud ve stejném poměru, jako je poměr jejich odporů. Na obr. 14a je jednoduchý obvod, který vznikl spojením dvou rezistorů do série. Obvod má dvě brány – čtyři svorky, jde tedy o typický čtyřpól se vstupem 1 – 1′ a výstupem 2 – 2′. Na první pohled je zřejmé, že jde o čtyřpól lineární, kmitočtově nezávislý, a proto vztahy mezi vstupními hodnotami u_1 a i_1 a výstupními hodnotami u_2 a i_2 budou jednoduché. Protože rezistory jsou obvodové prvky kmitočtově nezávislé, bude se obvod chovat stejně při připojení jak střídavého napětí, tak i stejnosměrného napětí na svorky 1 – 1′.



Obr. 14. Odporové děliče napětí



Obr. 15. Elektrický obvod k výpočtu obvodových veličin

Jestliže obvod není zatížen, rozdělí se napětí přivedené na svorky 1 – 1′ v poměru odporů rezistorů R_1 a R_2. Otázka přitom zní: Jak velké je napětí u_2?

Z obrázku plyne

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Po úpravě dostaneme

$$u_2 = u_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Je-li $u_1 = 12\,\text{V}$, $R_1 = 17{,}5\,\Omega$, $R_2 = 7{,}5\,\Omega$, vyjde pro u_1 po dosazení do předcházející rovnice hodnota

$$u_2 = 12 \,.\, \frac{7{,}5}{25} = 3{,}6\,\text{V}$$

V uvedeném příkladu jsme předpokládali, že výstup děliče (tj. svorky 2 – 2′) je nezatížený nebo že je ke svorkám připojen spotřebič, který odebírá nepatrný proud v porovnání s rezistorem R_2.

Na obr. 14b je k výstupu děliče připojen spotřebič s odporem R_Z. V tom případě je nutné tento odpor zahrnout do výpočtu. Protože rezistor R_Z je paralelně připojen k rezistoru R_2 děliče, můžeme nakreslit náhradní schéma děliče podle obr. 14c, které je s předcházejícím schématem ekvivalentní. Odpor R_P v náhradním obvodu snadno vypočítáme ze vztahu

$$R_P = \frac{R_2 R_Z}{R_2 + R_Z}$$

Na obr. 15 je elektrický dvojpól, ve kterém se procházející proud $i_1 = 10$ mA dělí do dvou větví: v jedné větvi je měřicí přístroj, kterým má procházet proud $i_M = 1$ mA a má na něm být napětí 1 V. Napětí zdroje U_Z je 10 V. Z uvedených údajů máme zjistit všechny ostatní obvodové veličiny včetně odporů rezistorů R_1, R_2 a odporu měřicího přístroje.

Můžeme postupovat takto:

1. Má-li být na měřicím přístroji napětí 1 V a má-li jím procházet proud 1 mA, musí mít odpor 1 kΩ.

2. Prochází-li měřicím přístrojem proud 1 mA, musí druhou větví děliče (rezistorem R_2) procházet proud 10 mA − 1 mA = 9 mA.

3. Rezistor R_2 musí mít odpor $R_2 = 1\ \text{V}/9\ \text{mA} = 111\ \Omega$.

4. Rezistor R_1 má odpor $R_1 = 9\ \text{V}/10\ \text{mA} = 900\ \Omega$.

Obdobných příkladů různých děličů proudu a napětí nacházíme v praxi mnoho. Vždy postupujeme úvahou. S použitím Ohmova zákona a Kirchhoffových zákonů je řešení obvykle velmi jednoduché.

2.2. Nelineární dělič napětí – zatěžovací přímka a pracovní bod

Na obr. 16a je znázorněn dvojpól A, připojený k dvojpólu B. Dvojpól A tvoří baterie s napětím 1,5 V, dvojpól B tvoří rezistor zapojený v sérii s diodou. Rezistor R má odpor 800 Ω, voltampérová charakteristika diody je dána. Dioda s rezistorem tvoří dělič napětí. Otázka zní: Jak velké je napětí u_D na diodě D?

Zde nemůžeme použít matematický postup, který jsme použili pro výpočet děliče napětí složeného z lineárních obvodových prvků. Dioda je nelineární součástka a její odpor je závislý na napětí u_D. Napětí u_D ale neznáme, naopak ho máme určit.

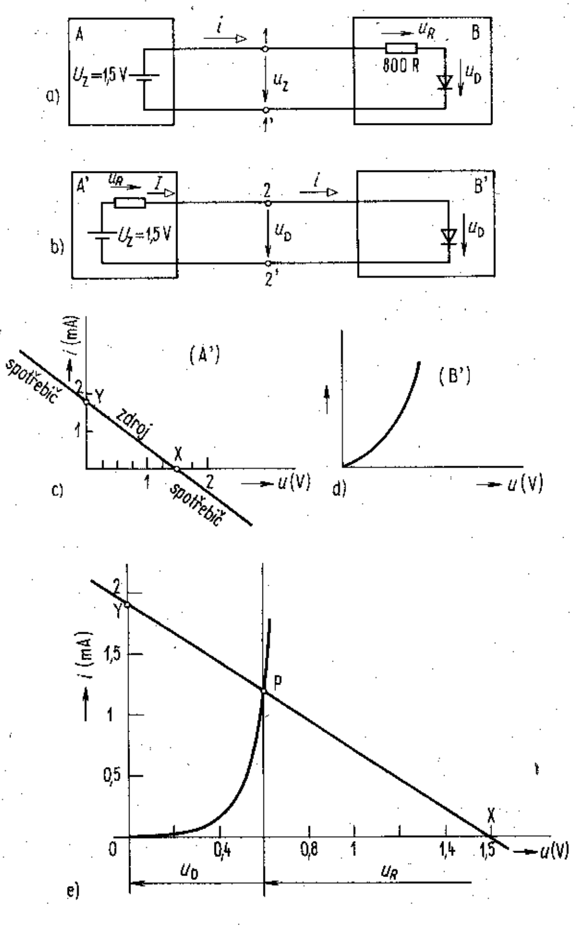
Poměry na obvodu lze snadno řešit graficky. Jde o zcela základní řešení, které je velmi důležité. Proto mu věnujeme větší pozornost.

Pro úplnou představu o principu řešení si obvod na obr. 16a překreslíme do tvaru na obr. 16b. Jde o tentýž obvod, pouze zdroj spojený s rezistorem považujeme za dvojpól A′ a samotnou diodu za dvojpól B′. Voltampérová charakteristika diody je v tomto případě přímo charakteristikou dvojpólu B′. Dvojpól A′ jako celek představuje zdroj elektrické energie, který napájí spotřebič – dvojpól B′.

Nakreslíme si nyní voltampérovou charakteristiku dvojpólu A′. Dvojpól je lineární, charakteristika tedy musí mít tvar přímky. Pro její nakreslení stačí znát dva body. Ty nám vyplynou z této jednoduché úvahy:

1. Je-li dvojpól A′ zapojen naprázdno, tj. bez připojené zátěže, je na svorkách 1 – 1′ napětí zdroje $U_Z = 1{,}5$ V. Do souřadnicové soustavy na obr. 16c vyneseme bod X.

2. Je-li dvojpól A ve zkratu, je na svorkách na 1 – 1′ napětí $U = 0$. Přitom bude procházet proud i, jehož hodnotu určíme z Ohmova zákona, $i = 1{,}5\ \text{V}/800\ \Omega \doteq 1{,}9$ mA. Tím jsme získali souřadnice druhého bodu ($u = 0$, $i = 1{,}9$ mA), který vyneseme do souřadnicové soustavy



Obr. 16. Graficko-početní řešení poměrů na dvojpólech A a B

(bod Y). Oběma body (X a Y) proložíme přímku a získáme voltampérovou charakteristiku dvojpólu A′, které říkáme *zatěžovací přímka.*

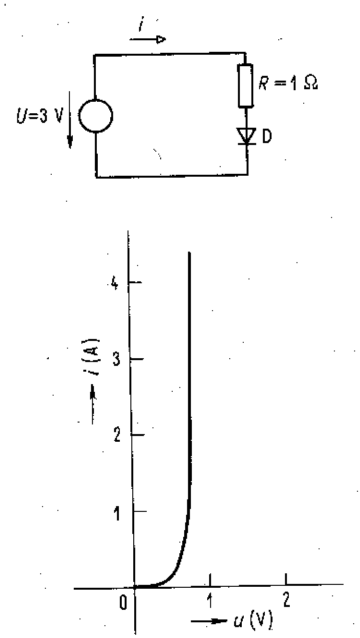
Na obr. 16d je voltampérová charakteristika druhého dvojpólu – diody.

Známe-li voltampérové charakteristiky obou spojených dvojpólů, A′ a B′, je určení hodnot u_D a i_D snadné. Voltampérovou charakteristiku jednoho dvojpólu překreslíme do souřadnicové soustavy voltampérové charakteristiky druhého dvojpólu. Zatěžovací přímku vyneseme do souřadnicové soustavy diody (obr. 16e). Tam, kde se obě voltampérové charakteristiky protínají, je *pracovní bod* P. Ten určuje napětí u_D na diodě, napětí u_R

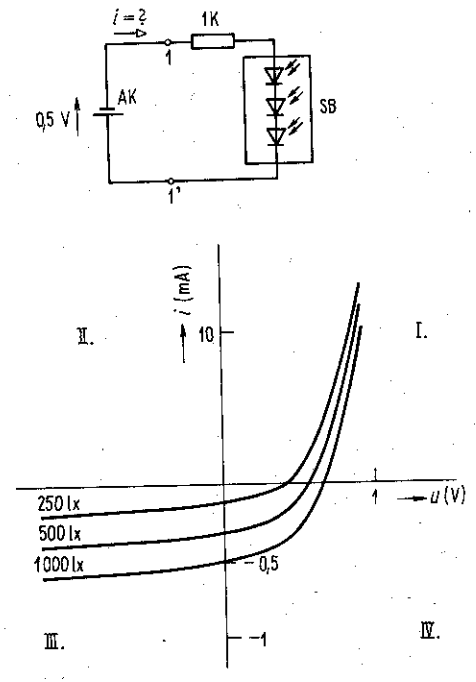
na rezistoru R a proud i. Umět nakreslit zatěžovací přímky a určit pracovní bod je pro řešení nelineárních obvodů nutné. Proto si konstrukci zatěžovací přímky a její význam procvičte na třech příkladech:

Příklad 1

Největší dovolený proud diody D, jejíž voltampérová charakteristika je na obr. 17, je 2,5 A. Není tato hodnota v obvodu, do kterého je dioda zapojena, překročena?



Obr. 17. K řešení příkladů 1 a 2



Obr. 18. K řešení příkladu 3

Postup při řešení: Zakreslete do souřadnicové soustavy dva body zatěžovací **přímky**, jeden při $u = 0$ a druhý při $i = 0$. Proložte body přímku. **Vyznačte** pracovní bod, který definuje skutečný proud procházející diodou, **a přečtěte** velikost proudu.

Příklad 2

Požadujeme, aby diodou na předcházejícím obrázku procházel maximální dovolený proud, tj. 2,5 A. Jaký odpor musí mít v tom případě zatěžovací rezistor R_Z, je-li stále $U = 3$ V?

Pomoc pro řešení: Jeden bod zatěžovací přímky znáte – je to napětí zdroje při proudu $i = 0$. Druhý bod je dán pracovním bodem – ten leží na voltampérové charakteristice diody při proudu 2,5 A. Oběma body proložíme zatěžovací přímku, která nám na ose proudu vytne hodnotu proudu zdroje při zkratované diodě.
Hodnotu hledaného odporu pak vypočítejte z Ohmova zákona.

Příklad 3

Sluneční baterie SB, na niž dopadá osvětlení 500 lx (luxů), je zapojena do obvodu s akumulátorem AK (obr. 18). Odebírá sluneční baterie z akumulátoru elektrickou energii nebo naopak akumulátor dobíjí? Jaký proud prochází obvodem?
Pomoc pro řešení: Vyneste zatěžovací přímku. Určete průsečík s charakteristikou platnou pro osvětlení 500 lx. Leží-li pracovní bod v kvadrantu II nebo IV, tj. je-li součin u a i záporný, chová se dvojpól se spotřebičovou vzájemnou orientací u a i jako zdroj a naopak dvojpól se zdrojovou orientací u a i se chová jako spotřebič. Z polohy pracovního bodu určíte hodnotu proudu. Pozor na znaménko!

2.3. Kmitočtově závislé děliče

Za kmitočtově závislé (impedanční) děliče budeme považovat obvody, které vedle reálné (činné) složky R celkové impedance Z mají také imaginární (jalovou) složku X impedance Z. U dvojpólu na obr. 19a je rezistor spojen v sérii s cívkou o indukčnosti L, na obr. 19b je rezistor v sérii s kondenzátorem C.

Z fyziky víme, že imaginární (jalovou) složku impedance Z tvoří indukční reaktance X_L nebo kapacitní reaktance X_C, pro něž platí vztahy

$$X_L = \omega L \quad \text{a} \quad X_C = -\frac{1}{\omega C}\,,$$

Pro řešení střídavých obvodů se používá symbolicko-komplexní metoda, v níž pro indukční reaktanci platí vztah

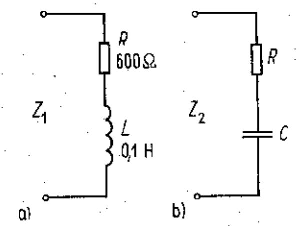
$$jX_L = j\omega L \qquad (1a)$$

a pro kapacitní reaktanci

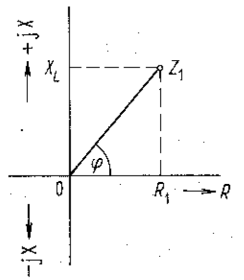
$$jX_C = -j\frac{1}{\omega C} \qquad (1b)$$

kde L je indukčnost (H),
C kapacita (F),
$j = \sqrt{-1}$ vyjadřuje imaginárnost hodnoty součinu.

Z uvedených vzorců plyne, že kapacitní a indukční reaktance je závislá na kmitočtu. Proto poměry v každém obvodu, který obsahuje kmitočtově závislé členy (kapacitu, indukčnost), musí být závislé na kmitočtu.



Obr. 19. Sériový obvod
a) RL, b) RC



Obr. 20. Součet reálné a imaginární složky impedance v komplexní rovině

Vztah mezi hodnotami součástek obvodu na obr. 19 lze nejlépe vyjádřit graficky v tzv. komplexní rovině (obr. 20). Na vodorovné ose je vynesena skutečná, reálná hodnota odporu R, na svislé ose jsou vyneseny imaginární hodnoty reaktancí jX_L a jX_C.

U dvojpólu na obr. 19 nás zajímá celková impedance obou obvodů, $\mathbf{Z}_1$ a Z_2, jejich kmitočtová závislost a hodnoty obvodových veličin.

Poznámka. Napětí i proud označujeme velkými písmeny, jde-li o efektivní **hodnotu** střídavého napětí (se sinusovým průběhem).

Celkovou komplexní impedanci $\mathbf{Z}_1$ nebo $\mathbf{Z}_2$ dvojpólu proto vypočítáme sečtením reálné a imaginární složky.

Impedanci $\mathbf{Z}_1$ obvodu RL vypočítáme ze vztahu

$$\mathbf{Z}_1 = R + jX_L = R + j\omega L \qquad (2)$$

Impedanci $\mathbf{Z}_2$ obvodu RC vypočítáme ze vztahu

$$\mathbf{Z}_2 = R + jX_C = R - j\frac{1}{\omega C} \qquad (3)$$

Praktický příklad

Na obr. 19a je hodnota $R = 600\,\Omega$ a $L = 0{,}1$ H. Indukční reaktanci jX_L můžeme vypočítat např. pro kmitočet 1 000 Hz

$$jX_L = j2\pi fL = j \,.\, 2 \,.\, 3{,}14 \,.\, 1000 \,.\, 0{,}1 = 628\,j$$

Celková impedance $\mathbf{Z}$ je tedy

$$\mathbf{Z} = (600 + j\,628)\,\Omega$$

Tato hodnota platí pouze pro kmitočet 1000 Hz. S kmitočtem se mění imaginární složka komplexní impedance.

Hodnoty reálné a imaginární složky komplexní impedance vyneseme do komplexní roviny. Tím získáme koncový bod vektoru, jehož velikost udává absolutní hodnotu impedance Z_1 nebo Z_2. To je znázorněno na obr. 20.

Absolutní hodnotu impedance Z_1 můžeme také vypočítat podle Pythagorovy věty

$$|\mathbf{Z}_1| = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \qquad (4)$$

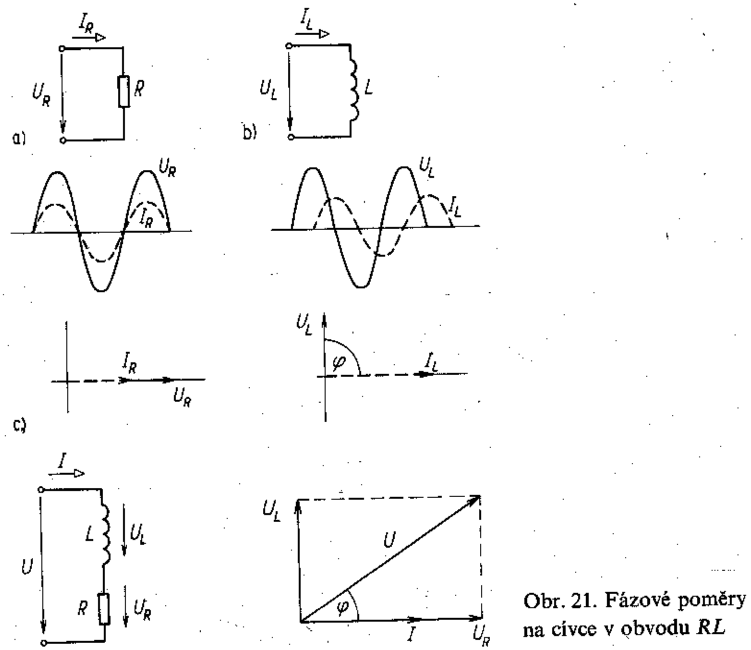
Dosadíme-li hodnoty z předcházejícího praktického příkladu, dostaneme

$$|\mathbf{Z}_1| = \sqrt{600^2 + 628^2}\,\Omega \doteq 869\,\Omega$$

Podobně jako pro obvod RL určíme absolutní hodnotu impedance Z_2 pro obvod RC ze vztahu

$$|\mathbf{Z}_2| = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \qquad (5)$$

Všimněte si ještě jednou uspořádání na obr. 19a. Přiložíme-li elektrické napětí na samotný rezistor R, bude jím procházet proud I_R, který je ve fázi s průběhem napětí U_R. Na obr. 21a je U_R střídavé napětí na rezistoru R, kterým prochází proud I_R. Přiložíme-li napětí U_L na samotnou cívku s indukčností L, bude jí procházet proud, který je oproti napětí fázově zpožděn. To vidíme na posunutí sinusového průběhu proudu na obr. 21b. Úhel, o který se proud za napětím zpožďuje, je *fázový posun;* označuje se φ.



Obr. 21. Fázové poměry na cívce v obvodu RL

Jestliže přiložíme napětí U na dvojpól složený ze členů RL (obr. 19a), bude oběma součástkami procházet společný proud a fázový posun bude ležet mezi hodnotami 0° a 90°. Grafické řešení je na obr. 21c. Napětí U_R na rezistoru R se rovná součinu $R \cdot I$ a je s proudem I ve fázi. Napětí U_L na cívce předbíhá proud o 90°. Jeho velikost je nutné vypočítat ze vztahu

$$\boldsymbol{U}_L = \mathrm{j}X_L\boldsymbol{I} = \mathrm{j}\omega L\boldsymbol{I} \tag{6}$$

Velikost výsledného fázoru udává celkové napětí na dvojpólu.

Z Pythagorovy věty plyne

$$|\boldsymbol{U}| = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = I\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \tag{7}$$

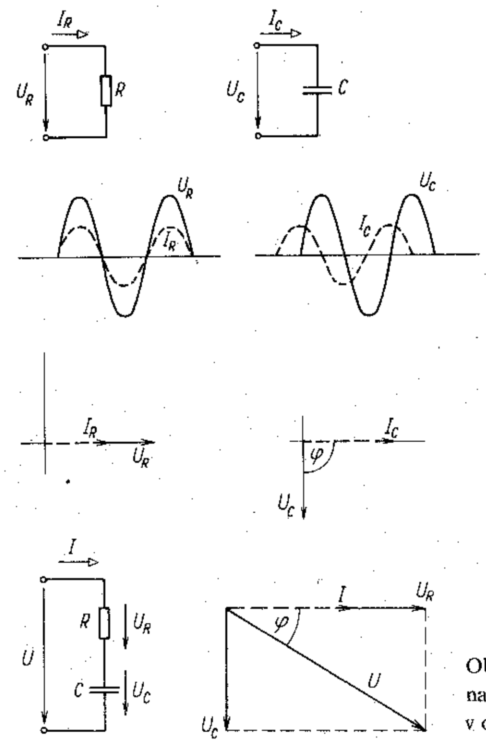
Fázový posun určíme ze vztahu

$$\operatorname{tg}\varphi = U_L/U_R = \frac{\omega L}{R} \tag{8}$$

Časová konstanta τ je podíl indukčnosti a odporu

$$\tau = \frac{L}{R} \tag{9}$$

Všechny vztahy, které jsme popsali pro sériový obvod RL, platí zcela obdobně pro sériový obvod RC (obr. 19b), s tím rozdílem, že fázor napětí na kondenzátoru se zpozdí za proudem o 90° (obr. 22).



Obr. 22. Fázové poměry na kondenzátoru v obvodu RC

Napětí $\mathbf{U}_C$ je dáno vztahem

$$\mathbf{U}_C = \mathrm{j}X_C\mathbf{I} \tag{10}$$

Velikost výsledného fázoru udává hodnotu celkového napětí na dvojpólu. Z Pythagorovy věty plyne vzorec pro výpočet absolutní hodnoty napětí

$$|\mathbf{U}_2| = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = I\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \tag{11}$$

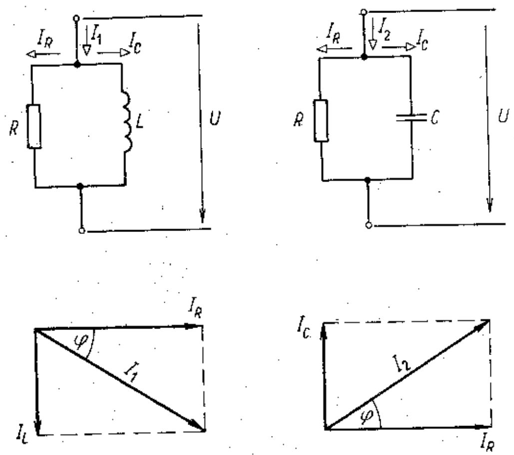
Fázový posun φ je dán vztahem

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_C}{U_R} = \frac{-1}{\omega CR} \tag{12}$$

a časová konstanta τ obvodu s členy RC je dána součinem

$$\tau = CR \tag{13}$$

Po podrobném seznámení se sériovým obvodem RL a RC nyní objasníme vlastnosti paralelních obvodů RL a RC (obr. 23).



Obr. 23. Paralelní obvody RL a RC

Při řešení vyjdeme ze společného napětí U. Proud I se v obvodu větví na dva proudy: u dvojpólu s indukčností na proudy I_R a I_L a u obvodu s kapacitou na proudy I_R a I_C. Dvojice složek původního proudu však nejsou vzájemně ve fázi, a proto je nutné je sečíst vektorově.

Na obr. 23 je řešení pro oba uvedené dvojpóly v komplexní rovině. Z Pythagorovy věty můžeme odvodit tyto vztahy:
– pro obvod s indukčností

$$|\mathbf{I}_1| = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = U\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{\omega^2 L^2}} = \frac{U}{Z_1} \tag{14}$$

– a pro obvod s kapacitou

$$|\mathbf{I}_2| = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = U\sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2} = \frac{U}{Z_2} \tag{15}$$

Fázový posun φ je pro obvod s indukčností dán vztahem

$$\operatorname{tg}\varphi = I_L/I_R = \frac{R}{\omega L} \tag{16}$$

a pro obvod s kapacitou vztahem

$$\operatorname{tg}\varphi = I_C/I_R = -\omega CR \tag{17}$$

Celková komplexní impedance $\mathbf{Z}$ je pro obvod RL dána vztahem

$$Z_1 = \frac{R\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \tag{18}$$

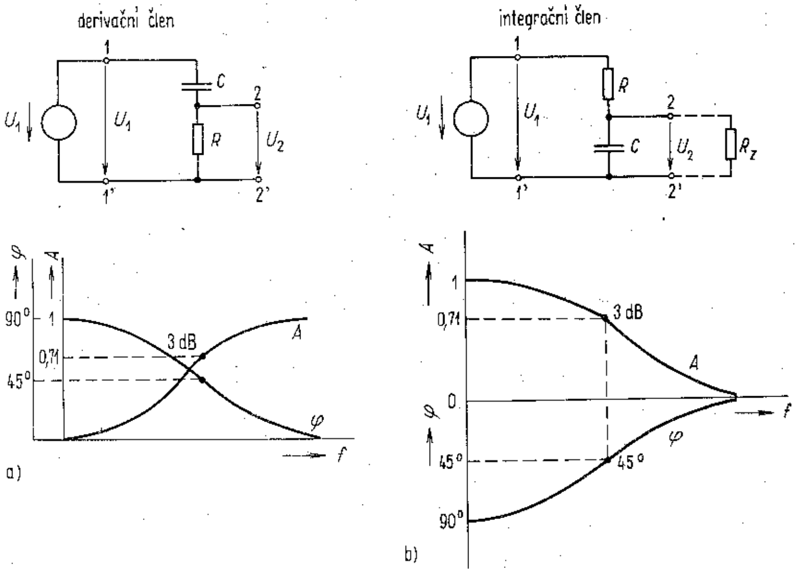
pro obvod RC vztahem

$$Z_2 = \frac{R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \tag{19}$$

2.4. Kmitočtová závislost členu RC; derivační a integrační článek

Na obr. 24a je obvod složený z kondenzátoru C a rezistoru R v sérii, tvořící čtyřpól. V předcházejícím odstavci jsme zdůraznili, že reaktance X_C, a tedy i celková impedance Z je závislá na kmitočtu.

Na vstupní svorky připojíme zdroj napětí U_1, jehož kmitočet budeme měnit. Bude-li U_1 konstantní, bude se výstupní napětí U_2 měnit v závislosti na kmitočtu. Z průběhu uvedené závislosti plyne, že obvod má funkci frekvenčního filtru; ze vstupu přenáší na výstup vysoké kmitočty, nízké kmitočty nepřenáší. Kapacita C představuje při nízkých kmitočtech velkou reaktanci, pro stejnosměrné napětí nekonečně velký odpor.



Obr. 24. Zapojení a útlumová a fázová charakteristika
a) derivačního členu, b) integračního členu

Podíl $\boldsymbol{U}_2/\boldsymbol{U}_1 = \boldsymbol{A}_U$, tj. přenos napětí čtyřpólu, je komplexní číslo, má svou reálnou složku $\mathrm{Re}\,\boldsymbol{A}_U$ a imaginární složku $\mathrm{Im}\,\boldsymbol{A}_U$. Přenos $\boldsymbol{A}_U$ je tedy také kmitočtově závislý a ve vztahu k napětí $\boldsymbol{U}_1$ má fázový posun (fázor) φ_A. Modul přenosu je dán vztahem

$$|\boldsymbol{A}_U| = \sqrt{\mathrm{Re}\,A_U^2 + \mathrm{Im}\,A_U^2} \tag{20}$$

Pro praxi je důležitý tzv. *mezní kmitočet*. Při něm je modul přenosu $|\boldsymbol{A}|$ proti největšímu přenosu $|\boldsymbol{A}_{\max}|$ nižší o 3 dB, tj. klesne na hodnotu $|\boldsymbol{A}_{\max}|/\sqrt{2}$, což je přibližně 71 %. Budeme si pamatovat, že mezní kmitočet f_m nastává při

$$R = |X_C| = \frac{1}{\omega C} \tag{21}$$

S kmitočtem se mění nejen přenos napětí, ale i fáze výstupního signálu oproti signálu na vstupu. Tuto závislost vyjadřujeme fázovou charakteristikou; ta je na obr. 24a zakreslena u příslušné kmitočtové charakteristiky.

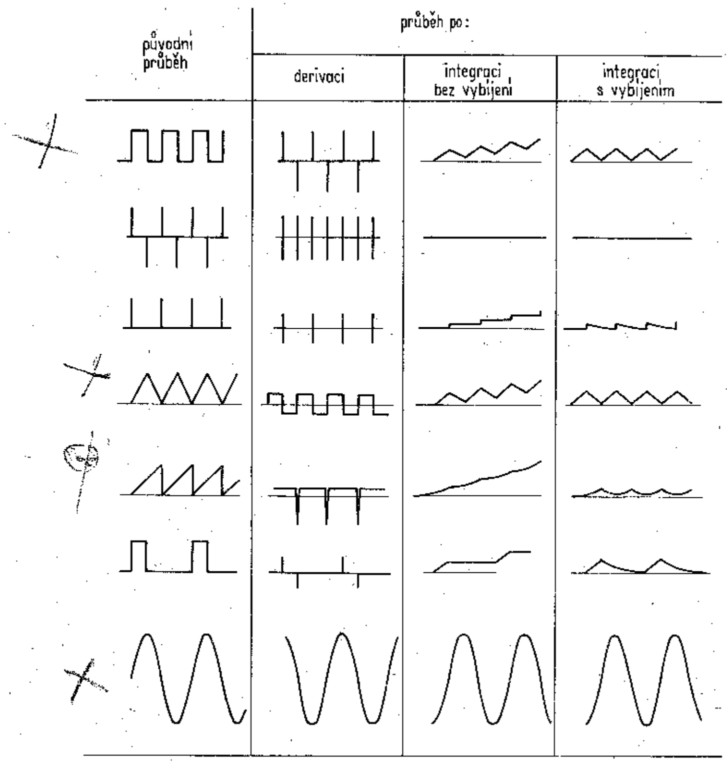
Fázový posun φ u členu RC nabývá s kmitočtem hodnot od 0 do 90°.

Při mezním kmitočtu, při kterém je $R = \frac{1}{\omega C}$, je tangens fázového úhlu φ dán poměrem

$$\mathrm{tg}\,\varphi = \frac{R}{\omega C} = 1 \Rightarrow \varphi = 45° \tag{22}$$

Čtyřpól na obr. 24b je proti předcházejícímu uspořádán odlišně: kondenzátor a rezistor si vyměnily místo. Kmitočtové vlastnosti tohoto čtyřpólu jsou proti předcházejícímu zapojení odlišné – vysoké kmitočty potlačuje, nízké přenáší. Přenáší stejnosměrné napětí.

Přenos napětí A_U se potlačuje o 3 dB při mezním kmitočtu. Pro mezní kmitočet platí tytéž vztahy jako u čtyřpólu z obr. 24a.



Obr. 25. Průběhy napětí po derivaci a po integraci

Dosud jsme vždy sledovali vlastnosti čtyřpólů při sinusovém průběhu vstupního napětí U_1 i výstupního napětí U_2 a napěťový přenos A_U. Velmi důležité je však chování čtyřpólů při nesinusovém průběhu U_1 a U_2. Jsou-li u obvodu v obr. 24a kapacita kondenzátoru C a odpor rezistoru R dost malé, chová se obvod jako derivační článek; na výstupu se objevuje napětí u_2 pouze tehdy, mění-li se napětí u_1. Říkáme, že výstupní průběh napětí je derivací průběhu vstupního signálu. Na obr. 25 je průběh vstupního signálu a průběh derivovaného signálu.

Derivační článek nepřenáší stejnosměrný signál.

Opačně než derivační článek podle obr. 24a se chová obvod zapojený podle obr. 24b. Jsou-li odpor rezistoru R a kapacita kondenzátoru C dostatečně velké, čtyřpól se chová jako integrační článek. Má tu vlastnost, že na kondenzátoru C vzrůstá napětí u_2 exponenciálně, je-li $u_1 > u_2$. Je-li $u_1 < u_2$, napětí u_2 klesá. Kondenzátor C se totiž napětím u_1 nabíjí nebo vybíjí.

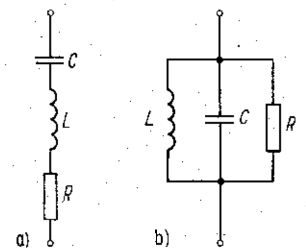
Na obr. 25 jsou také různé tvary vstupního signálu a jejich odpovídající průběh po průchodu integračním článkem (tj. po integraci). Záleží na zatěžovacím odporu R_Z, kterým se kondenzátor, na kterém se signál „integruje", vybíjí. Na obrázku jsou proto znázorněny poměry bez zatěžovacího odporu R_Z a se zatěžovacím odporem R_Z.

Integrací sinusového průběhu se opět získá sinusový průběh; jeho napětí je však zpožděno za proudem o 90°.

Další poznatky o integračních a derivačních článcích jsou uvedeny v čl. 22.1 a 22.2.

2.5. Rezonanční obvod

Dvojpól vytvořený spojením kondenzátoru, cívky a popř. rezistoru se nazývá kmitavý neboli *rezonanční obvod.* Může být sériový (obr. 26a) nebo paralelní (obr. 26b).



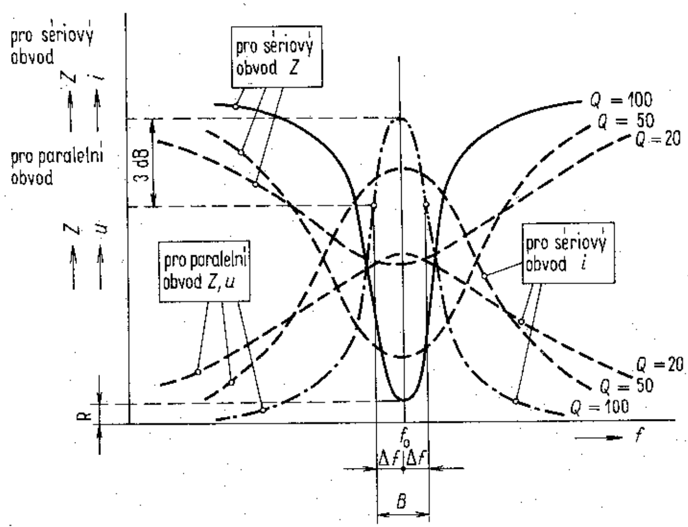
Obr. 26. Rezonanční obvod se ztrátovým odporem R
a) sériový, b) paralelní

Pro další úvahy si musíme uvědomit, že v praxi nepracujeme s ideálním kondenzátorem, ale s technickým kondenzátorem, který má kapacitu a parazitní odpor. Rovněž pracujeme s cívkami, které mají indukčnost, ale i parazitní odpor. I když nežádoucí odpor kondenzátoru je zanedbatelný, ztrátový odpor cívky vždy pomíjet nemůžeme. U rezonančních obvodů se uplatňuje natolik, že je nutné s ním počítat.

Sériový rezonanční obvod má celkovou komplexní impedanci **Z**, která je součtem impedancí jednotlivých součástek obvodu.

$$\mathbf{Z} = R - jX_C + jX_L = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \tag{23}$$

Z výrazu plyne důležitý závěr: Platí-li $\omega L = \dfrac{1}{\omega C}$, rovná se imaginární složka impedance nule a celková impedance obvodu je $Z = R$, tedy rovná se reálnému stejnosměrnému odporu. Obvodem prochází největší možný proud. Říkáme, že obvod je v rezonanci. Na obr. 27 je plnou čarou znázorněn průběh celkové impedance sériového rezonančního obvodu a čárkovaně je znázorněn proud, který obvodem prochází v závislosti na kmitočtu signálu.



Obr. 27. Průběh impedance a proudu sériového rezonančního obvodu a paralelního rezonančního obvodu s různou hodnotou činitele jakosti Q

Rezonanční kmitočet f_0 snadno odvodíme z podmínky pro nulovou imaginární složku impedance obvodu

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

Po úpravě dostaneme pro rezonanční kmitočet tzv. Thomsonův vzorec

$$\boxed{f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (\mathrm{Hz; H, F})} \tag{24}$$

Důležitým činitelem rezonančních obvodů je *činitel jakosti Q*. Na obr. 27 je znázorněn průběh impedance a proudu procházejícího obvodem (samozřejmě za předpokladu konstantního napětí U) při různých hodnotách Q pro sériový rezonanční obvod. Čím je Q menší, tím je rezonanční křivka plošší a rezonance je méně výrazná.

Činitel jakosti Q klesá se vzrůstajícím odporem R podle vztahu

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} \tag{25}$$

kde ω_0 je úhlový rezonanční kmitočet ($\omega_0 = 2\pi f_0$).

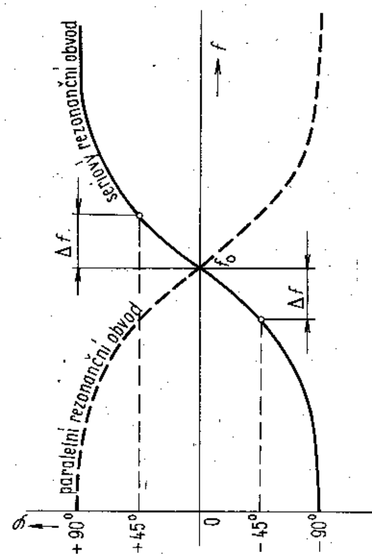
Na obr. 27 jsou vyznačeny také body, při kterých se proud v obvodu zmenšuje o 3 dB, tj. na hodnotu 71 %. Kmitočtům odpovídajícím těmto bodům říkáme mezní kmitočty a kmitočtový rozsah mezi nimi se nazývá *šířka pásma*, $B = 2\Delta f$. Se zhoršující se jakostí obvodu se zvětšuje šířka pásma. Velikost Q vyjádříme pomocí šířky pásma vztahem

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f} = \frac{f_0}{B} \tag{26}$$

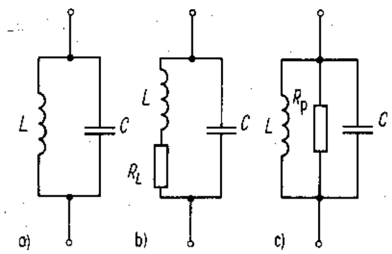
kde f_0 je rezonanční kmitočet.

Při kmitočtech ležících pod rezonančním kmitočtem se v sériovém obvodu převážně uplatňuje kapacita. Nastává fázový posun a napětí je proti proudu fázově zpožděno; říkáme, že obvod má kapacitní charakter. Při velice nízkých kmitočtech se fázový posun blíží 90°. To je na obr. 28 znázorněno plnou čarou.

Při kmitočtech vyšších, než je kmitočet rezonanční, má obvod indukční **charakter**, neboť se uplatňuje především indukční reaktance. Fázový posun



Obr. 28. Fázová charakteristika sériového rezonančního obvodu a paralelního rezonančního obvodu



Obr. 29. Paralelní rezonanční obvod

se s vyšším kmitočtem zvětšuje až k hodnotě 90° při extrémně vysokých kmitočtech.

Paralelní rezonanční obvod je zapojen podle obr. 29a. Převrácenou hodnotu komplexní impedance vypočítáme takto

$$\frac{1}{\mathbf{Z}} = \frac{1}{\mathrm{j}\omega L} + \mathrm{j}\omega C \tag{27}$$

a pro impedanci $\mathbf{Z}$ platí

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathrm{j}\omega L}{1 - \omega^2 LC} \tag{28}$$

Podmínka rezonance je splněna při

$$\frac{1}{\mathrm{j}\omega L} + \mathrm{j}\omega C = 0$$

a tedy

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

Z výpočtu plyne velmi zajímavý závěr: Při rezonanci paralelního kmitavého obvodu roste impedance nade všechny meze, tj. její hodnota vzrůstá do nekonečna. Přitom rezonanční napětí vzrůstá rovněž na nekonečnou hodnotu. Kmitavý obvod kmitá rezonančním kmitočtem, i když do něj přestaneme přivádět vnější energii.

Lze to vysvětlit takto: Kondenzátor se v rytmu rezonančního kmitočtu nabíjí a vybíjí. Rovněž v cívce se střídavě shromažďuje elektrická energie a opět z ní odchází. Přechází v rytmu rezonančního kmitočtu z kondenzátoru do cívky a zpět z cívky do kondenzátoru, znovu do cívky atd.

Můžeme to znázornit kyvadlem – to rovněž stále kýve z jedné krajní polohy do druhé, i když ustanou vnější podněty, které kývání způsobily. Můžeme namítat, že kyvadlo se za určitou dobu zastaví, neboť se uplatňuje tření.

S rezonančním obvodem je to obdobné. Naše úvahy o nekonečné impedanci a růstu rezonančního napětí na nekonečnou hodnotu byly totiž teoretické. Tak jako kyvadlu brání v pohybu tření, rezonančnímu obvodu brání ve stálém netlumeném kmitání ztrátový odpor. Protože se u rezonančního obvodu uplatňuje především odpor cívky (odpor kondenzátoru můžeme zanedbat), musíme počítat se ztrátovým odporem ve spojení s indukčností (obr. 29b). Odpor cívky je na obrázku vyjádřen ztrátovým rezistorem R_L, zařazeným v sérii s cívkou. Tak jsou nejlépe vyjádřeny skutečné poměry v obvodu. Pro další praktické využití, se kterým se setkáme při řešení vysokofrekvenčních laděných zesilovačů, je však výhodnější představit si ztrátový odpor cívky tak, jako by byl připojen k rezonančnímu obvodu paralelně (rezistor R_p na obr. 29c). Jestliže odpor cívky není příliš velký, nedopouštíme se tím žádné podstatné chyby. Paralelní rezistor R_p má ovšem jiný odpor než sériový rezistor R_L. Existuje však vzájemný matematický vztah, takže lze odpor R_L přepočítat na odpor R_p.

Odpor rezistoru R_p názorně udává, jak je rezonanční obvod tlumen. Je-li odpor R_p velký, je rezonanční obvod tlumen málo. Naopak při malém odporu R_p je rezonanční obvod tlumen hodně. Čím je tedy paralelní ztrátový odpor R_p menší, tím menší je i činitel jakosti Q rezonančního obvodu, tím více klesá napětí rezonančního obvodu a tím rezonanční obvod rychleji dokmitá. Závislost impedance na kmitočtu pro paralelní rezonanční obvod a pro různé hodnoty Q je na obr. 27. Průběh napětí v závislosti na kmitočtu má tvar shodný s průběhem impedance.

Tam, kde hodnota impedance a napětí klesla z maximální hodnoty o 3 dB, tj. přibližně na hodnotu 71 %, je mezní kmitočet. Při něm je fázový posun 45°.

Činitel jakosti Q paralelního rezonančního obvodu je dán vztahem

$$Q = \frac{R_p}{\omega_0 L} = \frac{f_0}{B} = \frac{f_0}{2\Delta f} \qquad (29)$$

kde $B = 2\Delta f$ je šířka pásma.

Na obr. 28 je čárkovaně znázorněna závislost fázového posunu φ na kmitočtu (fázová charakteristika). Při kmitočtech ležících pod rezonančním kmitočtem má obvod indukční charakter – převažuje uplatnění indukčnosti, napětí předbíhá před proudem. Při kmitočtech nad rezonančním kmitočtem má obvod kapacitní charakter, napětí se zpožďuje za proudem.

Rezonanční kmitočet f_0 vypočítáme s dostatečnou přesností podle již uvedeného Thomsonova vztahu (24).

Otázky ke kapitole I.

1. Vysvětlete význam pojmu pasívní a aktivní elektronická součástka.
2. Nakreslete schematicky elektrický dvojpól s dvojicí svorek; vyznačte šipkami orientaci proudu a napětí tak, aby vzájemná orientace byla spotřebičová.
3. Definujte význam těchto parametrů čtyřpólů y_{21}, h_{11}, h_{21} a h_{22}.
4. Odvoďte vztah pro impedanci dvojpólu složeného z rezistoru R a cívky L v sérii. Jaká je absolutní hodnota impedance tohoto obvodu?
5. Nakreslete průběh obdélníkového napětí. Jaký je jeho průběh po derivaci derivačním článkem?
6. Jakou hodnotu má kondenzátor v sérii s cívkou s indukčností 1 mH, je-li rezonanční kmitočet 1,2 MHz?
7. Čím je definován činitel jakosti Q paralelního rezonančního obvodu?
8. Čím je definována šířka pásma paralelního rezonančního obvodu?
9. Nakreslete tvar průběhu napětí paralelního rezonančního obvodu v oblasti rezonance při třech různých hodnotách Q.
10. Jaká je hodnota fázového posunu při rezonanci a při dolním a horním mezním kmitočtu paralelního rezonančního obvodu?
11. Čemu se rovná hodnota impedance sériového rezonančního obvodu, je-li $L = 2$ mH, $C = 500$ pF a celkový ztrátový odpor 1,2 Ω?