

Elektronika

Ing. Jaroslav Bernkopf

Obsah

1.	Zákony.....	7
1.1	Ohmův zákon	7
1.2	Kirchhoffův zákon I – o proudech	7
1.3	Kirchhoffův zákon II – o napětích.....	7
2.	Pasivní součástky lineární	8
2.1	Rezistory.....	8
2.1.1	Základní vlastnosti rezistorů	8
a)	Ohmická hodnota.....	8
b)	Zatížení.....	9
c)	Přípustné napětí	9
d)	Šum	9
2.1.2	Rozdělení rezistorů.....	10
a)	Pevné vrstevové rezistory.....	10
b)	Pevné drátové rezistory	11
c)	Proměnné rezistory.....	11
2.2	Kondenzátory	12
2.2.1	Základní vlastnosti kondenzátorů	12
a)	Kapacita.....	12
b)	Jmenovité napětí	12
c)	Izolační odpor	13
d)	Ztrátový činitel, činitel jakosti	13
e)	Závislost kapacity na teplotě.....	14
f)	Indukčnost	14
2.3	Cívky.....	14
2.3.1	Základní vlastnosti cívek.....	14
a)	Náhradní schéma cívky	14
b)	Ztrátový činitel, činitel jakosti	15
3.	Pasivní součástky nelineární	17
3.1	Diody	17
4.	Aktivní součástky.....	18
4.1	Tranzistory.....	18
4.1.1	Bipolární tranzistory	18
4.1.2	Unipolární tranzistory.....	18
4.2	Vícevrstvé spínací součástky	19
4.2.1	Tyristory	19
4.2.2	Triaky.....	20
4.2.3	Diaky.....	21
4.3	Optočleny	22
4.3.1	Použití.....	23
4.3.2	Parametry optočlenů.....	23
a)	Přenosový poměr.....	23
b)	Izolační napětí	23
4.4	Lasery.....	24

4.4.1	Definice.....	24
4.4.2	Vlastnosti	24
4.4.3	Použití.....	24
4.5	Operační zesilovače	25
4.5.1	Definice, vlastnosti.....	25
a)	Vstupy.....	25
b)	Zesílení.....	26
c)	Vstupní odpor	26
d)	Vstupní proud	26
e)	Výstupní odpor.....	27
f)	Napájení a výstupní napětí	27
g)	Mezní kmitočet.....	27
4.5.2	Ideální OZ.....	28
5.	Zesilovače	29
5.1	Zesilovače s jedním tranzistorem	29
5.1.1	Náhradní parametry tranzistoru	29
5.1.2	Zapojení se společným emitorem (SE).....	30
a)	Zesílení.....	30
b)	Vstupní odpor	31
c)	Výstupní odpor.....	32
5.1.3	Zapojení se společnou bází	32
a)	Zesílení.....	33
b)	Vstupní odpor	33
c)	Výstupní odpor.....	33
5.1.4	Zapojení se společným kolektorem	33
a)	Zesílení.....	33
b)	Vstupní odpor	33
c)	Výstupní odpor.....	34
5.1.5	Shrnutí	34
a)	Přehled vlastností	34
b)	Použití.....	34
5.2	Vícestupňové zesilovače	35
5.3	Zesilovače s operačním zesilovačem	35
5.3.1	OZ jako lineární zesilovač.....	35
5.3.2	Invertující zesilovač	35
a)	Odvození zesílení	36
b)	Vstupní odpor	37
5.3.3	Sumační zesilovač.....	37
5.3.4	Neinvertující zesilovač	37
a)	Zesílení.....	38
b)	Vstupní odpor	38
5.3.5	Rozdílový (diferenciální) zesilovač.....	38
a)	Zesílení.....	39
b)	Vstupní odpor	39
5.3.6	Integrátor	39
5.3.7	Komparátor.....	41
5.4	Zpětná vazba	44
5.4.1	Druhy zpětné vazby	44
5.4.2	Účinky záporné ZV	44

a)	Výstupní odpor.....	44
b)	Vstupní odpor	44
c)	Šum	45
d)	Zkreslení	45
5.5	Stabilita (operačních) zesilovačů	46
5.6	Výkonové zesilovače	51
5.6.1	Parametry	51
5.6.2	Třídy výkonových zesilovačů	52
a)	Třída A.....	52
b)	Třída B.....	52
c)	Třída C.....	54
d)	Třída D.....	55
5.6.3	Ochrana proti přetížení	56
5.6.4	Dosažitelný výkon.....	57
5.6.5	Příklad zapojení	58
5.7	Vysokofrekvenční zesilovače.....	58
5.7.1	Širokopásmové zesilovače	58
5.7.2	Úzkopásmové zesilovače	59
6.	Filtry.....	60
6.1	Pasivní filtry	60
6.1.1	Dolní propust	60
6.1.2	Horní propust.....	65
6.1.3	Wienův článek	66
a)	Zapojení.....	66
b)	Rezonanční kmitočet	68
c)	Přenos	69
6.2	Filtry s operačními zesilovači.....	69
6.2.1	Kaskádní řazení dolních a horních propustí	69
7.	Impulsové obvody.....	73
7.1	Impulsový signál ideální a skutečný.....	73
7.2	Odezva RC článků na obdélníkový signál	74
7.3	Tvarovací obvody	74
7.4	Časová konstanta	74
7.5	Nabíjení kondenzátoru ze zdroje napětí a zdroje proudu	74
8.	Oscilátory.....	75
8.1	Podmínky ne/stability	75
8.1.1	Podmínka amplitudová	76
8.1.2	Podmínka fázová	76
8.1.3	Realizace fázové podmínky	77
8.2	RC oscilátory	77
8.2.1	Sinusové RC oscilátory.....	78
a)	Oscilátory s posouváním fáze.....	78
b)	Oscilátory s Wienovým článkem	79

8.2.2	Nesinusové RC oscilátory.....	80
a)	Oscilátor s integrátorem.....	80
b)	Oscilátor se Schmittovým obvodem.....	81
c)	Multivibrátor	82
8.3	LC oscilátory.....	82
9.	Záznam zvuku	85
9.1	Mechanický záznam	85
9.2	Magnetický záznam	86
9.3	Optický záznam	87
9.4	Digitální záznam, CD	88
10.	Zařízení pro reprodukci zvuku	89
11.	Rádiový přenos.....	90
11.1	Definice.....	90
11.2	Princip.....	90
11.3	Modulace	90
11.3.1	Příklad amplitudového modulátoru	92
11.4	Demodulace	93
11.4.1	Demodulátor AM.....	93
11.4.2	Demodulátor FM	94
11.5	Přijímače.....	95
11.5.2	Druhy přijímačů.....	96
11.5.3	Detektorový přijímač bez zesílení – krystalka	96
11.5.4	Přijímač s přímým zesílením.....	97
11.5.5	Přijímač s nepřímým zesílením – superhet.....	98
a)	Princip.....	98
b)	Funkce.....	98
c)	Výhody.....	99
11.6	Digitální rádio.....	99
11.6.1	Rozdíly mezi internetovým rádiem a DAB	99
11.6.2	Internetové rádio	99
11.6.3	Rádio DAB.....	99
a)	Vysílač DAB.....	100
b)	Přijímač DAB	103
12.	Televizní přenos	105
12.1	Princip televizního přenosu.....	105
12.1.1	Potřebná šířka pásma.....	105
12.1.2	Prokládané řádkování.....	106
12.1.3	Využití pásma jednoho TV kanálu v analogovém systému.....	107
12.2	Kamera.....	107
12.3	Přijímač.....	108
12.4	Videosignál	109

12.5	Digitální televize.....	110
12.5.1	Princip digitální televize	110
a)	Vzorkování.....	110
b)	Komprese	110
c)	Digitální multiplex.....	110
12.5.2	Druhy digitálních TV systémů	110
a)	Standard DVB-S	111
b)	Standard DVB-C	111
c)	Standard DVB-T	111
d)	Modulace DVB-T	112
12.5.3	Přehled norem DVB.....	114
13.	Radar.....	115
13.1	Princip.....	115
13.2	Teorie	116
13.3	Rozdělení	116
13.4	Aplikace	116
13.5	Vzorce	116

1. Zákony

1.1 Ohmův zákon

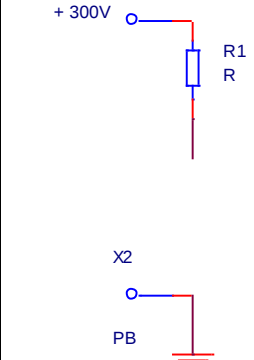
Proud tekoucí mezi dvěma body je přímo úměrný rozdílu napětí mezi těmito body a nepřímo úměrný odporu mezi těmito body.

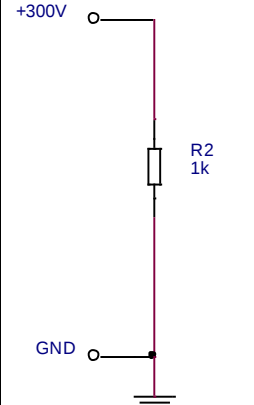
Proud je tím větší, čím větší napětí jej protlačuje, a tím menší, čím větší odpor je v cestě. Proto je ve vzorečku napětí nahoře (čím větší, tím větší) a odpor dole (čím větší, tím menší).

Vodní analogie: Proud hadicí je tím větší, čím větší je rozdíl tlaků mezi konci hadice, a tím menší, čím tenčí a delší je hadice.

Proč rozdíl napětí, rozdíl tlaků? Nestačí jen mluvit o napětí nebo tlaku a dost?

Hod'me hadici do moře. Klesne do hloubky několika kilometrů, kde je obrovský tlak. Způsobí tento tlak proudění vody hadicí? Vůbec ne, protože stejný tlak působí na jeden i na druhý konec hadice.

	Podobně v tomto obrázku velké napětí 300 V nezpůsobí proud rezistorem, protože stejné napětí je na jednom i na druhém konci rezistoru. Rezistorem na obrázku neteče žádný proud – nemá kam, protože dolní konec rezistoru nikam nevede, je „ve vzduchu“. Když rezistorem neteče proud, nevznikne na něm žádný úbytek napětí, neboli z napětí 300 V směrem k dolnímu konci rezistoru nic neubude, na dolním konci je tedy stejných 300 V jako na horním konci. Proud je tedy dán vzorcem $I = \frac{U}{R} = \frac{300-300}{1000} = \frac{0}{1000} = 0,0A$
Obrázek 1: Velké napětí na rezistoru nestačí k tomu, aby rezistorem tekla proud.	

	Když ale dolní konec rezistoru připojíme na jiné napětí (nulové), je rozdíl napětí mezi konci rezistoru 300 V a rezistorem teče proud $I = \frac{U}{R} = \frac{300-0}{1000} = \frac{300}{1000} = 0,3A$
Obrázek 2: Napětí na koncích rezistorů se liší o 300V, rezistorem teče proud.	

1.2 Kirchhoffův zákon I – o proudech

1.3 Kirchhoffův zákon II – o napětích

2. Pasivní součástky lineární

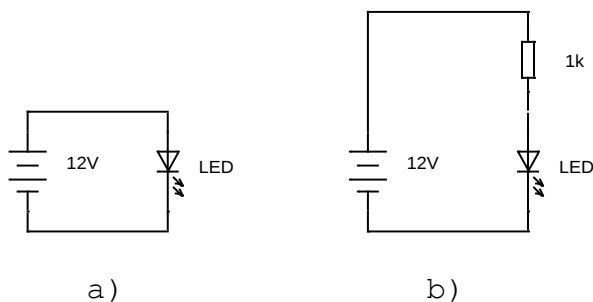
2.1 Rezistory

Rezistor je elektronická součástka, jejíž hlavní základní vlastností je elektrický odpor. Odpor se udává v ohmech [Ω].

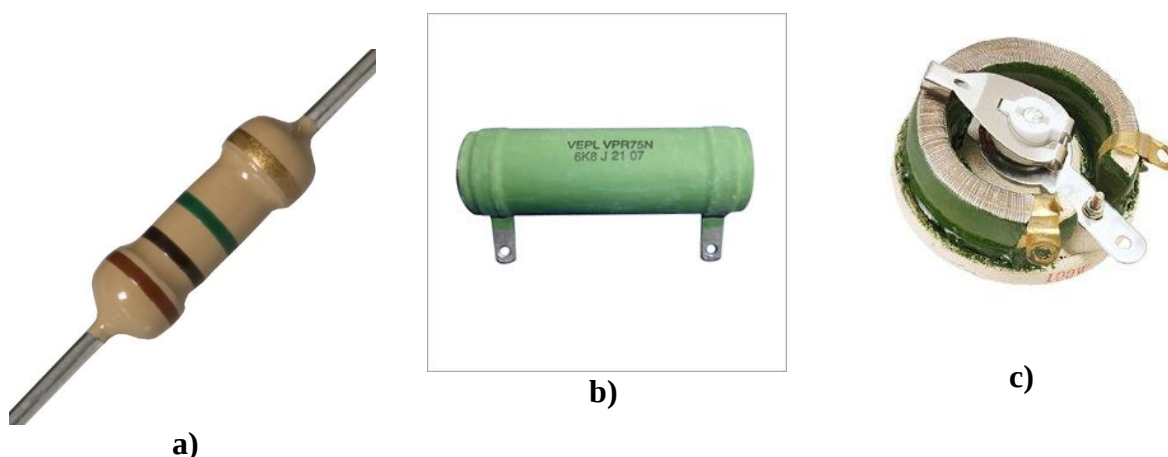
Hlavním úkolem rezistorů v obvodech je omezit proud.

Kdybychom připojili svítivou diodu (LED) na baterii přímo (Obrázek 3: Omezení proudu svítivé diody pomocí rezistoru), LED by zasvítila jen jednou a okamžitě by shořela, protože baterie by skrz ni prohnala mnohem větší proud, než LED vydrží.

Když ale do série s LED zapojíme rezistor 1k (Obrázek 3b), proud se omezí na 10 mA a LED bude svítit dlouho a spolehlivě.



Obrázek 3: Omezení proudu svítivé diody pomocí rezistoru



Obrázek 4: Rezistory – a) vrstvý uhlíkový, b) výkonový vinutý drátový, c) proměnný drátový

2.1.1 Základní vlastnosti rezistorů

- a) ohmická hodnota
- b) šum
- c) zatížení
- d) přípustné napětí

a) Ohmická hodnota

- jmenovitá
- skutečná

Jmenovitá hodnota ohmického odporu je hodnota vyznačená na rezistoru, např. 1k5 (= 1,5 k Ω). Skutečná hodnota se od jmenovité hodnoty může lišit v rámci dovolené tolerance. Např. skutečný odpor rezistoru 1k5 /J může být až o 5% vyšší nebo nižší než 1500 Ω .

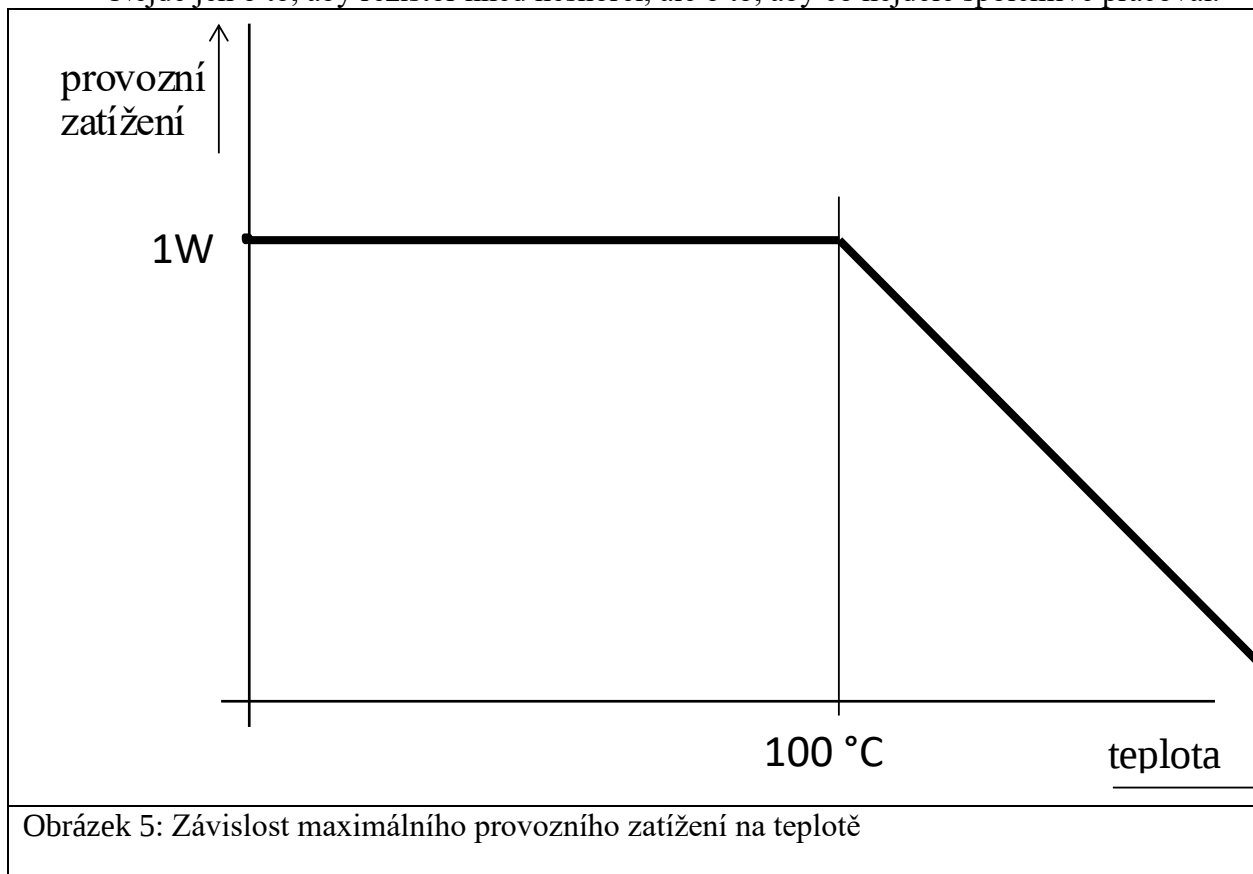
Skutečná hodnota dále závisí na teplotě a na přiloženém napětí. Teplotní závislost je třeba brát v úvahu v náročných aplikacích (měřicí přístroje), napěťovou závislost lze skoro vždy zanedbat.

b) Zatížení

Katalog uvádí jmenovité zatížení, např. 1 W. Provozní zatížení nesmí být větší než jmenovité, a navíc je třeba respektovat závislost provozního zatížení na okolní teplotě: Čím větší okolní teplota, tím menší provozní zatížení je nutno zvolit.

S oteplením podstatně klesá spolehlivost, proto nikdy nezatěžujeme součástky na maximum.

Nejde jen o to, aby rezistor hned neshořel, ale o to, aby co nejdéle spolehlivě pracoval.



Obrázek 5: Závislost maximálního provozního zatížení na teplotě

c) Přípustné napětí

Provozní napětí je omezeno nejen výkonovým zatížením rezistoru, ale i možností výboje po povrchu nebo uvnitř rezistoru. U rezistorů s velkými hodnotami odporu proto ani nelze dosáhnout jmenovitého zatížení. Při zvyšování napětí dojde k přeskoku dříve, než by se dosáhlo jmenovitého zatížení.

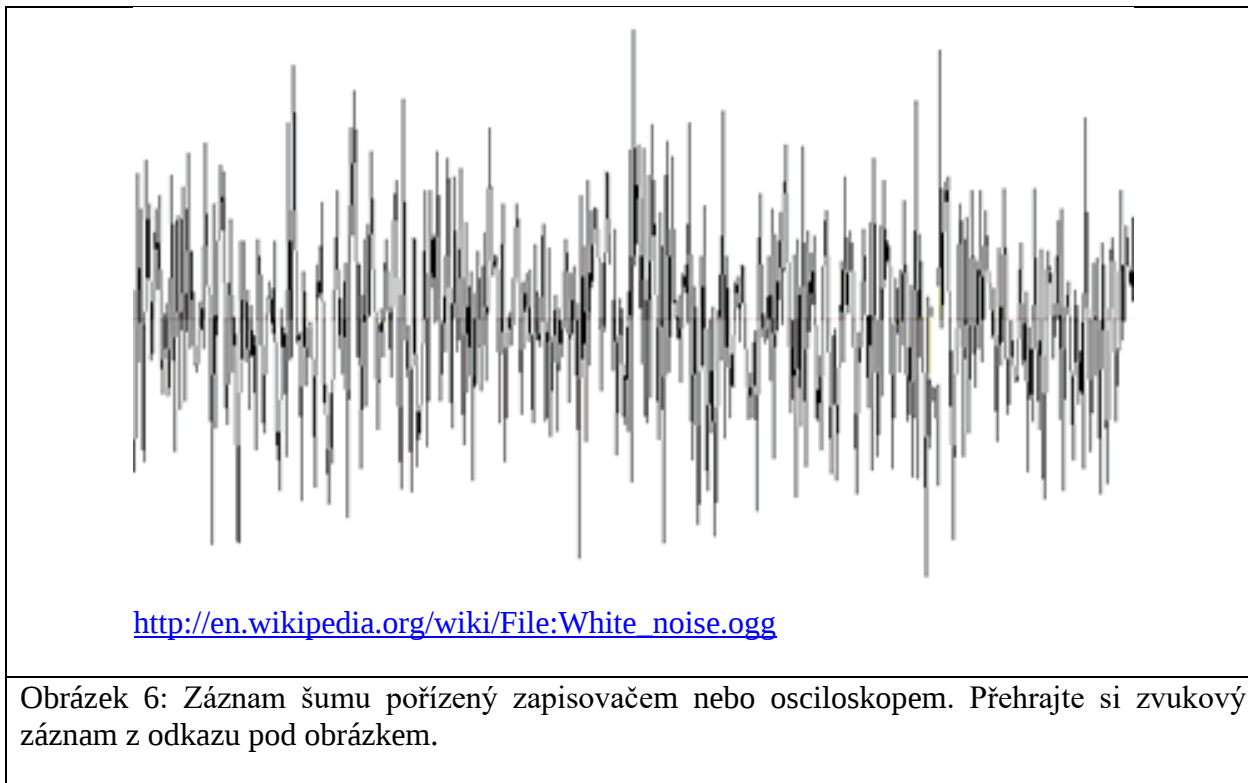
d) Šum¹

Šum je nežádoucí signál, který má všechny parametry náhodné.

Jeho amplituda, tj. velikost, se mění libovolně, nepředvídatelně. Jeho velikost náhodně nabývá libovolných hodnot.

Šum má náhodný kmitočet, hudebníci by řekli výšku tónu. Obsahuje všechny kmitočty (tóny), náhodně pomíchané.

¹ Když zapneme zesilovač, na jeho vstup nic nepřipojíme nic, hlasitost vytočíme na maximum, z reproduktorů slyšíme nežádoucí syčení – šum.



Šum rezistoru má dvě složky: Tepelný šum a proudový šum. Tepelný šum roste s teplotou, proudový šum roste s procházejícím proudem.

Vrstvové rezistory šumí více než drátové.

Šum rezistorů je v běžných zařízeních zanedbatelný vzhledem k šumu aktivních součástí. To znamená, že šum zesilovačů pochází prakticky jen z tranzistorů. Šum rezistorů je zcela zanedbatelný.

2.1.2 Rozdělení rezistorů

- podle nastavitelnosti
 - pevné
 - proměnné
- podle technologie
 - vrstvé
 - uhlíkové
 - metalizované
 - drátové

a) Pevné vrstvé rezistory

Základem je keramické tělísko, obvykle válcové. Na něm je nanesena funkční odporová vrstva.

Nejstarším materiálem je uhlík. Moderní kovové materiály mají lepší šumové vlastnosti a větší zatížitelnost.

Konečné hodnoty odporu se dosáhne vybroušením spirálové drážky, podélnými dělicími ryskami nebo broušením odporové vrstvy v celé ploše. Poslední způsob má nejmenší parazitní indukčnost.

Vývody jsou buď navařené na kovové čepičky, které jsou naraženy na konce rezistoru, nebo jsou připájené na kovovou vrstvu, která je nanesena na čela keramického tělíska. Bezčepičkové připojení je mechanicky i elektricky spolehlivější a má menší šum. Při neopatrném pájení se ale vývody mohou uvolnit a způsobit upadnutí vývodu nebo zkrat uvnitř tělíska.

b) Pevné drátové rezistory

Jsou navinuty odporovým drátem na keramické tělísko ve tvaru válce nebo trubky. Konce drátu jsou přivařeny k vývodům. Vývody jsou buď drátové, nebo páskové. Drátové jsou navařeny na čepičku, naraženou na tělísko.

Povrch drátových rezistorů je chráněn tmelem nebo smaltem. Tmel je obvykle červenohnědý, matný, pórovitý. Smalt bývá lahově zelený, lesklý. U tmelu ani smaltu obvykle není zaručována izolační schopnost. V praxi to znamená, že např. nelze umísťovat rezistory na plošný spoj tak, aby se vzájemně dotýkaly.

Drátové rezistory bývají konstruovány na velké zatížení. Mají ale velkou indukčnost (jsou to vlastně cívky navinuté odporovým drátem), proto se hodí jen pro nízké kmitočty.

c) Proměnné rezistory

Společným principem je odporová dráha s dvěma pevnými krajními vývody a třetím vývodem (běžcem) pohyblivým.

Požadavky

- plynulost změny odporu v závislosti na pohybu běžce
- stabilita odporu
- minimální šelest běžce
- minimální šum
- dlouhá životnost

Rozdělení podle

- tvaru dráhy a pohybu běžce
 - otočné, pohyb běžce je kruhový
 - lineární, pohyb běžce je přímkový
- materiálu podložky dráhy
 - tvrzený papír nebo tvrzená tkanina
 - keramika
- materiálu dráhy
 - drátové
 - vrstevné
 - lakosazové
 - cermetové
- četnosti použití
 - potenciometry (pro časté použití)
 - trimry (pro jednorázové nastavení)
- průběhu (závislosti odporu na poloze běžce)
 - lineární (N)
 - logaritmické (G)
 - jiné

Podložka dráhy z tvrzeného papíru nebo tvrzené tkaniny je vhodná pro nenáročné použití. Má špatnou rozměrovou stálost, navlhá, nezaručuje stabilní odpor.

Keramická podložka dráhy je velmi stabilní, nenavlhá, je mechanicky odolná, zaručuje stabilní odpor dráhy.

Lakosazová vrstva je tvořena směsí laku a sazí. Má malou mechanickou odolnost, krátkou životnost, velký šum.

Cermetová vrstva (složenina ceramic - metal) je speciální sklo, v němž je rozptýlen kovový prášek. Je mechanicky odolná, má dlouhou životnost, stabilní odpor a malý šum.

Potenciometry jsou konstruovány pro časté použití a obvykle jsou ovládány uživatelem zvenku přístroje.

U trimrů se předpokládá jednorázové nastavení při výrobě přístroje, případně dostavení při údržbě nebo opravách. Ovládají se obvykle šroubovákem. Jsou přístupné po odejmutí krytu přístroje a předpokládá se u nich jen odborná obsluha.

Průběh logaritmický se nejčastěji používá k regulaci hlasitosti. Vyrovnává nelineární citlivost lidského ucha tak, aby vnímaná hlasitost byla úměrná natočení (nebo posunutí) běžce.

2.2 Kondenzátory

Kondenzátor je elektronická součástka, jejíž hlavní základní vlastností je kapacita. Kapacita je schopnost nabít se energií ve formě elektrického pole. Kapacita se udává ve faradech [F].

Kondenzátor je tvořen dvěma elektrodami, které jsou navzájem odděleny dielektrikem, tj. nevodivým materiálem.

2.2.1 Základní vlastnosti kondenzátorů

- a) Kapacita
- b) Jmenovité a provozní napětí
- c) Izolační odpor
- d) Ztrátový činitel
- e) Závislost kapacity na teplotě
- f) Indukčnost

a) Kapacita

- jmenovitá
- skutečná

Jmenovitá kapacita je hodnota vyznačená na kondenzátoru, např. 1n5 (tj. 1,5 nF). Skutečná hodnota se od jmenovité může lišit v rámci dovolené tolerance.

Skutečná hodnota kapacity dále závisí na teplotě a na přiloženém napětí.

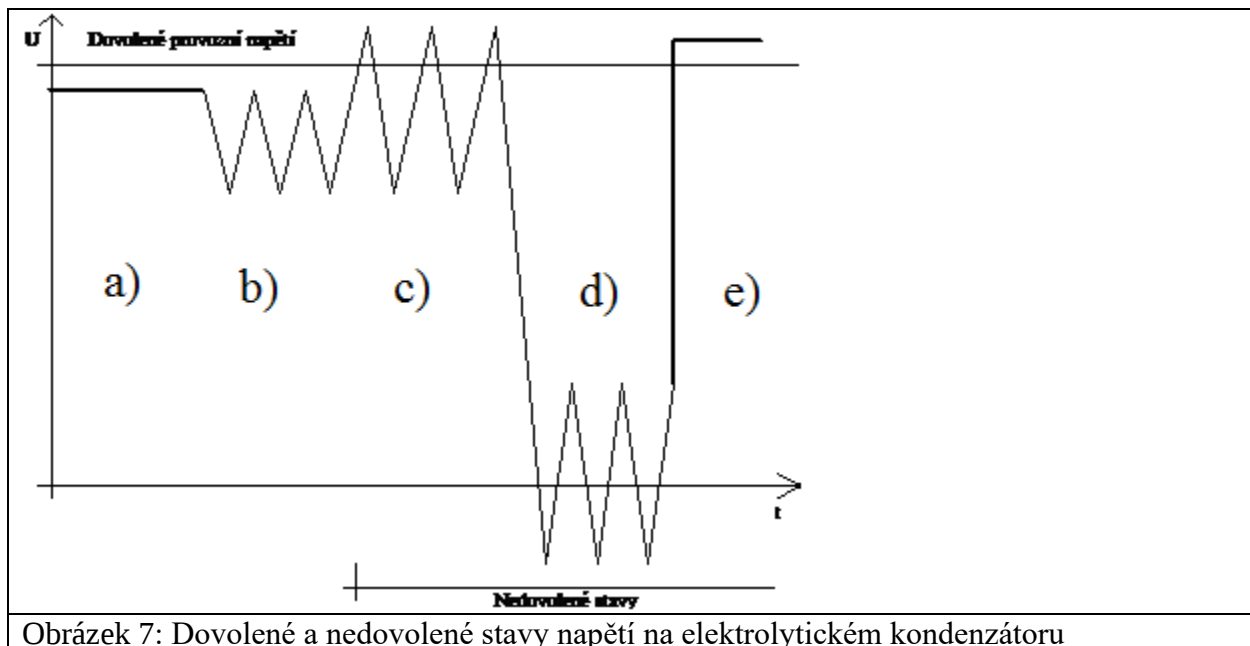
Kapacita se udává ve faradech, nebo častěji v jeho zlomcích, např. pF, nF, μ F, mF.

b) Jmenovité napětí

Jmenovité napětí se udává v katalogu, případně je vyznačeno na tělese kondenzátoru.

Provozní napětí je největší napětí, které může být za konkrétních okolností trvale na kondenzátor připojeno. Provozní napětí je při nízkých teplotách rovno jmenovitému. Při vyšších teplotách je nutno provozní napětí snížit podle katalogu.

I když je kondenzátor určen pouze pro stejnosměrné napětí (např. elektrolytické kondenzátory), může mít provozní napětí i určitou střídavou složku. Ani v tomto případě nesmí být špičková hodnota napětí větší než dovolené provozní napětí. Přitom nesmí docházet k přepólování kondenzátoru na opačnou polaritu. Pro některé kondenzátory (např. elektrolytické) katalog uvádí největší povolený střídavý proud. Při překročení tohoto proudu hrozí přehřátí a zničení kondenzátoru.



Obrázek 7: Dovolené a nedovolené stavy napětí na elektrolytickém kondenzátoru

Obrázek 7 ukazuje příklady průběhů napětí na elektrolytickém kondenzátoru.

V části a) je na kondenzátoru stejnosměrné napětí menší než dovolené provozní napětí. Tento stav je v pořádku.

V části b) je na kondenzátoru kromě stejnosměrné složky také střídavá složka. Špičková hodnota napětí nepřesahuje dovolené provozní napětí, je to v pořádku.

V části c) špičky střídavé složky přesahují dovolené provozní napětí, což je nepřípustné.

V části d) napětí na kondenzátoru dosahuje i záporných hodnot, což je u elektrolytického kondenzátoru nepřípustné.

V části e) je napětí na kondenzátoru trvale vyšší než dovolené provozní napětí, což je opět nepřípustné.

c) Izolační odpor

Izolační odpor je odpor mezi elektrodami kondenzátoru, měřený stejnosměrným napětím. S teplotou se izolační odpor zhoršuje. Neudává se u elektrolytických kondenzátorů, u kterých se místo toho definuje zbytkový proud.

d) Ztrátový činitel, činitel jakosti

Ztrátový činitel vyjadřuje ztráty, vznikající při průchodu střídavého proudu kondenzátorem.

U ideálního kondenzátoru by byl proud posunut vůči napětí přesně o 90 stupňů. U skutečného kondenzátoru je tento posun vždy menší. Je to způsobeno ztrátami, které vznikají např. při rychlých změnách polarizace dielektrika. Tyto ztráty můžeme vyjádřit myšleným odporem, připojeným paralelně nebo sériově ke kondenzátoru. Podle toho pak mluvíme o paralelním nebo sériovém náhradním schématu.

Ztrátový činitel $\tan \delta$ je poměr činného (tj. nežádoucího) proudu ku kapacitnímu (tj. žádoucímu) při paralelním náhradním schématu nebo poměr činného napětí ku kapacitnímu při sériovém náhradním schématu. Úhel δ je úhel, o který se skutečný fázový posun proudu a napětí na kondenzátoru liší od ideálních 90 stupňů. Nazývá se ztrátový úhel.

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega C_p R_p}$$

$$\tan \delta = \frac{U_R}{U_C} = \omega C_s R_s$$

Pro výpočty rezonančních obvodů je výhodné používat převrácenou hodnotu ztrátového činitele, tzv. činitel jakosti kondenzátoru Q :

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \omega C_p R_p$$

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{1}{\omega C_s R_s}$$

A jak je posunut proud proti napětí? A podle čeho si to pamatovat?

Když začínáme svoje pokusy s kondenzátorem, je kondenzátor prázdný, nenabitý, není na něm žádné napětí, protože ho ještě nikdo nenabil. Začneme ho nabíjet. Je na něm nulové napětí, za chvíli větší, ale pořád malé. A kondenzátor dychtivě polyká proud ze zdroje, kterým ho nabíjíme. Podobně jako vybitá automobilová baterka, která si na začátku nabíjení bere největší proud. Na začátku je tedy malé napětí, velký proud. Nejdříve musíme do kondenzátoru pustit proud, aby se za chvíli na něm mohlo objevit napětí. Nejdřív proud, pak napětí. Po chvíli nabíjení se kondenzátor nabije, napětí na něm se vyrovná s napětím nabíjecího zdroje, a proud do něj klesne. Podobně jako automobilová baterka, která ke konci nabíjení si bere jen malý proud.

Na kondenzátoru tedy platí, že proud je dříve než napětí, proud předbíhá napětí.

A u cívky je všechno stejně, jako u kondenzátoru, akorát obráceně. Takže u cívky nejdříve napětí, až pak proud.

e) Závislost kapacity na teplotě

Vlivem změny teploty se mění vlastnosti i rozměry dielektrika i plocha elektrod a tím dochází ke změně kapacity. Teplotní součinitel T_k udává poměrnou změnu kapacity, ke které dojde při změně teploty o 1 K, např. $5 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$. Velikost i znaménko teplotního součinitele závisí především na druhu dielektrika.

f) Indukčnost

Přívody a elektrody kondenzátoru se chovají jako nežádoucí parazitní cívky – mají indukčnost. Přívody jsou dráty – a cívky se přece vinou z drátů. Elektrody jsou často stočené do svitků, aby se ušetřil prostor. Tyto svitky se opět podobají cívkě.

Velikost nežádoucí parazitní indukčnosti závisí na konstrukci a rozměrech kondenzátoru. Největší je u kondenzátorů svitkových, nejmenší u slídkových a keramických.

2.3 Cívky

Cívka je elektronická součástka, jejíž základní vlastností je indukčnost. Indukčnost se udává v henry [H].

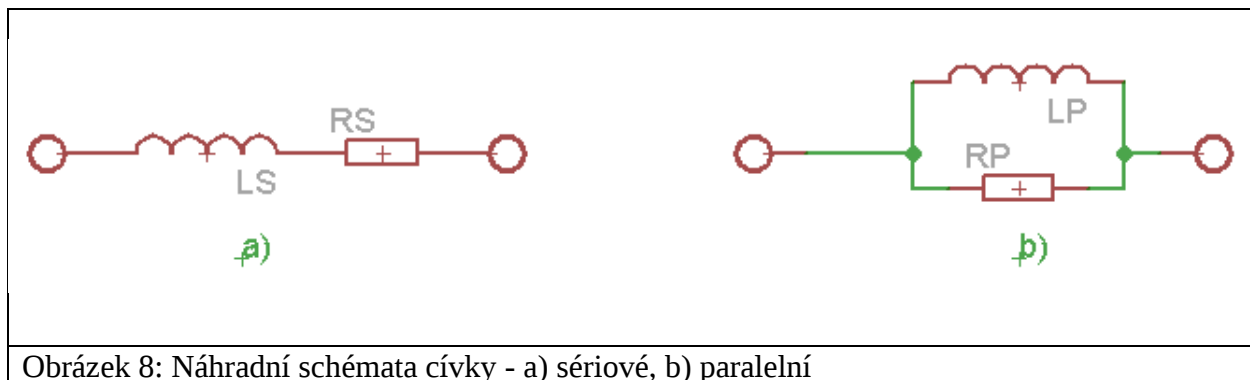
Indukčnost je schopnost nabít se energií ve formě magnetického pole.

Cívka je tvořena jednou nebo několika vrstvami závitů drátu. Indukčnost cívky závisí na počtu závitů, rozměrech, geometrickém uspořádání a na magnetických vlastnostech prostředí uvnitř a okolo cívky.

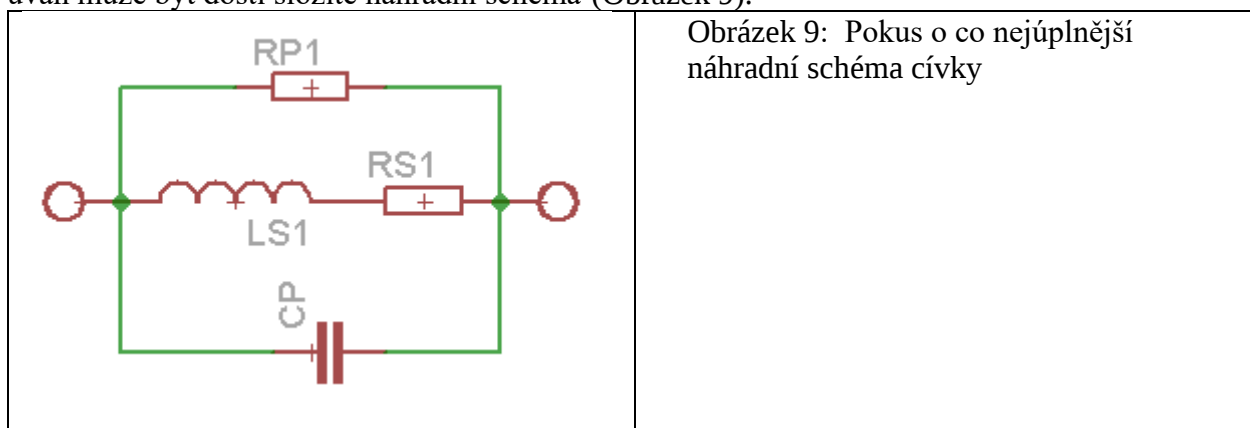
2.3.1 Základní vlastnosti cívek

a) Náhradní schéma cívky

U ideální cívky by proud byl zpožděn za napětím přesně o 90° . U skutečné cívky vznikají ztráty např. v ohmickém odporu vodiče a v jádru. Tyto ztráty způsobují, že posun proudu proti napětí je menší než 90° a to o tzv. ztrátový úhel δ . Tangens tohoto úhlu nazýváme ztrátový činitel. U cívek se častěji používá převrácená hodnota ztrátového činitele, tzv. činitel jakosti Q . Všechny tyto veličiny určíme obdobně jako u kondenzátorů z náhradních schémat cívky.



Náhradní schéma nahrazuje skutečné schéma nějakého obvodu tak, aby obvod byl srozumitelnější, aby se s ním dobře počítalo. Např. cívka se skládá především ze závitů drátu, které jí dávají indukčnost, kvůli které cívky vyrábíme. Drát má ale bohužel odpor, který můžeme na cívce změřit např. ohmmetrem. Tento odpor se jeví jako zapojený do série s indukčností. Kromě toho od jedné svorky cívky ke druhé může proud téci přímo po povrchu, např. po papírové izolaci, aniž by se obtěžoval zatékáním do vnitřku cívky. Tento proud tedy teče po jakémsi vnějším odporu, který jako by byl zapojený paralelně k celé cívce. Všechny části cívky mají vůči sobě kapacitu. Střídavý proud může cívku obtékat touto kapacitou, aniž by se namáhal překonávat závitů cívky. Výsledkem těchto úvah může být dosti složité náhradní schéma (Obrázek 9).



Tak, tím jsme to moc nezjednodušili, že? Naštěstí většinou vystačíme se sériovým náhradním schématem (Obrázek 8a). To je docela srozumitelné: Cívka má indukčnost L_S a drát má odpor R_S . Indukčnost je žádoucí, odpor je nežádoucí.

b) Ztrátový činitel, činitel jakosti

Ztrátový činitel vyjadřuje ztráty, vznikající při průchodu střídavého proudu cívkou.

Veškeré ztráty cívky můžeme pro jednoduchost shrnout do jediného odporu, který si představíme spojený sériově nebo paralelně s cívkou. U sériového modelu je ztrátový činitel dán poměrem napětí na odporu k napětí na indukčnosti:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_L} = \frac{R_S}{\omega L_S}$$

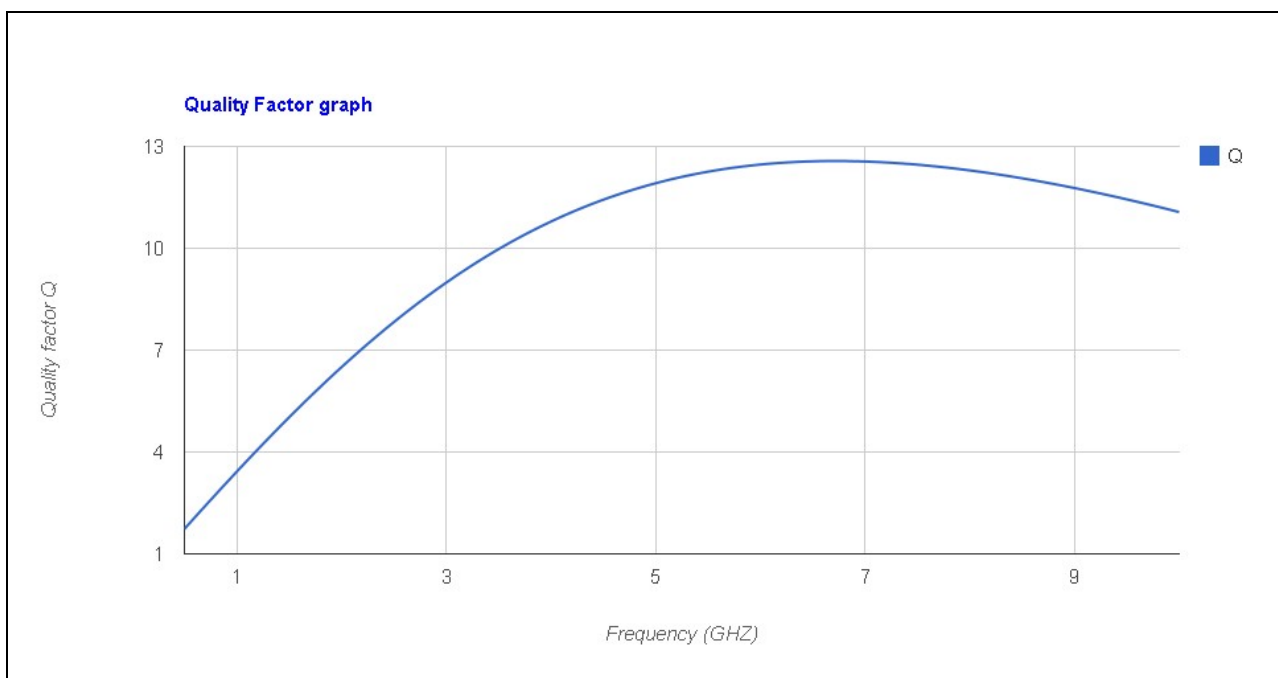
Činitel jakosti je

$$Q = \frac{\omega L_S}{R_S}$$

Činitel jakosti je kmitočtově velmi závislý. Podle vztahu

$$Q = \frac{\omega L_S}{R_S}$$

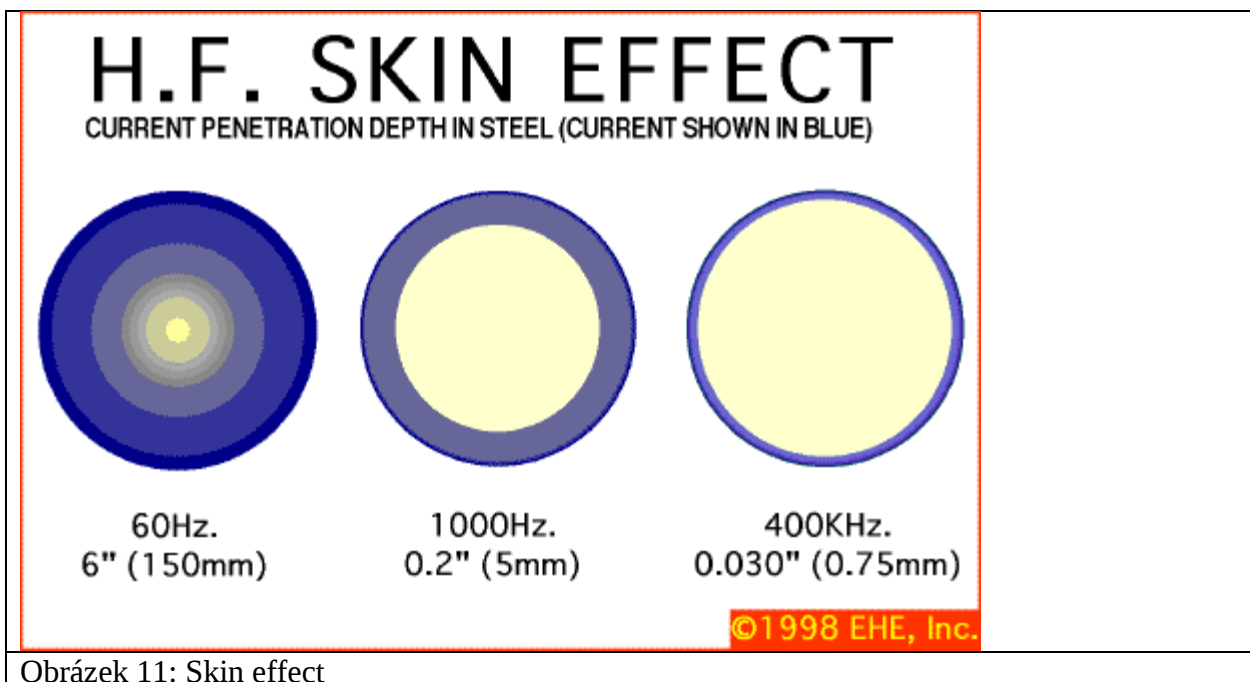
by se měl činitel jakosti s kmitočtem lineárně zvětšovat, a to do nekonečna. Ve skutečnosti jeho závislost na kmitočtu vypadá takto:



Obrázek 10: Závislost činitele jakosti na kmitočtu

S kmitočtem se totiž zvětšují ztráty v jádře i ve vodiči. Zpětným působením magnetického pole na vodič dochází k nerovnoměrnému rozložení hustoty proudu ve vodiči. Hustota proudu směrem ke středu vodiče se zmenšuje.

Při vysokých kmitočtech se pak proud teče jen tenkou povrchovou vrstvou a tím se podstatně zvětšuje odpor vodiče. Tento jev se nazývá povrchový jev (skin effect). Projevuje se tím více, čím vyšší je kmitočet. Jeho vliv se omezuje stříbřením vodičů nebo zvětšováním jejich povrchu tak, že cívky pro kmitočty do několika MHz se vinou tzv. vf lankem, které se skládá z mnoha navzájem izolovaných drátků. Tím se podstatně zvětší povrch, po kterém teče proud. Kapacita drátků nedovoluje užití vf lanka pro vyšší kmitočty, kde se užívají např. měděné postříbřené trubky.



Obrázek 11: Skin effect

3. Pasivní součástky nelineární

3.1 Diody

4. Aktivní součástky

Aktivní součástky využívají energii z vnějšího zdroje, např. z baterie nebo síťového zdroje. Tuto energii využívají ke změnám zpracovávaného signálu. Např. tranzistorový zesilovač zesiluje signál tak, že podle signálu z mikrofonu šikovně dávkuje energii zdroje do reproduktoru.

4.1 Tranzistory

Tranzistor je polovodičová součástka, která slouží ke spínání nebo zesilování signálů. Má tři vývody: kolektor, bázi, emitor.

Obvod mezi kolektorem a emitorem se chová jako proměnný odpor, který lze řídit pomocí báze.

4.1.1 Bipolární tranzistory

Tranzistory bipolární jsou řízeny proudem, přiváděným do báze. Tento proud závisí na rozdílu napětí mezi bází a emitorem. Podle způsobu zapojení tedy může být řídicí elektrodou buď báze, nebo emitor, nebo oba.

Hlavním parametrem bipolárního tranzistoru je jeho zesilovací činitel. Označuje se obvykle h_{21E} nebo β . Zesilovací činitel vyjadřuje schopnost tranzistoru zesilovat signály. Vyjadřuje, jak je proud kolektoru ovlivňován změnami proudu báze. Je-li např. zesilovací činitel 100 a proud báze se zvětší o 1 μ A, proud kolektoru se zvětší o 100 μ A.

Zesilovací činitel se vypočítá podle vzorce

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

Čím větší zesilovací činitel, tím lepší. Bývá v rozsahu 100...1000.

4.1.2 Unipolární tranzistory

Tranzistory unipolární jsou řízeny rozdílem napětí mezi bází a emitorem. Opět proto podle způsobu zapojení může být řídicí elektrodou buď báze, nebo emitor, nebo oba.

Hlavním parametrem unipolárního tranzistoru je jeho strmost. Označuje se obvykle S . Strmost vyjadřuje schopnost unipolárního tranzistoru zesilovat signály. Vyjadřuje, jak je proud kolektoru ovlivňován změnami napětí báze. Je-li např. strmost 5 mA/V a napětí báze se zvětší o 1 V, proud kolektoru se zvětší o 5 mA.

Strmost se vypočítá podle vzorce

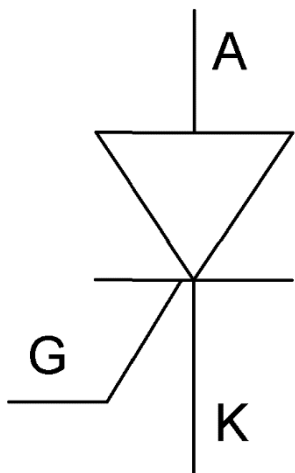
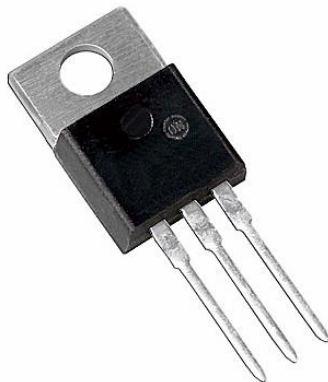
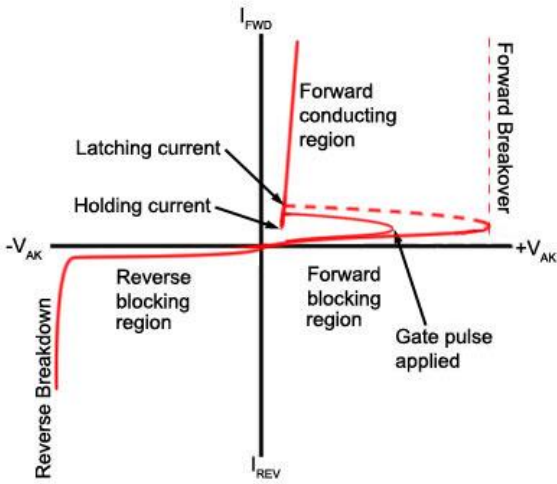
$$S = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{BE}}$$

Čím větší strmost, tím lepší. Bývá v rozsahu jednotek až desítek mA/V.

4.2 Vícevrstvé spínací součástky

4.2.1 Tyristory

Tyristor je polovodičová součástka, která slouží k regulovanému usměrňování střídavého proudu a ke spínání stejnosměrného proudu. Má tři vývody: katodu (K), anodu (A), řídicí elektrodu (G).

	
Obrázek 12: Schématická značka tyristoru	Obrázek 13: Tyristor v plastovém pouzdře
	
Obrázek 14: Tyristor v kovovém pouzdře	Obrázek 15: Voltampérová charakteristika tyristoru

Od tranzistoru se tyristor liší především těmito vlastnostmi:

- nemůže pracovat v lineárním režimu jako zesilovač
- řídicí elektrodou lze tyristor sepnout, ale ne rozepnout

Tyristor má dva možné stavy: sepnutý (vodivý), rozepnutý (nevodivý). Je-li tyristor v rozepnutém stavu, mezi anodou a katodou je velký odpor a neteče tudy téměř žádný proud.

Je-li tyristor v sepnutém stavu, tyristor propouští proud jen jedním směrem, podobně jako dioda. Mezi anodou a katodou je malý odpor a proud je určen vnějšími obvody. Sepnutý stav nelze zrušit řídicí elektrodou. Lze ho zrušit pouze snížením proudu anoda – katoda na nulu.

Tyristor lze sepnout

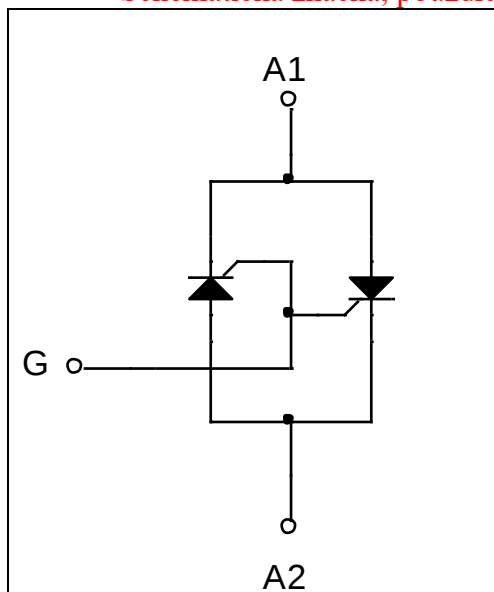
- zavedením proudu do řídicí elektrody
- vysokým napětím mezi anodou a katodou
- prudkým zvýšením napětí mezi anodou a katodou

Poslední dva případy sepnutí tyristoru jsou obvykle nežádoucí.

4.2.2 Triaky

Triak je polovodičová součástka, která slouží ke spínání střídavého proudu. Má tři vývody: anodu A1, anodu A2, řídicí elektrodu.

Schématická značka, pouzdra



Obrázek 16: Triak se podobá dvěma antiparalelně spojeným tyristorům

Triak se chová podobně jako dva antiparalelně zapojené tyristory. Protože může propouštět proud oběma směry, mají obě jeho výkonové elektrody podobnou funkci, a proto jsou obě označovány jako anody. Další vlastnosti triaku – chování v sepnutém a sepnutém stavu, možnosti sepnutí a rozepnutí – jsou obdobné jako u tyristoru.

Na rozdíl od tyristoru triak může být sepnut kladným i záporným proudem do řídicí elektrody. A protože přitom i napětí mezi výkonovými elektrodami může mít kladnou i zápornou polaritu, nastávají čtyři možné kombinace polarit výkonových elektrod a proudu řídicí elektrody:

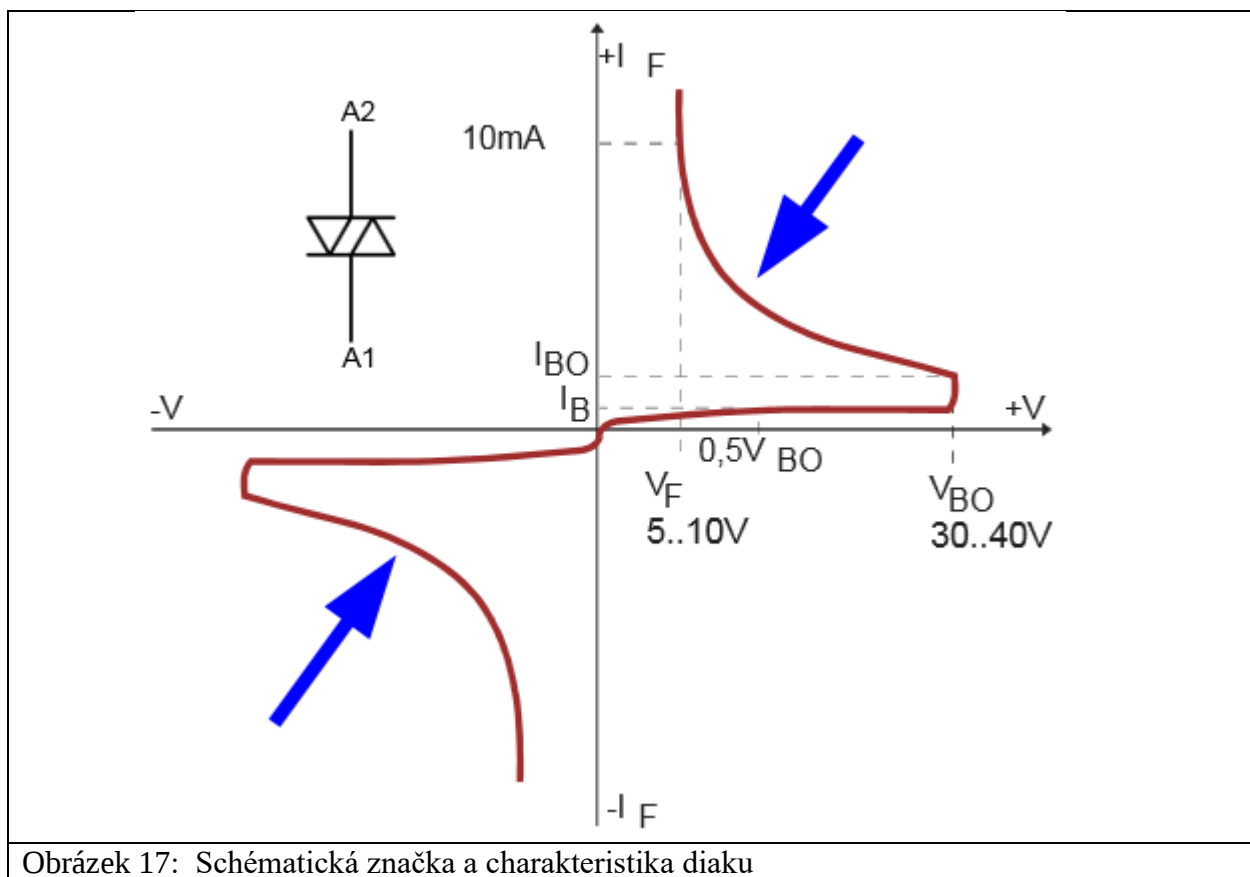
Napětí A2 vůči A1	Proud řídicí elektrody
-	-
-	+
+	-
+	+

Při každé z uvedených kombinací má triak poněkud jinou citlivost na proud řídicí elektrody.

4.2.3 Diaky

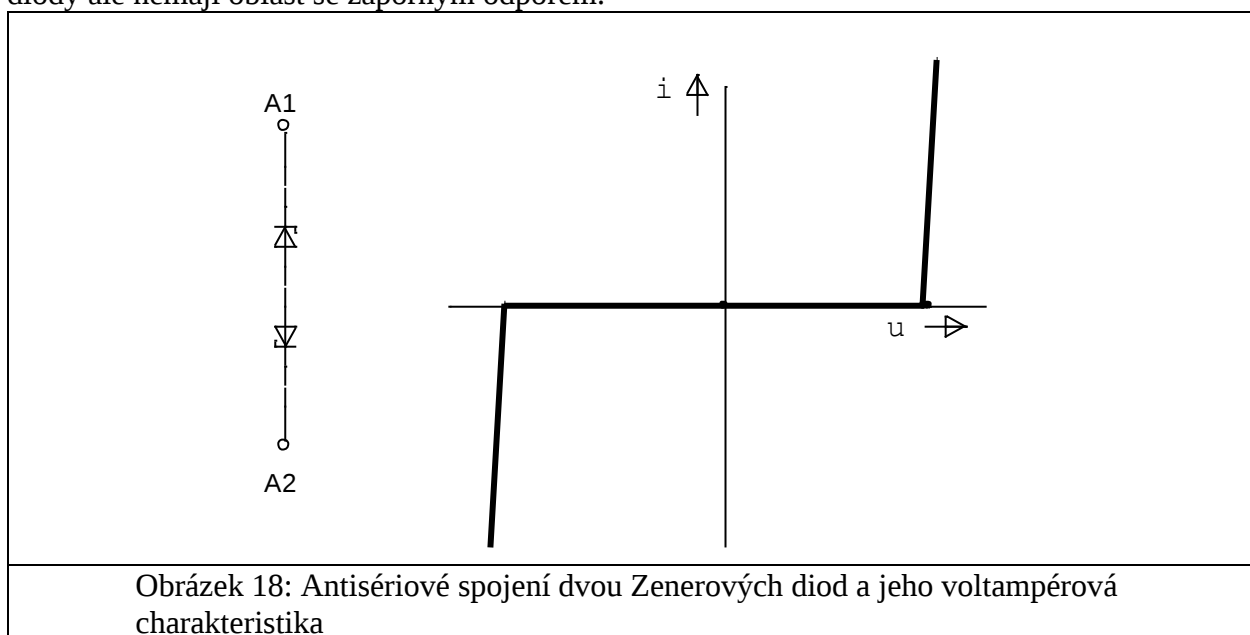
Diak je symetrická polovodičová součástka – dvojpól – s velmi nelineární charakteristikou. Charakteristika má oblasti záporného odporu. Tyto oblasti jsou v obrázku (Obrázek 17) vyznačeny modrými šipkami: při stoupajícím napětí tam proud klesá.

Při malém napětí diak nevede proud. Zvyšujeme-li napětí na něm, při napětí několik desítek voltů se diak „prorazí“, proud prudce stoupne a napětí na diaku klesne.



Obrázek 17: Schématická značka a charakteristika diaku

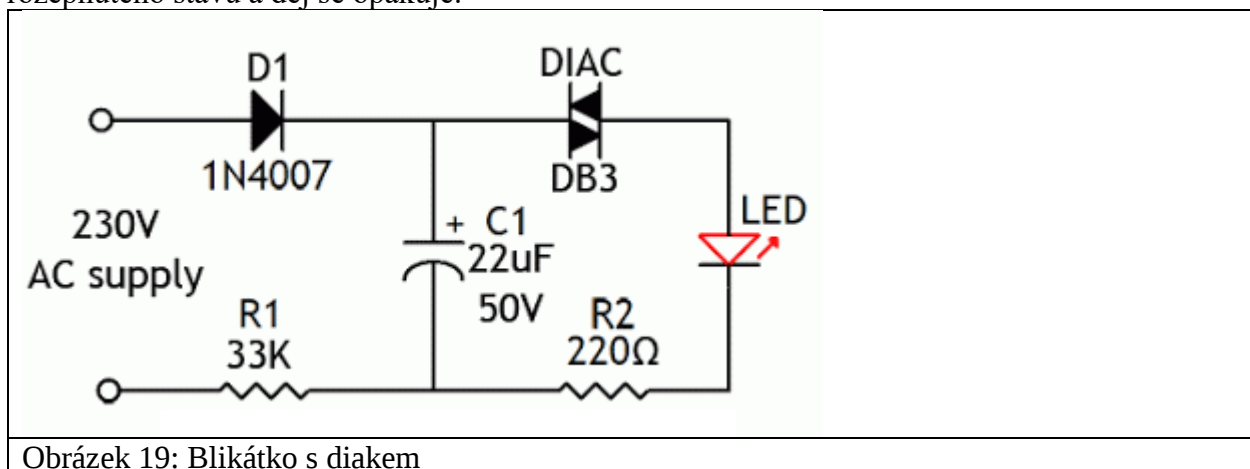
Diak se trochu podobá antisériovému zapojení dvou Zenerových diod (Obrázek 18). Zenerovy diody ale nemají oblast se záporným odporem.



Obrázek 18: Antisériové spojení dvou Zenerových diod a jeho voltampérová charakteristika

Diak se používá např. v obvodech pro řízení tyristorů a triaků, ve funkčních generátorech. Obrázek 19 ukazuje jednoduchý obvod, který pravidelně bliká svítivou diodou.

Funkce: Přes D1 a R1 se ze sítě pomalu nabíjí C1. Když napětí na C1 přesáhne průrazné napětí diaku, diak se prorazí a propustí proud do LED. Tímto proudem se C1 vybije, diak se vrátí do rozepnutého stavu a děj se opakuje.



4.3 Optočleny

Optočleny jsou součástky, sloužící k přenosu analogových nebo digitálních signálů pomocí optické vazby. Skládají se z vysílače a přijímače. Vysílač a přijímač jsou od sebe galvanicky odděleny. Mohou být zabudovány ve společném pouzdře, nebo mohou být od sebe vzdáleny. Přenos mezi vysílačem a přijímačem může být přímý, světlovodem nebo odrazem.

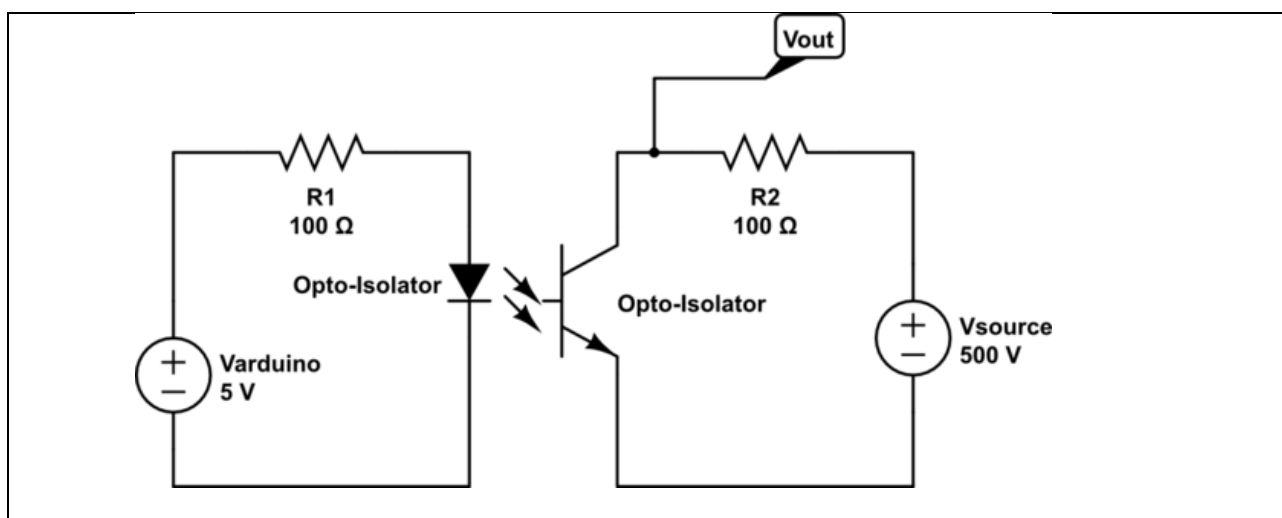
Jako vysílač může být použita svítivá dioda (obvykle infračervená) nebo pro větší vzdálenosti laser. Jako přijímač může sloužit fotodioda, fototranzistor nebo fototyristor.

Obr. Optočleny s diodou, tranzistorem, s Darlingtonovým zapojením, s ne/vyvedenou bází

4.3.1 Použití

Optočleny se používají tam, kde je nutno přenášet signál mezi dvěma vzájemně izolovanými místy.

Příklady: biozesilovače, dálkové ovládání, propojení počítačových systémů, automatické ovládání splachovače, zabezpečovací zařízení.



Obrázek 20: Ovládání obvodu s vysokým napětím pomocí mikrořadiče

4.3.2 Parametry optočlenů

Nejdůležitější parametry optočlenů jsou přenosový poměr a izolační napětí.

a) Přenosový poměr

Přenosový poměr se definicí podobá zesilovacímu činiteli u tranzistorů - vyjadřuje, jakou změnu výstupního proudu způsobí určitá změna vstupního proudu:

$$k = \frac{\Delta I_{\text{výst}}}{\Delta I_{\text{vst}}}$$

U optočlenů s fotodiodou je přenosový poměr malý, asi 0,001 až 0,01. Jedná se tedy o zeslabení – do vstupu musíme pouštět větší proud, než vyvoláme na výstupu.

U optočlenů s fototranzistorem je přenosový poměr jednotky až desítky, jde tedy o zesílení. Přenosový poměr se dá zvětšit tzv. Darlingtonovým zapojením fototranzistoru. Přibližně platí, že čím větší přenosový poměr, tím je optočlen pomalejší.

b) Izolační napětí

Izolační napětí vyjadřuje kvalitu izolace mezi vysílačem a přijímačem. Je to napětí, které je možno připojit mezi vysílač a přijímač, aniž by došlo k průrazu. Izolační napětí bývá stovky až tisíce voltů.

4.4 Lasery

4.4.1 Definice

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je zdroj světla, ve kterém molekuly určité látky absorbují dodávanou elektromagnetickou energii, na krátkou dobu ji shromažďují a potom ji opět vydávají v podobě intenzivního úzkého svazku koherentního¹ světla.

Látka, ve které se energie shromažďuje, může být pevná látka, kapalina, plyn nebo polovodič.

4.4.2 Vlastnosti

Laserový paprsek je velmi tenký a uchovává si svůj směr a rozměr na obrovské vzdálenosti.

4.4.3 Použití

Řezání a vrtání materiálů, chirurgie, zaměřovače, měřiče vzdálenosti, čtečky čárového kódu, laserové tiskárny, CD přehrávače a zapisovače, vysílače v optočlenech, holografie.

¹ Koherentní světlo: Elektromagnetické vlnění, jehož všechny složky mají totožnou frekvenci, amplitudu a fázi.

4.5 Operační zesilovače

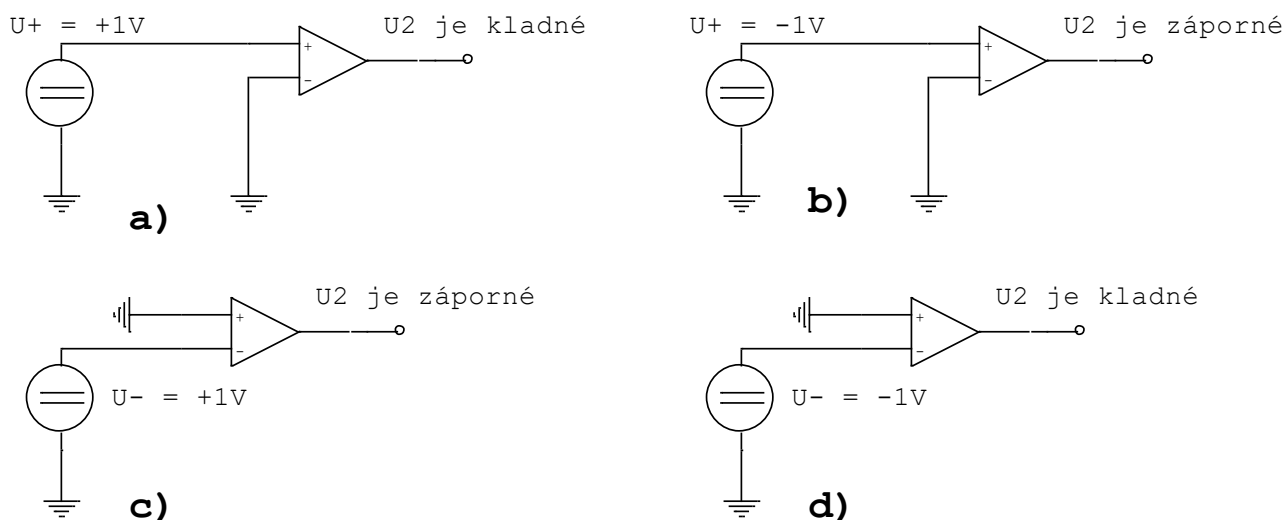
4.5.1 Definice, vlastnosti

Operační zesilovač (dále OZ) je integrovaný stejnosměrný zesilovač s velkým zesílením, velkým vstupním odporem a malým výstupním odporem.

a) Vstupy

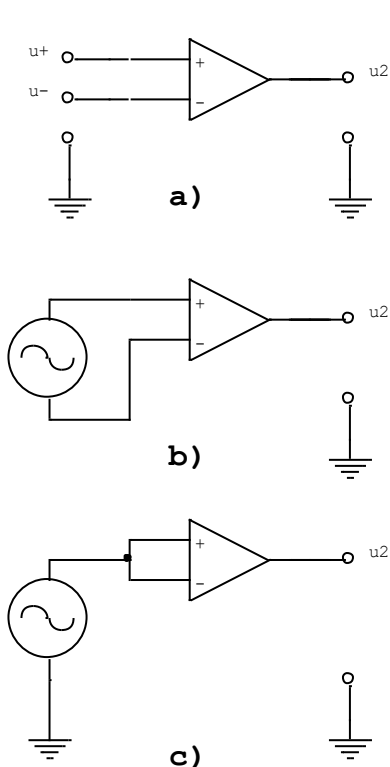
Operační zesilovač má dva vstupy. Jeden vstup je označený $+$ a říká se mu neinvertující (tj. neobracející), druhý je označený $-$ a říká se mu invertující (tj. obracející) (Obrázek 21). Je-li napětí na neinvertujícím vstupu kladnější než na invertujícím, výstupní napětí je kladné. Je-li naopak kladnější napětí na invertujícím vstupu, výstupní napětí je záporné.

Je-li vstup $+$ (neinvertující) kladnější než $-$ (invertující), je výstupní napětí kladné, v opačném případě je záporné.



Obrázek 21: Vstupy operačního zesilovače; a), b) neinvertující vstup neobrací polaritu, c), d) invertující vstup obrací polaritu

Obrázek 21 neříká, jak velké bude napětí na výstupu, udává jen jeho polaritu. Jak se dozvíme dále, zesílení signálu mezi vstupy je obrovské. Napětí na výstupu by tedy také mělo být obrovské - ale nemůže být větší než napájecí napětí, tj. obvykle $\pm 15 V$.



b) Zesílení

Rozdílový signál je napětí mezi vstupy + a -. Zesílení rozdílového signálu je velmi vysoké: podle typu OZ je desítky tisíc až jednotky milionů. Toto zesílení se záměrně zmenšuje zápornou zpětnou vazbou.

Souhlasný signál je společné napětí obou vstupů proti zemi. Přenos souhlasného signálu na výstup je velmi malý, proto zde mluvíme ne o zesílení, ale o potlačení (CMRR - Common Mode Rejection Ratio). Potlačení souhlasného signálu bývá 80 až 120 dB, tj. deset tisíckrát až milionkrát.

Obrázek 22: Operační zesilovač,
a) schématická značka,
b) rozdílový signál na vstupech
OZ, c) souhlasný signál na
vstupech OZ

Příklad: Měříme EKG na těle pacienta. Napětí EKG mezi měřicími elektrodami činí 1 mV. Do těla pacienta se ze sítě indukuje rušivé napětí 1 V, které je na obou elektrodách stejné. Zesílení rozdílového signálu je zápornou zpětnou vazbou nastaveno na 1000, potlačení souhlasného signálu je 80 dB (tj. 10 000).

Na výstupu bude napětí EKG

$$U_{EKG} = 1 \text{ mV} * 1000 = 1 \text{ V}$$

a rušivé napětí

$$U_r = \frac{1 \text{ V}}{10\,000} = 0,1 \text{ mV}$$

Vidíme, že žádoucí napětí EKG se zesílilo na použitelnou hodnotu, zatímco rušivé napětí, přestože bylo mnohokrát větší, bylo prakticky potlačeno.

c) Vstupní odpor

Vstupní odpor mezi vstupy + a - se nazývá rozdílový nebo diferenční a bývá stovky kΩ až mnoho MΩ.

d) Vstupní proud

Tranzistory, které jsou za vstupy OZ, potřebují pro udržení svého pracovního bodu (tj. pro svůj život) proud, který je nutno dodat do vstupů OZ. **Vstupní proud je proud, který teče do vstupů + a -.** Bývá od desítek pA do stovek nA. Největší vstupní proud mají OZ s bipolárními tranzistory na vstupu, podstatně menší s tranzistory JFET a nejmenší s MOSFET.

Vstupní proud je většinou závažnější parametr OZ než vstupní odpor a při návrhu zapojení je někdy nutno s ním počítat. Rezistorová síť kolem vstupů OZ musí být dimenzována tak, aby na rezistorech

nevznikal vstupním proudem rušivý úbytek. Čím větší vstupní proud, tím menší odpory je nutno použít.

e) Výstupní odpor

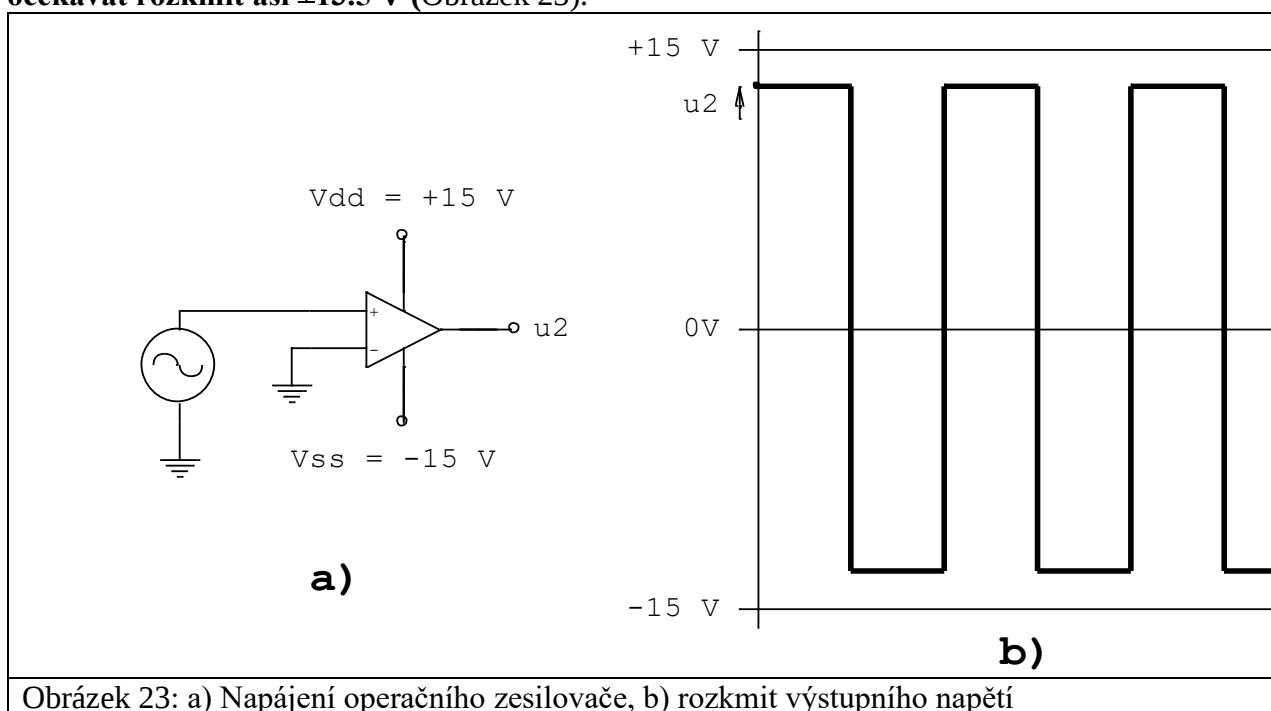
Výstupní odpor bývá desítky Ω .

Zdá se to hodně, ale díky záporné zpětné vazbě se tato hodnota ve skutečných zapojeních zmenší prakticky na nulu.

f) Napájení a výstupní napětí

OZ jsou většinou napájeny symetrickým napájecím napětím ze dvou stejných zdrojů, např. ± 15 V. To umožňuje zpracovávat napětí obou polarit. OZ díky tomu může dodávat i záporné napětí.

Dosažitelná amplituda výstupního napětí přímo závisí na napájecím napětí. Rozkmit výstupního napětí je orientačně $\pm(U_N - 1.5)$ V. Např. **při napájecím napětí ± 15 V můžeme očekávat rozkmit asi ± 13.5 V** (Obrázek 23).



Obrázek 23: a) Napájení operačního zesilovače, b) rozkmit výstupního napětí

g) Mezní kmitočet

Při vyšších kmitočtech zesílení OZ klesá. Kmitočet, při kterém zesílení poklesne o 3 dB, se nazývá mezní kmitočet.

Často se udává tzv. tranzitní kmitočet. Je to kmitočet, při kterém zesílení OZ poklesne na jedničku.

Obrázek

4.5.2 Ideální OZ

Při analýze a výpočtech zapojení s OZ obvykle počítáme s tzv. ideálním OZ. Jeho vlastnosti jsou v tabulce:

Parametr	Hodnota
Zesílení	∞
Vstupní odpor	∞
Vstupní proud	0
Potlačení souhl. signálu	∞
Výstupní odpor	0
Mezní kmitočet	∞

Uvedené předpoklady značně zjednoduší výpočet, a přitom obvykle nezpůsobí podstatnou chybu, protože skutečné OZ se svými vlastnostmi velmi blíží ideálnímu OZ. V případě potřeby můžeme hotový výpočet korigovat podle skutečných vlastností OZ.

5. Zesilovače

V tranzistorových zesilovačích se využívá schopnosti tranzistoru zesilovat změny proudu. Změníme-li proud mezi bází a emitorem, změní se i proud mezi kolektorem a emitorem, ale podstatně více. To je dáno zesilovacím činitelem:

$$\Delta I_{KE} = \beta * \Delta I_{BE}$$

Proud kolektoru je tedy řízen proudem mezi bází a emitorem. Proud mezi báží a emitorem závisí na rozdílu napětí mezi těmito elektrodami.

To dává různé možnosti řízení tohoto proudu.

Např. je-li napětí emitoru stabilní (emitor je uzemněn), rozdíl napětí mezi báží a emitorem stoupá, stoupá-li napětí báze. Pak je vstupem zesilovače báze tranzistoru.

Je-li napětí báze stabilní (báze je uzemněna), rozdíl napětí mezi báží a emitorem stoupá, klesá-li napětí emitoru. Pak je vstupem zesilovače emitor tranzistoru.

Stabilní napětí jedné elektrody nemusí být zajištěno jen galvanickým uzemněním, tj. drátovým spojem na zem. Pokud zpracováváme jen střídavé signály, můžeme stabilní napětí některé elektrody zajistit i jejím uzemněním přes dostatečně velký kondenzátor.

5.1 Zesilovače s jedním tranzistorem

Použijeme-li tranzistor jako zesilovač, musíme k němu připojit zdroj signálu (např. mikrofon) a zátěž (např. reproduktor). Zdroj signálu má dva vývody, zátěž má dva vývody, dohromady čtyři vývody. Tranzistor má jen tři vývody. Proto musí být jeden vývod tranzistoru připojen jak ke zdroji signálu, tak k zátěži – bude společný zdroji signálu i zátěži. Tento vývod tedy bude společnou elektrodou.

Proto můžeme vytvořit tranzistorové zesilovače se

- společným emitorem
- společným kolektorem
- společnou báží

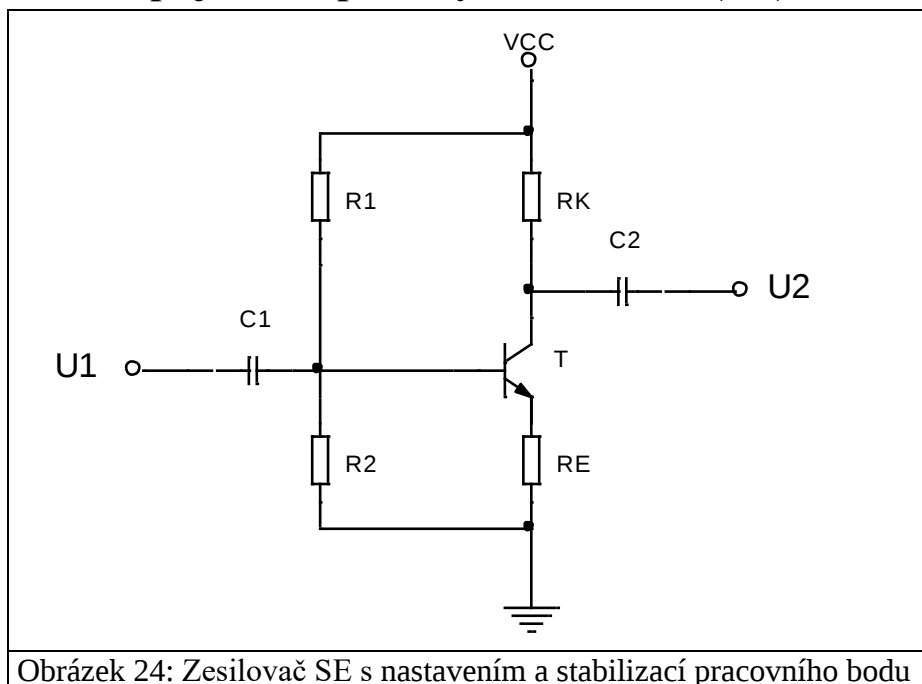
Např. v zesilovači se společným emitorem je emitor tranzistoru připojen jak ke zdroji signálu - mikrofonu, tak k zátěži – reproduktoru.

5.1.1 Náhradní parametry tranzistoru

V dalším výkladu budeme pro zjednodušení používat tyto náhradní parametry tranzistoru:

$U_{be} = 0,7$
$\beta > 100$
$r_E = \text{desítky } \Omega$

5.1.2 Zapojení se společným emitorem (SE)



Obrázek 24: Zesilovač SE s nastavením a stabilizací pracovního bodu

Rezistory R_1 , R_2 vytvářejí stejnosměrné předpětí báze, potřebné pro nastavení pracovního bodu. Na rezistoru R_K vzniká výstupní napětí. Rezistor R_E zavádí zápornou zpětnou vazbu, odvozenou od výstupního proudu. Tím přispívá ke stabilizaci pracovního bodu.

a) Zesílení

Proudové zesílení

$$A_i = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}$$

je rovno zesilovacímu činiteli tranzistoru β .

Napěťové zesílení

$$A_u = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}$$

odvodíme takto:

Napětí emitoru je stále o 0,7 V nižší než vstupní napětí:

$$U_E = U_1 - 0,7$$

proto také

$$\Delta U_E = \Delta U_1$$

Proud báze je zanedbatelný, proto

$$I_E = I_K$$

a

$$\Delta I_E = \Delta I_K$$

Změnu emitorového i kolektorového proudu vyjádříme pomocí změny vstupního napětí a emitorového odporu:

$$\Delta I_E = \Delta I_K = \frac{\Delta U_E}{\Delta R_E} = \frac{\Delta U_1}{\Delta R_E} \quad (1)$$

Změna výstupního napětí je dána součinem změny ΔI_K a kolektorového odporu R_K . A protože když úbytek na kolektorovém odporu stoupá, výstupní napětí klesá, na obou stranách následující rovnice budou opačná znaménka:

$$\Delta U_2 = - R_K * \Delta I_K$$

Za ΔI_K dosadíme z (1):

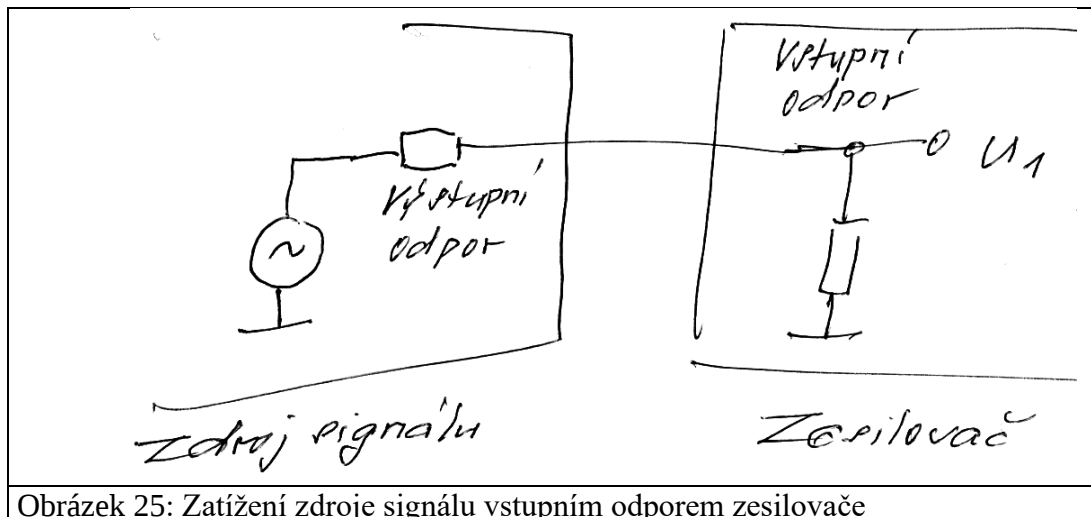
$$\Delta U_2 = - R_K * \frac{\Delta U_1}{\Delta R_E}$$

Z toho pak

$$A_u = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = - \frac{R_K}{R_E}$$

Znaménko mínus v tomto vzorci pro zesílení znamená, že změny na výstupu mají opačnou polaritu než změny na vstupu. Když napětí na vstupu stoupá, napětí na výstupu klesá.

b) Vstupní odpor

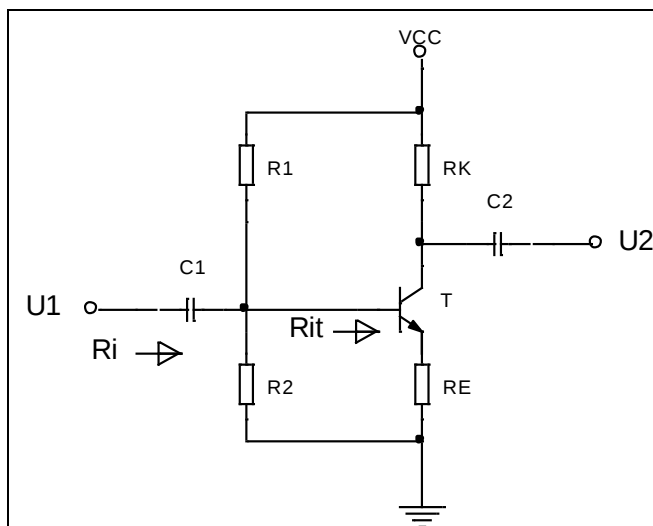


Obrázek 25: Zatížení zdroje signálu vstupním odporem zesilovače

Vstupní odpor zesilovače představuje zátěž pro zdroj signálu, který je ke vstupu zesilovače připojen. Vstupní odpor zesilovače tedy s výstupním odporem zdroje signálu tvoří dělič napětí. Na vstup zesilovače se díky tomu dostane menší napětí.

Vstupní odpor vypočteme jako poměr změny vstupního napětí ke vstupnímu proudu.

$$R_i = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}$$



Obrázek 26: Vstupní odpor včetně R_1 , R_2 , R_E , bez C_e

Při odvození vstupního odporu buď odpor emitorové elektrody r_E tranzistoru zanedbáme, nebo jej zahrneme do odporu R_E a budeme počítat jen s odporem R_E . Vstupní odpor zesilovače podle obrázku bude paralelní kombinací odporů R_1 , R_2 a vstupního odporu tranzistoru. Nejprve budeme počítat vstupní odpor tranzistoru R_{it} , tj. bez uvažování vlivu odporů R_1 , R_2 .

Vstupní proud (tj. proud do báze) je β -krát menší než emitorový proud. Spočítejme nejprve emitorový proud a z něj pak vypočteme vstupní proud. Protože platí

$$\Delta U_E = \Delta U_1$$

můžeme změnu emitorového proudu vyjádřit takto:

$$\Delta I_E = \frac{\Delta U_1}{R_E}$$

Změna vstupního proudu bude β -krát menší:

$$\Delta I_1 = \frac{1}{\beta} * \frac{\Delta U_1}{R_E}$$

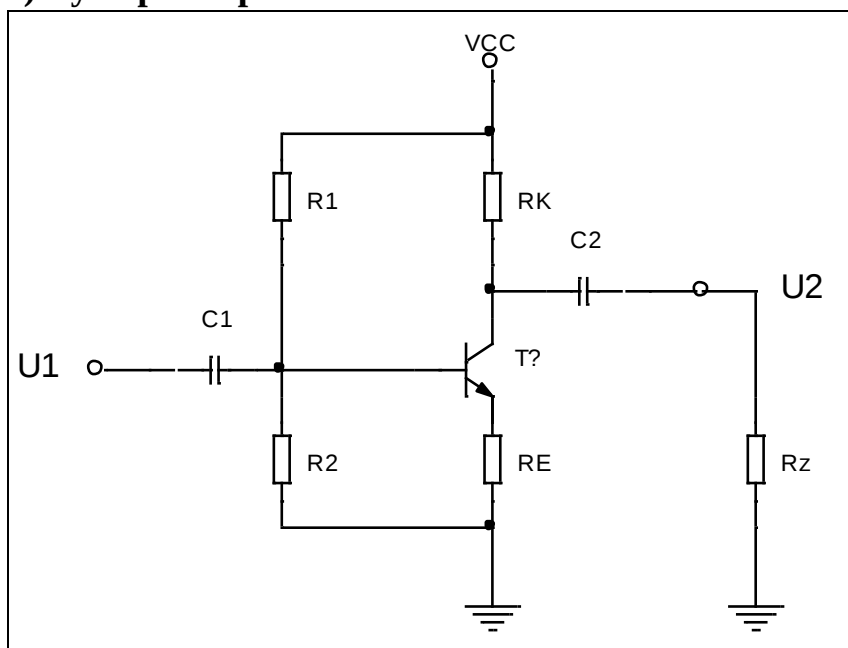
z toho

$$R_{it} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} = \beta * R_E$$

Výsledný vstupní odpor je

$$R_i = R_{it} || R_1 || R_2 = (\beta * R_E) || R_1 || R_2$$

c) Výstupní odpor



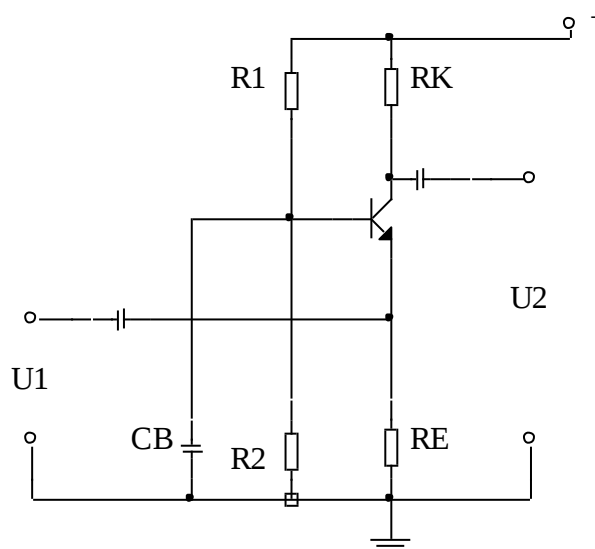
Výstupní odpor zesilovače tvoří s odporem zátěže napěťový dělič. Proto se na zátěž dostane menší napětí.

Výstupní odpor je roven paralelní kombinaci dynamického odporu kolektorové elektrody tranzistoru a kolektorového odporu R_K . Protože dynamický odpor kolektorové elektrody je velký (řádově megaohmy), můžeme jeho vliv zanedbat a výstupní odpor je přibližně roven kolektorovému odporu:

$$R_o \approx R_K$$

Obrázek 27: Výstupní odpor zesilovače (R_K) tvoří se zátěží R_z dělič napětí

5.1.3 Zapojení se společnou bází



Obrázek 28: Zapojení se společnou bází

a) Zesílení

Proudové zesílení je rovno jedné:

$$A_i = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} = 1$$

Proud, který dodá zdroj signálu, vtéká do emitoru. A protože proud emitoru považujeme za stejný, jako proud kolektoru, stejný proud vytéká kolektorem do zátěže.

Napěťové zesílení

$$A_u = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = \frac{R_C}{r_E}$$

b) Vstupní odpor

Vstupní odpor je roven paralelní kombinaci emitorového odporu R_E a odporu emitorové elektrody tranzistoru r_E :

$$R_i = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} = r_E \parallel R_E$$

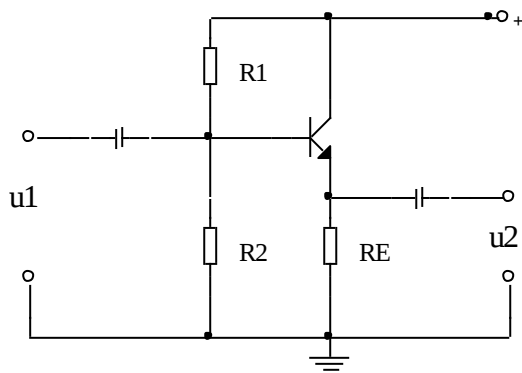
Protože R_E bývá podstatně větší než r_E , je vstupní odpor přibližně roven odporu r_E

$$R_i \approx r_E$$

c) Výstupní odpor

Výstupní odpor je přibližně roven kolektorovému odporu:

$$R_o \approx R_K$$

5.1.4 Zapojení se společným kolektorem

Obrázek 29: Zapojení se společným kolektorem

a) Zesílení

Napěťové zesílení je rovno jedné:

$$A_u = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} = 1$$

Proto se toto zapojení často nazývá „emitorový sledovač“ – napětí na emitoru sleduje vstupní napětí.

Proudové zesílení je rovno proudovému zesilovacímu činiteli tranzistoru:

$$A_i = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} = \beta$$

Přestože napěťové zesílení je jen 1, výkonové zesílení

$$A_p = A_u * A_i$$

je díky velkému proudovému zesílení velké.

b) Vstupní odpor

Vstupní odpor je roven paralelní kombinaci odporů R_1 a R_2 a vstupního odporu vlastního tranzistoru R_{it} :

$$R_i = R_{it} \parallel R_1 \parallel R_2 = (\beta * R_E) \parallel R_1 \parallel R_2$$

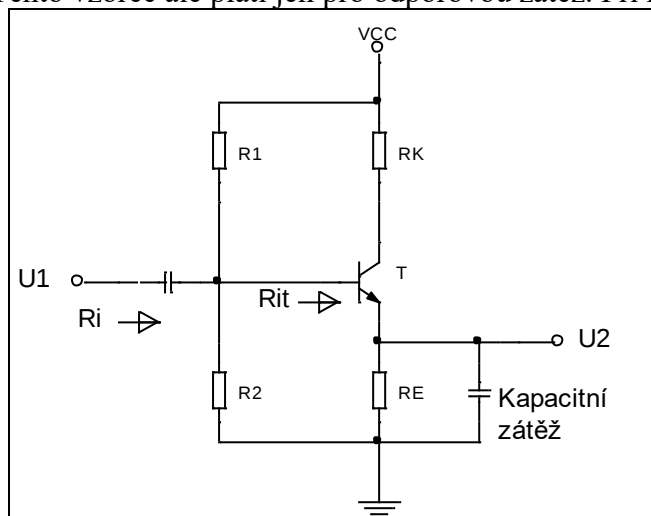
Tento vzorec je stejný jako vzorec pro vstupní odpor SE. Přesto dosahovaný vstupní odpor SK bývá podstatně větší, protože odpor R_E v zapojení SE bývá blokován paralelním kondenzátorem, aby se dosáhlo většího zesílení. Tím se u něj součin $(\beta * R_E)$ redukuje na $(\beta * r_E)$ a výsledný vstupní odpor se zmenší.

c) Výstupní odpor

Výstupní odpor je přibližně roven odporu emitorové elektrody r_E :

$$R_o \approx r_E$$

Tento vzorec ale platí jen pro odporovou zátěž. Při kapacitní zátěži sice nabíjení kondenzátoru



Obrázek: Emitorový sledovač s kapacitní zátěží

při stoupajícím signálu probíhá přes malý odpor r_E . Při klesajícím signálu je ale přechod báze-emitor pólován v nepropustném směru, protože báze je zápornější než emitor. Vybíjení kondenzátoru proto může probíhat jen přes odpor R_E , který je podstatně větší. Proto při kapacitní zátěži je výstupní odpor

$$R_o \approx r_E \text{ pro stoupající,}$$

$$R_o \approx R_E \text{ pro klesající signál.}$$

5.1.5 Shrnutí

a) Přehled vlastností

	Společný emitor	Společná báze	Společný kolektor
Vstupní odpor (bez vlivu R_1, R_2)	$\beta * R_E$	r_E	$\beta * R_E$
	$(\beta * r_E)^1$		
	střední	malý	velký
Výstupní odpor	R_K	R_K	r_E
	velký	velký	$(R_E)^2$
			malý
Napěťové zesílení	$-\frac{R_K}{R_E}$	$\frac{R_K}{r_E}$	1
	$(-\frac{R_K}{r_E})^1$		
	velké	velké	malé

b) Použití

Zapojení se společným emitorem je nejužívanější. Používá se pro nf zesilovače, předzesilovače, vf zesilovače. Má velké zesílení a vyhovující vstupní odpor.

Zapojení se společnou bází je používáno výlučně pro vf zesilovače, protože je odolné proti samovolnému rozkmitání. Jeho malý vstupní odpor je velmi vhodný pro připojení koaxiálního kabelu, který má malou impedanci, řádově desítky ohmů.

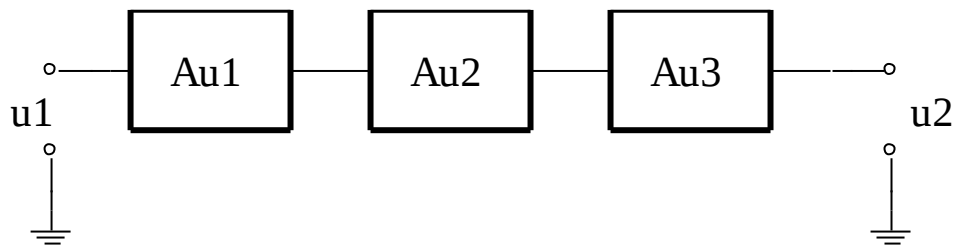
¹ S blokováním emitorového odporu kondenzátorem

² S kapacitní zátěží

Zapojení se společným kolektorem je pro svůj velký vstupní odpor vhodné pro snímání signálů ze zdrojů s velkým vnitřním odporem, např. z krystalové přenosky. Pro svůj malý výstupní odpor se hodí např. pro napájení dlouhých kabelů a do koncových stupňů nf zesilovačů.

5.2 Vícetupňové zesilovače

Pokud zesílení jednoho stupně nestačí, spojí se do kaskády dva nebo více zesilovacích stupňů.



Obrázek 30: Třístupňový zesilovač

Zesílení celého zesilovače je dáno součinem zesílení jednotlivých stupňů. Např. zesilovač na obrázku má zesílení

$$A_{uc} = \frac{u_2}{u_1} = A_{u1} * A_{u2} * A_{u3}$$

Při výpočtu zesílení jednotlivých stupňů je nutno brát v úvahu, že výstup stupně je zatížen vstupním odporem následujícího stupně a tím se jeho dosažitelné zesílení zmenšuje.

5.3 Zesilovače s operačním zesilovačem

5.3.1 OZ jako lineární zesilovač

U lineárního zesilovače je lineární závislost výstupního napětí na vstupním:

$$u_2 = A * u_1$$

Samotný OZ bez zpětné vazby nelze použít jako lineární zesilovač, protože má příliš velké zesílení. Už nepatrné napětí na vstupu způsobí limitaci výstupu. Limitace je stav, ve kterém má výstupní napětí jednu z krajních hodnot. Při napájecím napětí ± 15 V je to např. $+13.5$ V nebo -13.5 V. (Limitace = omezení).

V nelineárním režimu bez zpětné vazby se OZ používá jako komparátor.

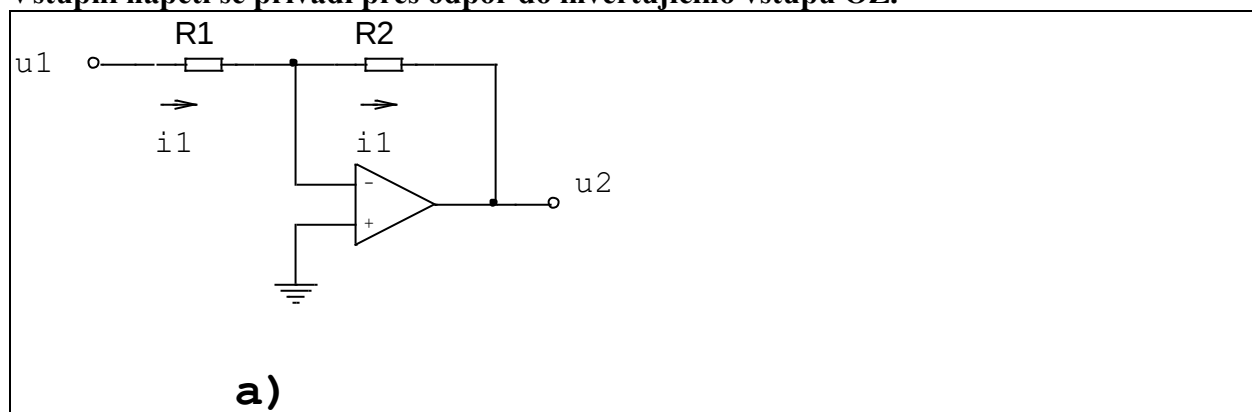
Zavedením záporné zpětné vazby (ZV) OZ "zkrotne" a výsledné zesílení lze volit ve velmi širokých mezích. K určení vztahů pro výpočet zesílení vystačíme s Ohmovým a Kirchhoffovým zákonem a následující poučkou:

V zapojeních se zápornou ZV si OZ nastaví vždy takové výstupní napětí, aby napětí mezi jeho vstupy bylo nulové.

Tato poučka vyplývá z vlastností ideálního OZ.

5.3.2 Invertující zesilovač

Výstupní napětí invertujícího zesilovače má opačnou polaritu než vstupní napětí. Vstupní napětí se přivádí přes odpor do invertujícího vstupu OZ.



Obrázek 31: Invertující zapojení zesilovače s OZ

a) Odvození zesílení

Neinvertující vstup „+“ je uzemněný. Záporná zpětná vazba se postará o to, že mezi oběma vstupy OZ je nulové napětí. Kdyby nebylo, nemohlo by s nekonečným zesílením A_{uoz} být na výstupu „rozumné“ napětí. Nekonečno krát cokoliv je totiž nekonečno, pokud to „cokoliv“ není nula. Jen vynásobeno nulou může nekonečno dát něco „rozumného“.

Když je tedy neinvertující vstup „+“ uzemněný, mezi oběma vstupy je nulové napětí, invertující vstup „-“, se chová také jako uzemněný. Je na něm virtuální (zdánlivá) zem. Zdánlivá proto, že vstup je uzemněný jen "jako".

Pravý konec odporu R_1 je spojený s virtuální zemí, je jakoby uzemněný. Napětí u_1 protlačí odporem R_1 do virtuální země proud

$$i_1 = \frac{u_1}{R_1}$$

Vstupní proud OZ je nulový, to znamená, že do vstupu OZ neteče nic. Proud i_1 , přitékající odporem R_1 se tedy v uzlu R_1 - R_2 nedělí a celý proud i_1 teče dále do odporu R_2 . Na něm proud i_1 vytvoří úbytek

$$u_{R2} = i_1 * R_2$$

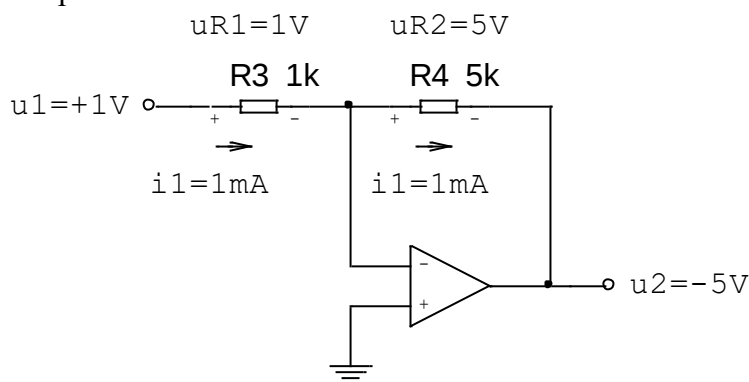
Oba odpory R_1 a R_2 jsou zapojené v sérii a jsou protékány stejným proudem. Jejich střed má napětí virtuální země (0 V). Proto levý konec R_1 musí mít opačnou polaritu, než pravý konec R_2 . Je-li vstupní napětí u_1 kladné, pak výstupní napětí u_2 je záporné. Jinými slovy: Má-li OZ dosáhnout na invertující vstup virtuální nuly, musí na R_2 nastavit napětí opačné polarity, než je na R_1 .

Poměr napětí na odporech R_2 a R_1 je roven poměru výstupního a vstupního napětí - tj. zesílení. Proto **zesílení je rovno poměru odporů**. A protože napětí na výstupu má opačnou polaritu než na vstupu, **zesílení má záporné znaménko**:

$$A_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

Příklad

Obrázek 32 ukazuje příklad zapojení invertujícího zesilovače s konkrétními hodnotami napětí a odporů.



Obrázek 32: Příklad invertujícího zesilovače

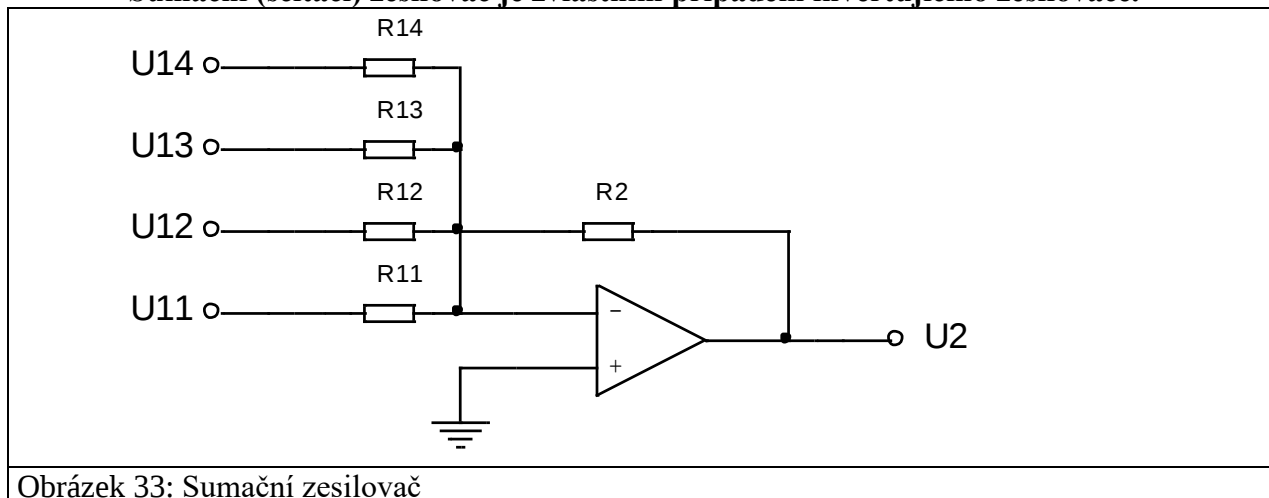
Vstupní napětí +1V protlačí do rezistoru $R_1 = 1k$ proud $i_1 = 1mA$. Tento proud pokračuje dále do rezistoru R_1 , na kterém vytvoří úbytek napětí $u_{R2} = 5V$. V obrázku jsou vyznačeny polarity napětí na obou rezistorech: Protože proud oběma odpory pochází z kladného zdroje vlevo od nich, budou napětí na obou odporech vlevo kladnější, vpravo zápornější.

b) Vstupní odpor

Odpor R1 je svým pravým koncem spojený s virtuální zemí, skrz kterou už není vidět nic. Proto odpor, který je vidět za vstupní svorkou zesilovače (tj. **vstupní odpor**) se rovná tomuto odporu R1.

5.3.3 Sumační zesilovač

Sumační (sčítací) zesilovač je zvláštním případem invertujícího zesilovače.



Obrázek 33: Sumační zesilovač

Rezistory R11...R1n jsou spojeny do jednoho uzlu, který představuje virtuální zem. Přes tuto zem se tyto rezistory nemohou vzájemně "vidět", proto se nemohou vzájemně ovlivňovat. Vstupní odpor každého vstupu je proto opět určen pouze příslušným rezistorem, který je s tímto vstupem spojený.

Vstupní proudy všech rezistorů vtékají do společného uzlu. Protože vstupní proud OZ je nulový, žádný proud do něj neodbočuje. Součet proudů všech rezistorů R11...R1n proto ze společného uzlu může pokračovat jen do rezistoru R2. Na rezistoru R2 se vytvoří napěťový úbytek úměrný součtu proudů $i_1 + i_2 + \dots + i_n$. Tento úbytek je roven výstupnímu napětí zesilovače.

Výstupní napětí sumačního zesilovače je proto rovno

$$u_2 = -(i_1 + i_2 + \dots + i_n) \cdot R_2$$

Proudy vyjádříme pomocí napětí a odporů a upravíme:

$$u_2 = - \left(u_{11} \frac{R_2}{R_{11}} + u_{12} \frac{R_2}{R_{12}} + \dots + u_{1n} \frac{R_2}{R_{1n}} \right)$$

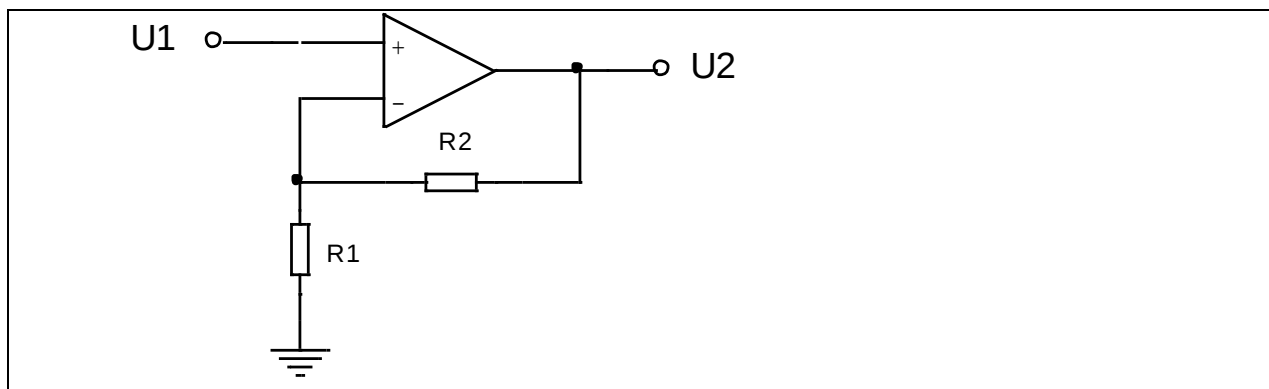
Zesílení n-tého vstupu je

$$A_{un} = - \frac{R_2}{R_{1n}}$$

Každé vstupní napětí je tedy zesilováno tak, jako by mělo pro sebe svůj samostatný invertující zesilovač.

5.3.4 Neinvertující zesilovač

Výstupní napětí neinvertujícího zesilovače má stejnou polaritu jako vstupní napětí. Vstupní napětí se přivádí přímo do neinvertujícího vstupu OZ.



Obrázek 34: Neinvertující zesilovač

a) Zesílení

OZ nastaví nulové napětí mezi svými vstupy. Napětí v uzlu rezistorů R1 a R2 je proto rovno napětí u1 a proto platí:

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

z toho plyne

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

$$A = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Na rozdíl od invertujícího zesilovače tento nemůže zeslabovat, jeho zesílení je rovno nejméně jedné.

V krajním případě, kdy odpor R2 = 0 nebo R1 = ∞, je zesílení jedna a zapojení pracuje jako sledovač napětí. Sledovač se často používá k oddělení a posílení takových zdrojů signálu, které mají velký vnitřní odpor a nesnesou zatížení.

b) Vstupní odpor

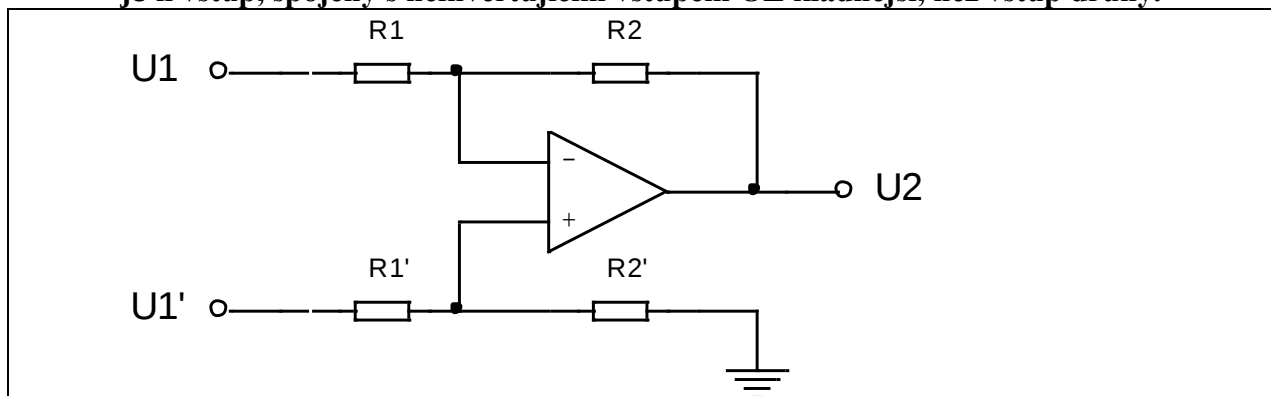
Vstupní odpor je definován jako podíl vstupního napětí a proudu, který je tímto napětím vyvolán.

Napětí mezi vstupy + a - je nulové. Proto i kdyby vstupní odpor Rd OZ nebyl nekonečný, netekl by jím žádný proud. A protože vstup celého zesilovače souvisí s celým zapojením jen přes odpor Rd, ani do tohoto vstupu žádný proud neteče. **Vstupní odpor** jakožto podíl vstupního napětí a vyvolaného proudu se proto blíží nekonečnu.

5.3.5 Rozdílový (diferenciální) zesilovač

Invertující i neinvertující zesilovač mohou zesilovat jen napětí nesymetrická. To jsou taková napětí, jejichž jeden pól je spojený se zemí.

Diferenciální (rozdílový) zesilovač může zesilovat i plovoucí, tj. neuzemněná napětí. Příkladem měření plovoucího napětí je měření napětí tužkové baterky. **Měřené napětí se přes symetrickou odporovou síť přivádí na oba vstupy OZ. Výstupní napětí je kladné, je-li vstup, spojený s neinvertujícím vstupem OZ kladnější, než vstup druhý.**



Obrázek 35: Rozdílový zesilovač

Rozdílový zesilovač reaguje pouze na rozdíl napětí mezi vstupy 1 a 1', nereaguje na napětí, které je oběma vstupům společné (soufázové, souhlasné napětí). Aby to platilo, musí být splněna podmínka

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2'}{R_1'}$$

Proto se obvykle volí $R_2 = R_2'$, $R_1 = R_1'$. Jeden ze čtveřice rezistorů může být doplněn odporovým trimrem, kterým se nastaví přesná symetrie obvodu a tím minimální přenos pro soufázový signál.

Rozdílový zesilovač je vhodný pro zesilování velmi malého napětí, které je superponováno na velkém rušivém signálu.

Např. elektrický projev činnosti srdce, EKG, má velikost řádově milivoltů. Rušivé napětí na těle pacienta, indukované ze sítě, může být jednotky voltů. Rušivé napětí je tedy řádově 1000x větší než užitečné. Rozdílový zesilovač zesílí užitečný signál – EKG, potlačí rušivý signál.

a) Zesílení

Při odvození zesílení můžeme postupovat pro každý vstup zvlášť tak, že druhý vstup uzemníme a v tomto stavu spočítáme zesílení pro zkoumaný vstup.

Uzemníme-li vstup 1', stane se ze zapojení běžný invertující zesilovač, jehož zesílení je

$$A_1 = - \frac{R_2}{R_1}$$

Uzemníme-li vstup 1, dostaneme neinvertující zesilovač. Jeho zesílení je sice o jedničku větší, než u invertujícího zesilovače, napětí do vstupu se mu ale přivádí přes dělič R_1' , R_2' . Vezmeme-li v úvahu, že zesílení je sice o jedničku větší, ale celkový přenos je zmenšen ztrátou v odporovém děliči, dojdeme k závěru, že zesílení A_1' je také dáno pouze poměrem odporů, a to

$$A_1' = \frac{R_2'}{R_1'}$$

Až na znaménko jsou tedy zesílení ze vstupů 1 a 1' shodná. **Zesílení pro rozdílové napětí mezi vstupy 1 a 1' proto je:**

$$A = \frac{R_2}{R_1}$$

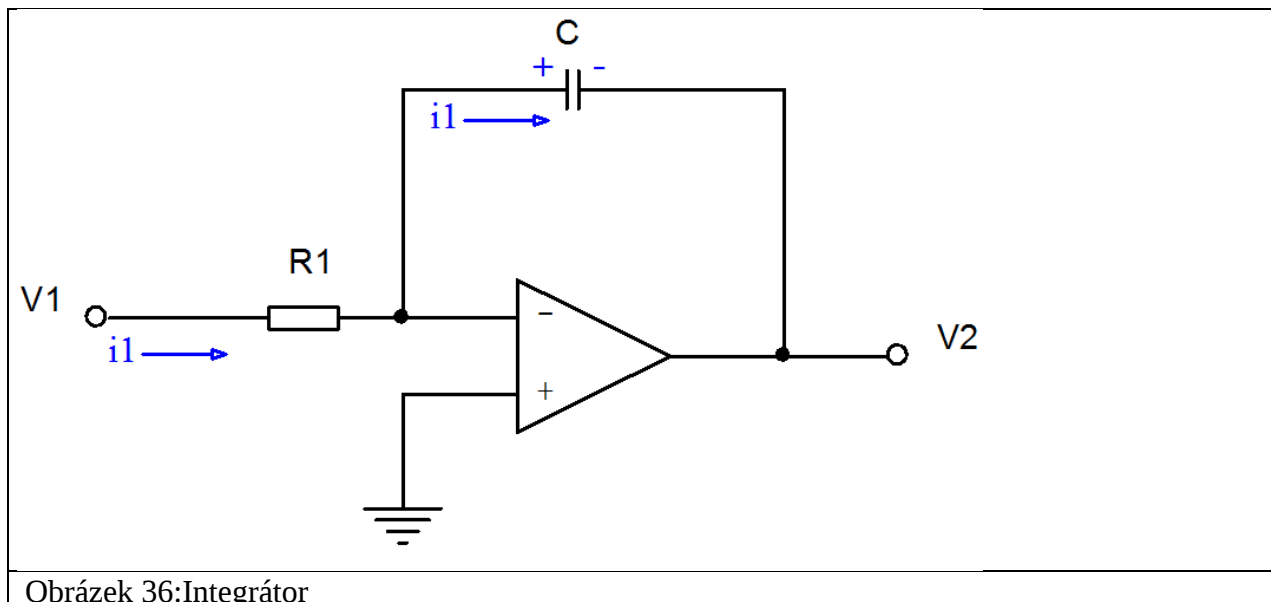
b) Vstupní odpor

Vstupní odpor rozdílového zesilovače můžeme odvodit podobnou úvahou jako u invertujícího. Mezi vstupy + a - je nulové napětí. Při úvaze o vstupním odporu se proto nic nezmění, když si představíme oba tyto vstupy jako spojené. Pak **vstupní odpor** mezi svorkami 1 a 1' je **dán součtem odporů R_1 a R_1'** :

$$R_i = R_1 + R_1' = 2R_1$$

5.3.6 Integrátor

Je rovněž lineární aplikací OZ v tom smyslu, že u něj za normální činnosti nedochází k limitaci výstupu. **Podobá se invertujícímu zesilovači. Vstupní signál se přivádí přes rezistor R_1 do invertujícího vstupu, záporná zpětná vazba je zavedena kondenzátorem. Na invertujícím vstupu je rovněž virtuální zem.**



Obrázek 36: Integrátor

Připojíme-li na vstup napětí u_1 , poteče rezistorem R_1 proud

$$i_1 = \frac{u_1}{R_1},$$

protože pravý konec R_1 je spojený s virtuální zemí. Vstupní proud OZ je nulový, proto celý proud i_1 pokračuje do kondenzátoru C a nabíjí jej. **Bude-li konstantní napětí u_1 připojeno po dobu t , kondenzátor se nabije nábojem**

$$Q = i_1 * t = \frac{u_1}{R_1} * t$$

Napětí na kondenzátoru přitom dosáhne hodnoty

$$u_c = \frac{Q}{C} = \frac{u_1}{R_1 * C} * t$$

Polaritu výstupního napětí určíme podobně jako u invertujícího zesilovače. Je-li u_1 kladné, nabije se C tak, že jeho levý konec bude kladnější než pravý. A protože levý konec je spojený s virtuální nulou, pravý konec C a tedy i u_2 je o hodnotu u_c pod zemí. Proto

$$u_2 = - u_c$$

a výstupní napětí bude

$$u_2 = - u_c = - \frac{u_1}{R_1 * C} * t$$

Vzorec říká, že výstupní napětí u_2

- se snaží mít opačnou polaritu než vstupní napětí u_1 (znaménko mínus)
- se mění tím rychleji, čím je napětí u_1 větší (u_1 je ve zlomku nahoře)
- se mění lineárně, úměrně času, čím déle, tím více ($*t$)
- se mění tím pomaleji, čím jsou R_1 a C větší (R_1 a C jsou ve zlomku dole)

Uvedený příklad platí, pokud napětí u_1 bylo konstantní a před jeho připojením bylo napětí na C nulové. Jinak záleží i na "historii" obvodu, to je na tom, jaké napětí měl kondenzátor na začátku měření. Integrátor tedy má paměť a tím se poněkud podobá sekvenčním obvodům v digitální technice.

Pro integrátor platí tato pravidla:

a. Přivedeme-li na vstup integrátoru kladné konstantní napětí, výstupní napětí se bude lineárně snižovat. Při záporném vstupním napětí se výstupní napětí bude zvyšovat.

b. Změní-li se skokem polarita vstupního napětí, skokem se změní i polarita i_1 . Napětí na kondenzátoru se ale skokem měnit nemůže - skokem se změní pouze směr změny výstupního

napětí. Na obdélníkové vstupní napětí integrátor reaguje trojúhelníkovým výstupním průběhem.

c. Klesne-li vstupní napětí skokem na nulu, klesne na nulu i proud i_1 a proto se napětí na C přestane měnit. Na výstupu zůstane konstantní hodnota napětí z okamžiku, kdy došlo k zániku vstupního napětí.

d. Změní-li vstupní napětí skokem svoji velikost, ale ne polaritu, změní se skokem jen strmost růstu nebo poklesu výstupního napětí.

Uvedená pravidla platí pro zvláštní případ konstantního vstupního napětí, které skokem mění svoji velikost. Pro obecné průběhy platí pro výstupní napětí vztah

$$u_2 = -\frac{1}{R_1 \cdot C} \int u_1 dt$$

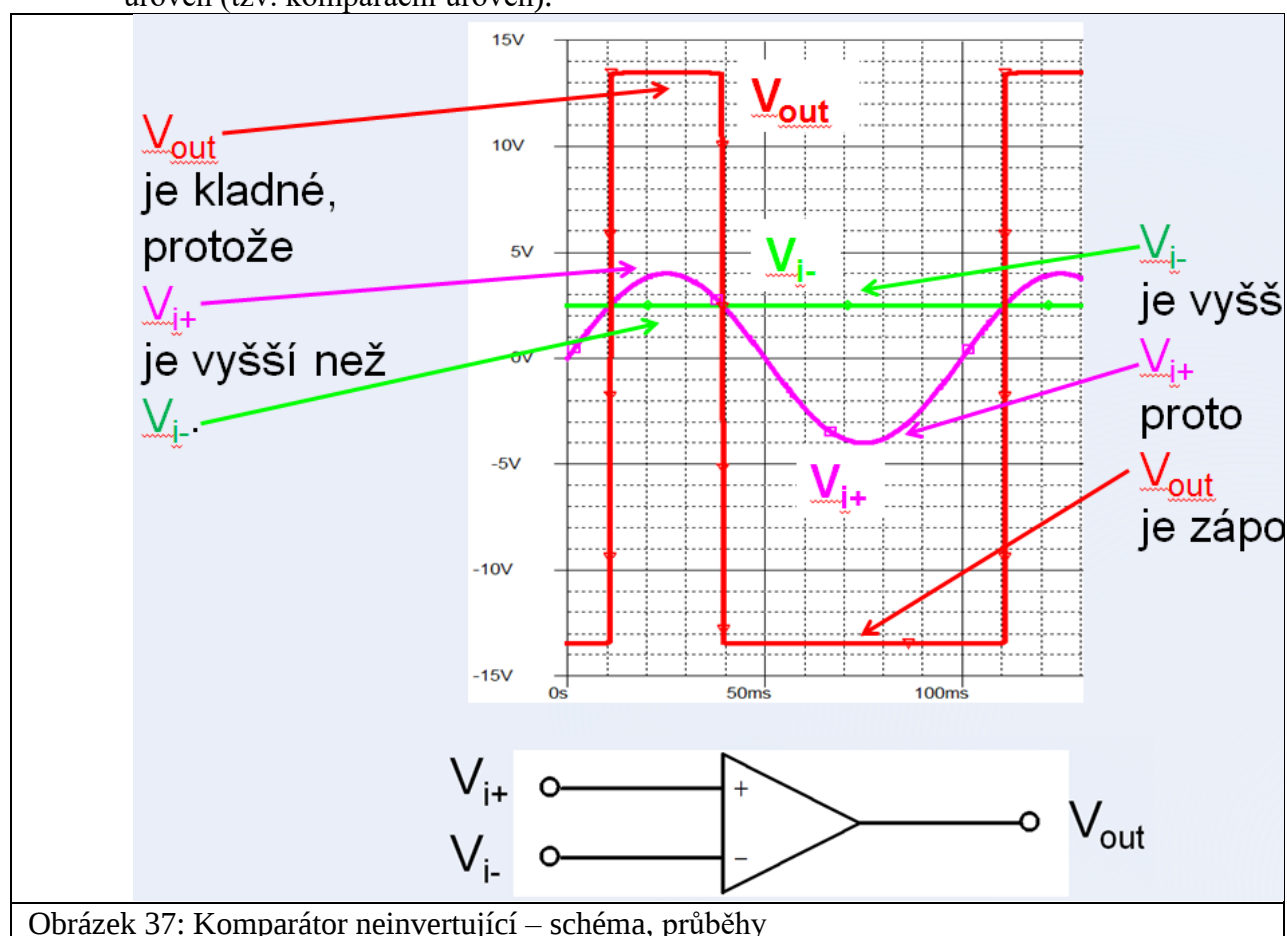
Výstupní napětí se rovná záporně vzatému integrálu vstupního napětí (odtud název "integrátor"). Lze také říci, že integrátor počítá plochu, vymezenou nulovou osou a průběhem vstupního napětí (přičemž plocha pod nulovou osou se bere jako záporná).

5.3.7 Komparátor

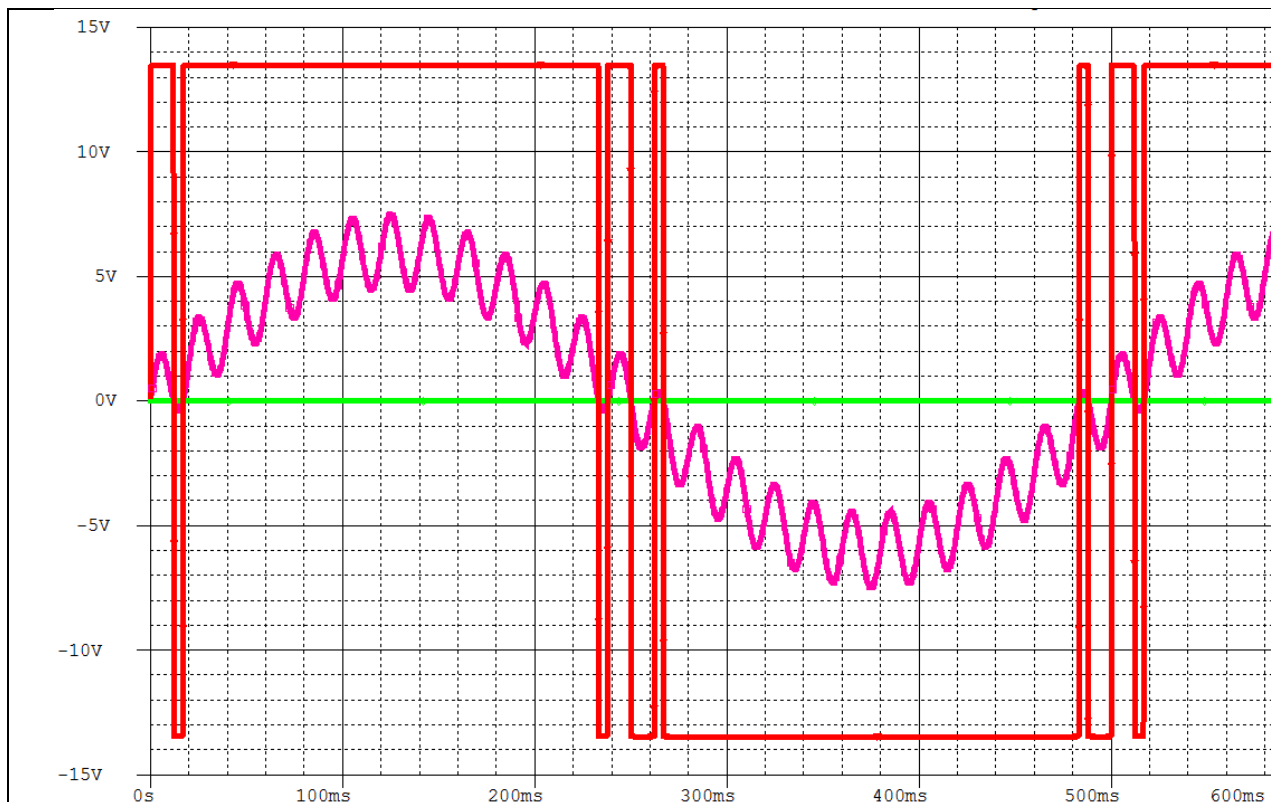
Komparátor je obvod, který **porovnává** vzájemnou **velikost dvou napětí** a podle výsledku porovnání nastaví stav na svém výstupu (komparace = porovnání). **Výstup komparátoru může nabývat pouze dvou stavů**. Použijeme-li ve funkci komparátoru OZ, jsou tyto stavy rovny kladnému a zápornému limitačnímu napětí. Existují i komparátory s logickými úrovněmi na výstupu.

OZ ve funkci komparátoru pracuje v nelineárním režimu: Není zde jednoznačný lineární vztah mezi velikostí vstupního a výstupního napětí.

Komparátor se obvykle používá pro zjištění, zda vstupní proměnný signál překročil nějakou úroveň (tzv. komparační úroveň).

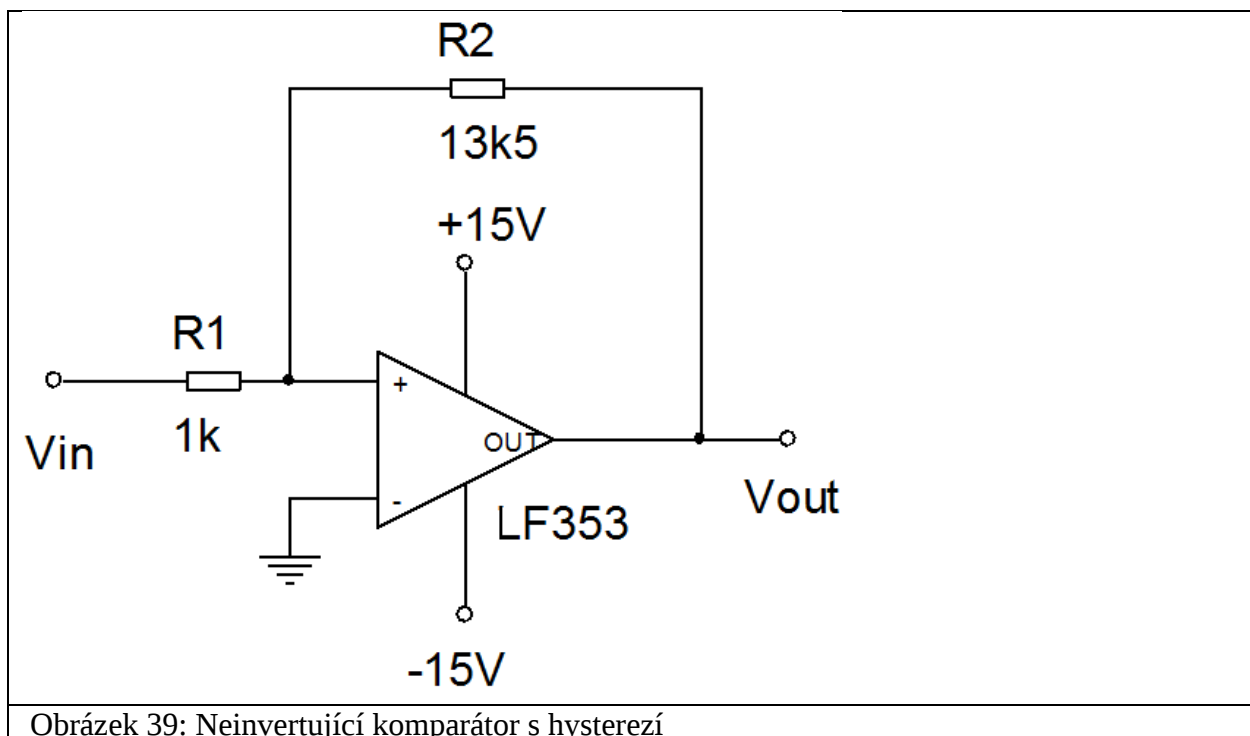


Jsou-li porovnávána napětí velmi blízká a mění se pomalu (např. porovnání teploty s nastavenou mezí), komparátor díky šumu nepřejde z jednoho stavu do druhého okamžitě a trvale, ale před definitivní změnou stavu několikrát zakmitá.

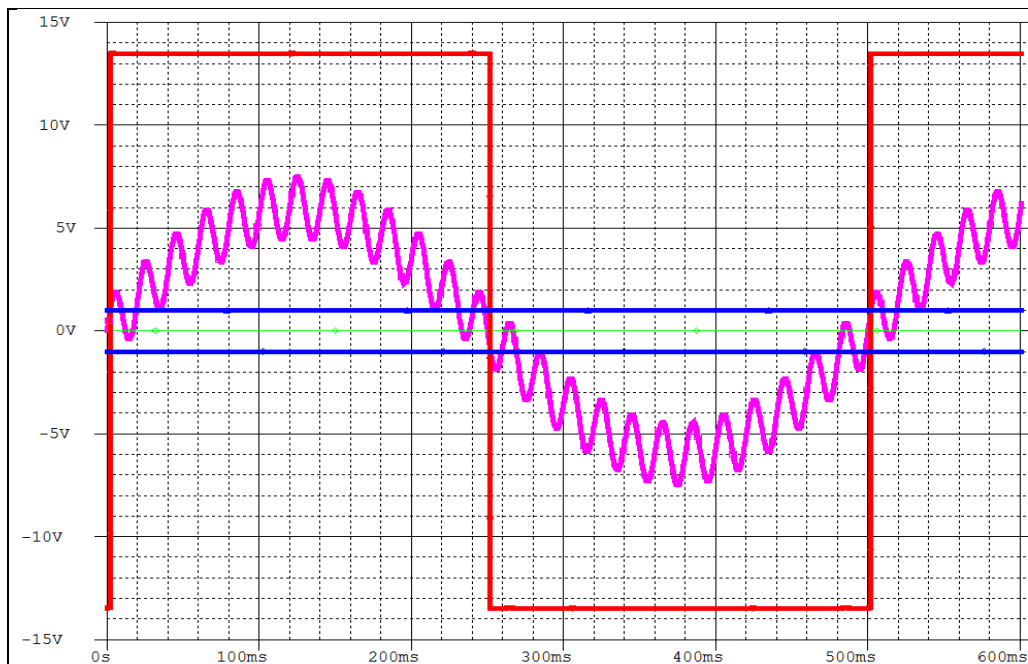


Obrázek 38: Zakmitání komparátoru při pomalých změnách porovnávaných napětí

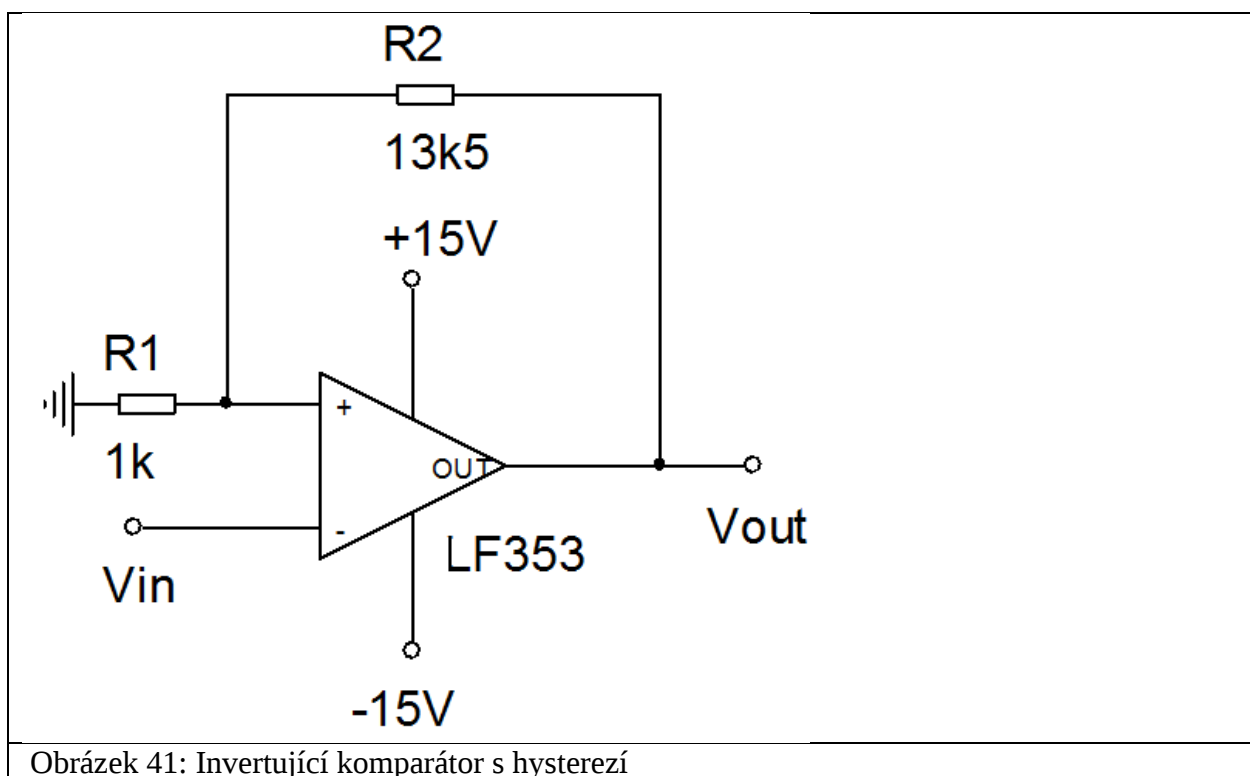
Tento jev je většinou nežádoucí. **Proto se v takových případech komparátor doplňuje kladnou zpětnou vazbou, která způsobí tzv. hysterezi. Komparátor pak má dvě rozhodovací úrovně. Stoupá-li vstupní napětí, překlápí se při vyšší úrovni vstupního napětí. Klesá-li vstupní napětí, překlápí se při nižší úrovni. Hystereze je rozdíl těchto rozhodovacích úrovní.**



Obrázek 39: Neinvertující komparátor s hysterezí



Obrázek 40: Průběhy na vstupech a výstupu neinvertujícího komparátoru s hysterezí.
Fialová křivka – vstupní napětí. Horní a dolní modrá čára – horní a dolní rozhodovací úroveň.
Červené obdélníky – výstupní napětí.



Obrázek 41: Invertující komparátor s hysterezí

V invertujícím zapojení s nulovým referenčním napětím je horní rozhodovací úroveň o hodnotu

$$\Delta U = U_o \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

větší než referenční napětí. Dolní rozhodovací úroveň je o tutéž hodnotu menší. Hystereze tedy je

$$U_H = 2 U_o \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

V neinvertujícím zapojení je hystereze

$$U_H = 2 U_o \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

R2

Vzhledem k tomu, že obvykle bývá $R_2 \gg R_1$, je rozdíl mezi vzorci (1) a (2) nevýznamný.

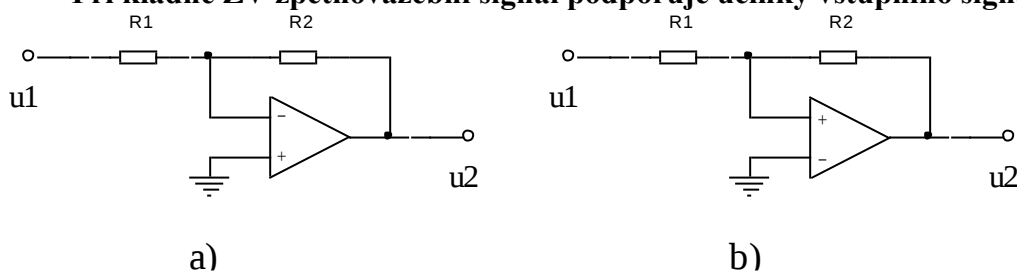
5.4 Zpětná vazba

Zpětná vazba (ZV) přivádí část signálu z výstupu zesilovače zpět na jeho vstup.

5.4.1 Druhy zpětné vazby

Při záporné ZV zpětnovazební signál z výstupu, přivedený zpět na vstup, působí proti účinkům vstupního signálu.

Při kladné ZV zpětnovazební signál podporuje účinky vstupního signálu.



Obrázek 42: a) zesilovač se zápornou ZV, b) komparátor s kladnou ZV

Např. u invertujícího zesilovače (Obrázek 42a) má výstupní napětí opačnou polaritu než vstupní. Účinek zpětnovazebního signálu na vstup (přes rezistor R_2) je opačný, než účinek vstupního signálu (přes rezistor R_1). ZV zde zmenšuje účinky vstupního signálu, zmenšuje zesílení, proto se nazývá záporná.

Obrázek 42b ukazuje neinvertující komparátor s hystezí. Výstupní napětí má stejnou polaritu jako vstupní. Proto zpětnovazební signál působí na vstup přes rezistor R_2 ve stejném smyslu, jako vstupní signál přes rezistor R_1 . ZV zde zvětšuje účinky vstupního signálu, proto se nazývá kladná.

Záporná ZV se používá u zesilovačů pro nastavení přesného zesílení. Kladná ZV se používá u komparátorů pro zavedení hystereze a u oscilátorů pro jejich rozkmitání.

5.4.2 Účinky záporné ZV

Záporná zpětná vazba (ZV) obvykle zlepšuje a stabilizuje vlastnosti zesilovače. Probereme vlastnosti zesilovače s napěťovou ZV, tj. ZV odvozenou od výstupního napětí.

Parametry zesilovače se ZV se násobí nebo dělí poměrem

$$\frac{A}{A_{OZ}}$$

kde A je zesílení celého zesilovače se ZV, A_{OZ} je zesílení samotného OZ bez ZV.

a) Výstupní odpor

Výstupní odpor zesilovače s napěťovou ZV se zmenšuje podle vzorce

$$R_o = \frac{A}{A_{OZ}}$$

Je-li $A_{OZ} \gg A$, blíží se výstupní odpor zesilovače k nule.

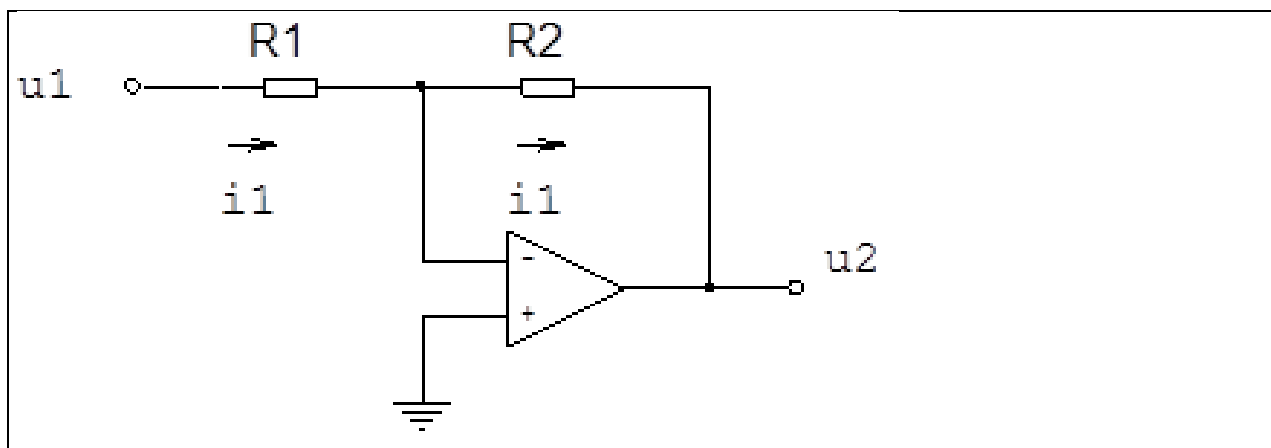
b) Vstupní odpor

Je-li zpětnovazební napětí přivedeno paralelně k vnitřnímu odporu R_{iOZ} , vstupní odpor zesilovače se zmenší. Je-li přivedeno v sérii s R_{iOZ} , vstupní odpor zesilovače se zvětší.

U invertujícího zesilovače působí zpětnovazební napětí, které se přivádí do uzlu R_1R_2 , přesně opačně, než vstupní napětí. ZV zde působí v opačné fázi než vstupní napětí. Proto v uzlu

$R_1 R_2$ vzniká bod s nulovou impedancí, tzv. virtuální zem. Vstupní odpor zesilovače je dán vzorcem

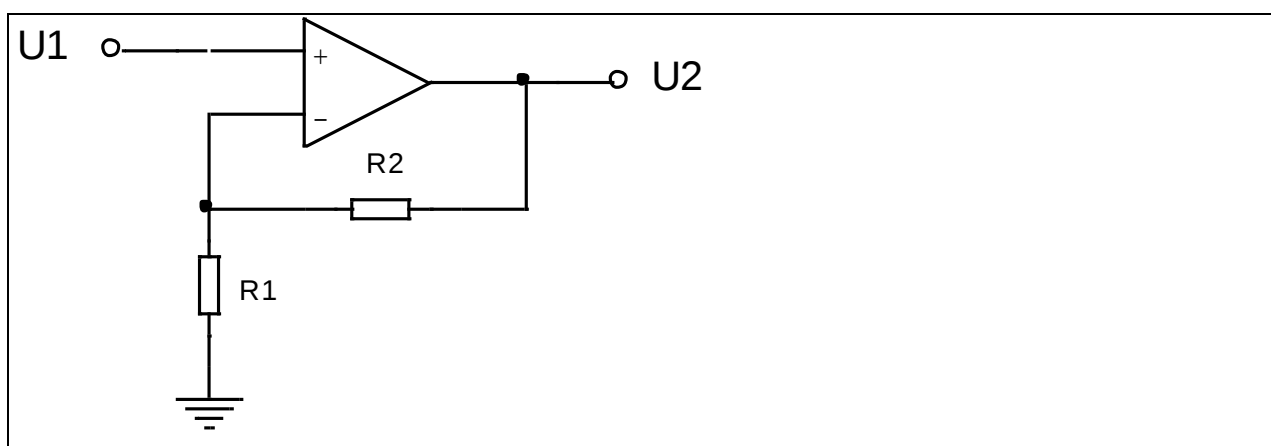
$$R_i = R_1$$



Obrázek 43: Invertující zesilovač

U neinvertujícího zesilovače je zpětnovazební napětí, které vzniká na rezistoru R_1 , v sérii s napětím na vnitřním odporu R_{iOZ} . Vnitřní odpor R_{iOZ} je jakoby podložen zpětnovazebním napětím. Proto R_{iOZ} oběma svými konci přesně sleduje vstupní napětí a vůbec je nezatěžuje. Proto vstupní odpor neinvertujícího zesilovače se blíží k nekonečnu a je dán vzorcem

$$R_i = R_{iOZ} * \frac{A_{OZ}}{A}$$



Obrázek 44: Nenvertující zesilovač

c) Šum

Šumové napětí U_{OS} , které bylo na výstupu zesilovače bez ZV, se zavedením záporné ZV zmenšuje podle vzorce:

$$U_{OSZV} = U_{OS} * \frac{A}{A_{OZ}}$$

d) Zkreslení

Zkreslení k zesilovače bez ZV se zavedením ZV zmenšuje na hodnotu

$$k_{ZV} = k * \frac{A}{A_{OZ}}$$

5.5 Stabilita (operačních) zesilovačů

Při studiu této kapitoly se budou velmi hodit znalosti z kapitol „6.1.1 Dolní propust“ a „8.1 Podmínky ne/stability“.

Budeme zde důsledně rozlišovat pojmy

- operační zesilovač – součástka
- zesilovač – zařízení postavené s využitím operačního zesilovače jako součástky

Podmínky pro rozkmitání oscilátoru, a tedy i pro rozkmitání zesilovače jsou

$$\beta \cdot A_{OZ} \geq 1 \quad (1)$$

$$\varphi_{\beta} + \varphi_{OZ} = 0^{\circ} \quad (360^{\circ}, 720^{\circ}, \dots) \quad (2)$$

Pokud není zavedena žádná zpětná vazba, zesilovač se nemůže rozkmitat, protože

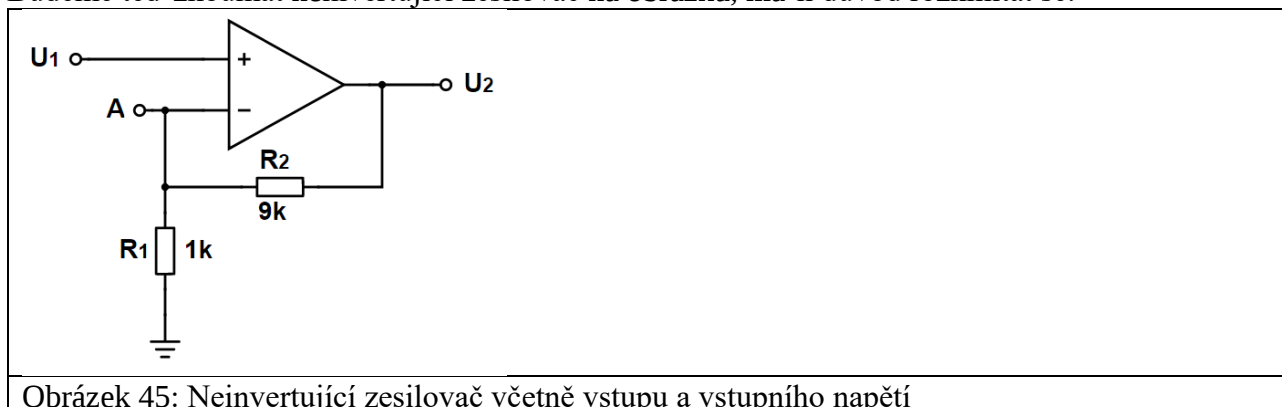
$$\beta = 0$$

a proto i

$$\beta \cdot A_{OZ} = 0$$

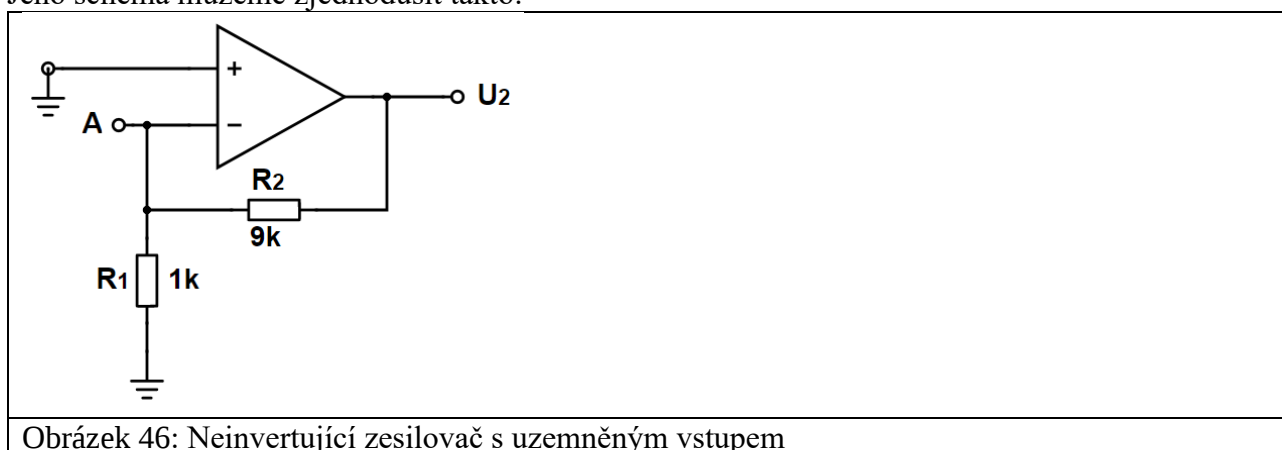
a není tedy splněna podmínka (1).

Budeme teď zkoumat neinvertující zesilovač na obrázku, má-li důvod rozkmitat se.



Obrázek 45: Neinvertující zesilovač včetně vstupu a vstupního napětí

Kdyby se tento zesilovač měl stát oscilátorem, nepotřeboval by žádné vstupní napětí, žádný vstup. Jeho schéma můžeme zjednodušit takto:



Obrázek 46: Neinvertující zesilovač s uzemněným vstupem

Zpětná vazba je přes rezistory R_2 a R_1 přivedena do invertujícího vstupu, proto je záporná a zavádí fázový posun 180° :

$$\varphi_{\beta} = 180^{\circ}$$

Zesilovač je neinvertující, proto

$$\varphi_{OZ} = 0^\circ$$

Celkový fázový posun je tedy

$$\varphi_\beta + \varphi_{OZ} = 180^\circ + 0^\circ = 180^\circ$$

Není to tedy ani 0° , ani 360° , a není proto splněna podmínka (2). Zesilovač nemá důvod kmitat.

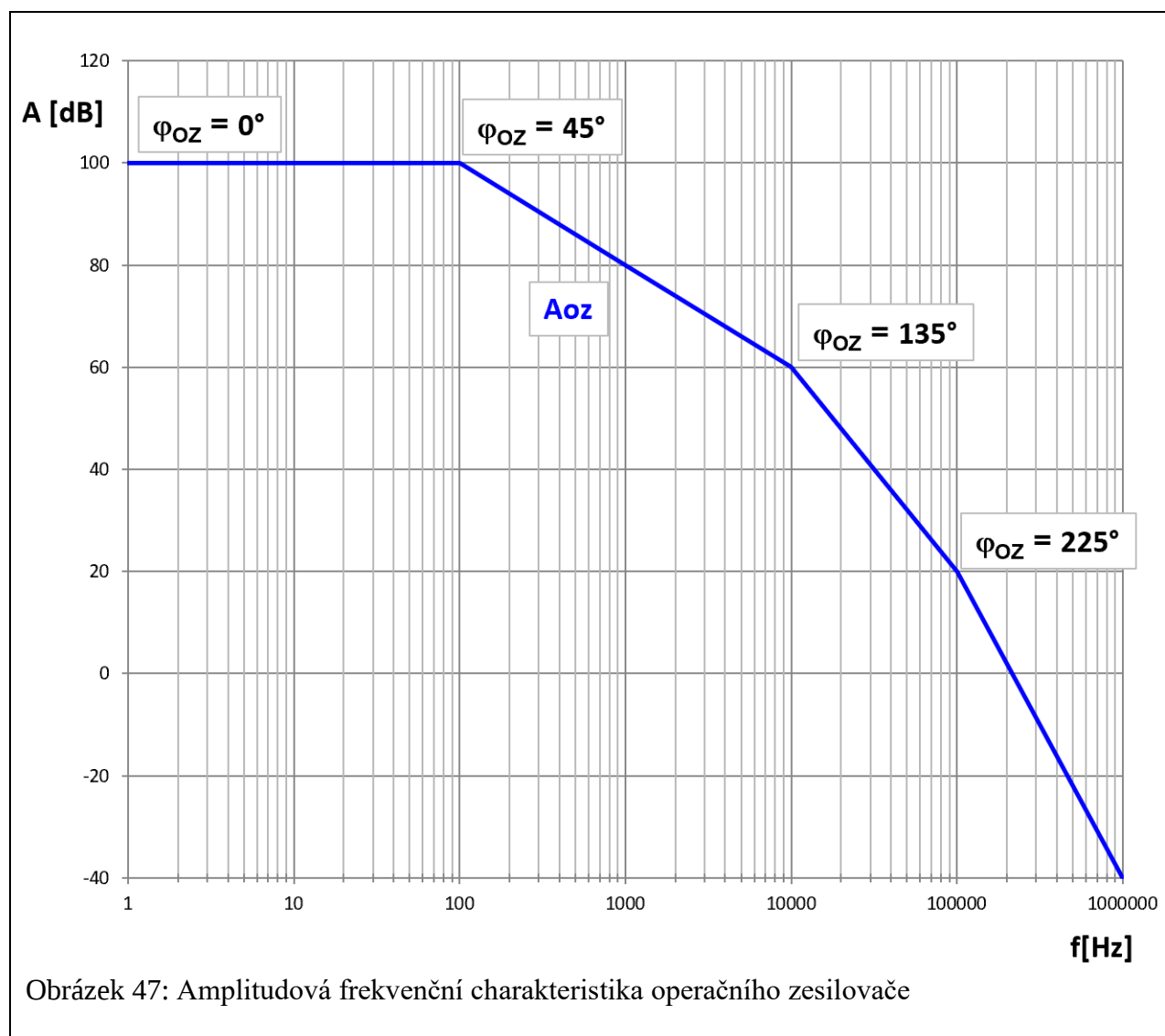
Bohužel ale fázový posun neinvertujícího zesilovače není vždy $\varphi_{OZ} = 0^\circ$. Operační zesilovač obsahuje parazitní kapacity, které na vyšších kmitočtech způsobí jednak zmenšení zesílení, jednak fázový posun.

Zmenšení zesílení způsobená jednotlivými parazitními kapacitami se na amplitudové frekvenční charakteristice projeví zlomy (Obrázek 47). Za každým dalším zlomem charakteristika padá o dalších **20 dB/dek** prudčeji.

Změny fáze způsobené parazitními kapacitami se sčítají a celkový fázový posun φ_{OZ} je tedy jejich součtem.

První parazitní kapacita v prvním zlomu přidá fázový posun 45° , který se směrem k dalšímu zlomu zvýší až na téměř 90° . Druhá parazitní kapacita ve druhém zlomu přidá fázový posun dalších 45° , takže tam už máme celkem 135° . Někde mezi druhým a třetím zlomem tedy už bude fázový posun zesilovače 180° . A to je kritická hodnota, při které se zesilovač může rozkmitat.

Příklad takové charakteristiky (Obrázek 47):



Shrnutí:

Při malých kmitočtech je fázový posun operačního zesilovače φ_{OZ} téměř nulový, zanedbatelný. Na prvním zlomu kmitočtové charakteristiky už je ale fázový posun $\varphi_A = 45^\circ$ a s rostoucím kmitočtem se rychle zvětšuje až na 90° . Na dalším zlomu už je

$$\varphi_{OZ} = 90^\circ + 45^\circ = 135^\circ$$

a mezi druhým a třetím zlomem už dosáhne φ_A hodnoty

$$\varphi_{OZ} = 180^\circ$$

Při tomto kmitočtu je tedy splněna podmínka (2), protože

$$\varphi_\beta + \varphi_{OZ} = 180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$$

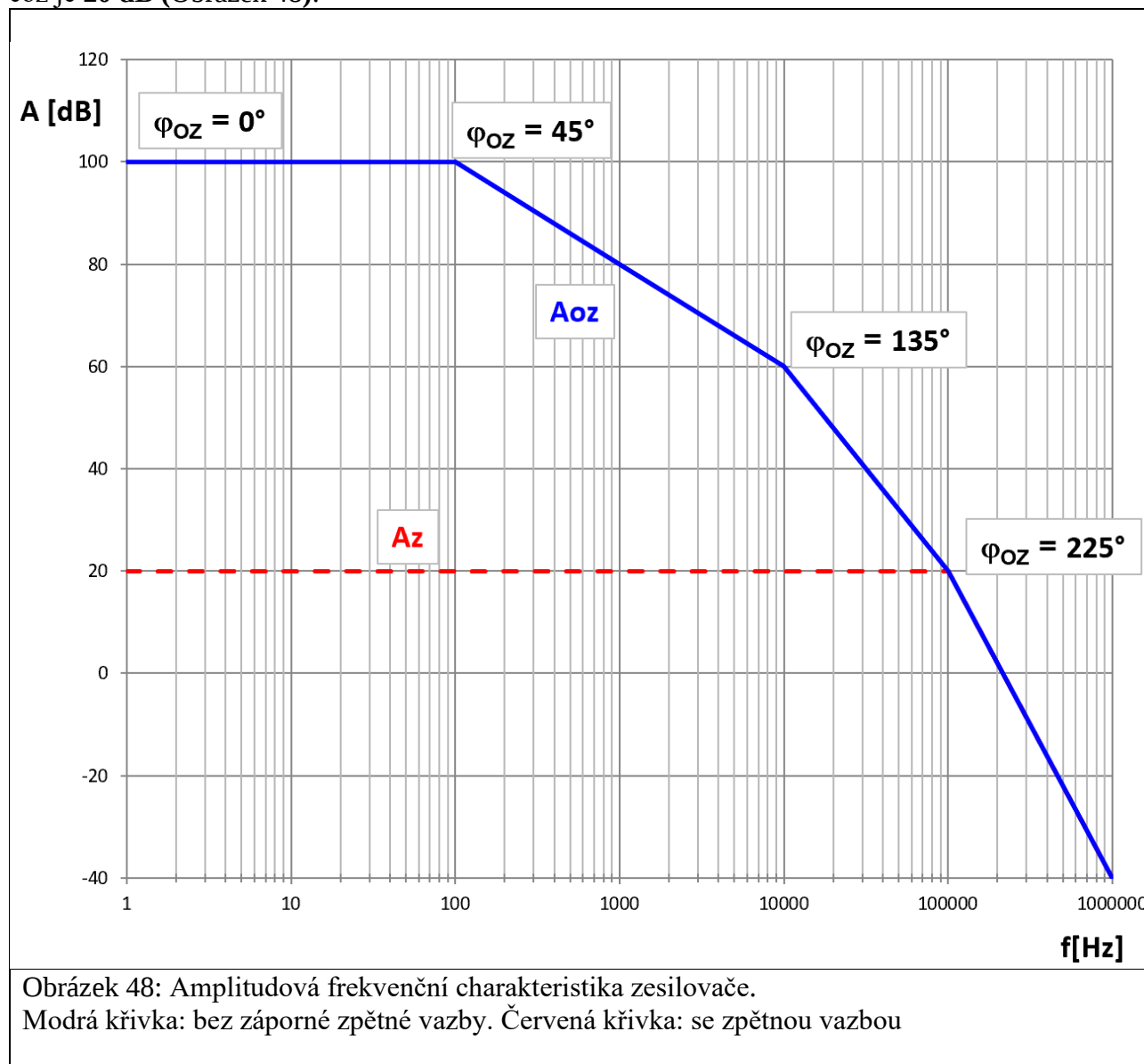
Pokud je zároveň splněna i podmínka (1), zesilovač se stane oscilátorem a rozkmitá se na tom kmitočtu, při kterém $\varphi_{OZ} = 180^\circ$.

Z dosavadních poznatků můžeme vyvodit: Zesilovač bez zpětné vazby se nerozkmitá, se zpětnou vazbou se může rozkmitat. Se slabou zpětnou vazbou (velké zesílení) je nebezpečí rozkmitání menší, se silnou zpětnou vazbou (malé zesílení) je nebezpečí rozkmitání větší.

Přikreslíme do kmitočtové charakteristiky operačního zesilovače výsledné zesílení zesilovače A_Z , určené zpětnou vazbou. S danými rezistory R_2 a R_1 je přenos zpětné vazby $1/10$, takže zesílení

$$A_Z = \frac{1}{\beta} = 10$$

což je **20 dB** (Obrázek 48):



Co náš neinvertující zesilovač udělá hned po zapnutí?

Proběhne si všechny kmitočty a zkontroluje, zda na některém z nich není splněna fázová podmínka pro rozkmitání. Zjistí, že to je na kmitočtu přibližně 30 000 Hz, kde je

$$\varphi_{OZ} = 180^\circ$$

$$\varphi_\beta + \varphi_{OZ} = 180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$$

Dále zkontroluje, zda na tomto kmitočtu není splněna také amplitudová podmínka. Zjistí, že ano, protože tam

$$\beta * A_{OZ} = 1/10 * 100 = 10 > 1$$

Z charakteristiky totiž vidíme, že zesílení operačního zesilovače A_{OZ} je na tomto kmitočtu asi 40 dB, což je 100x.

V tom bodu, kde se křivky A_Z a A_{OZ} protínají, je

$$A_Z = A_{OZ}$$

Protože zesílení zesilovače A_Z je dáno zpětnou vazbou takto:

$$A_Z = \frac{1}{\beta}$$

platí v tomto bodu, že

$$\beta * A_{OZ} = 1$$

Nalevo od tohoto bodu dokonce platí

$$\beta * A_{OZ} > 1$$

Aby se zesilovač nemohl rozkmitat, musíme zajistit, že k protnutí křivek A_Z a A_{OZ} dojde dříve, než se fázový posun A_{OZ} přiblíží ke 180° .

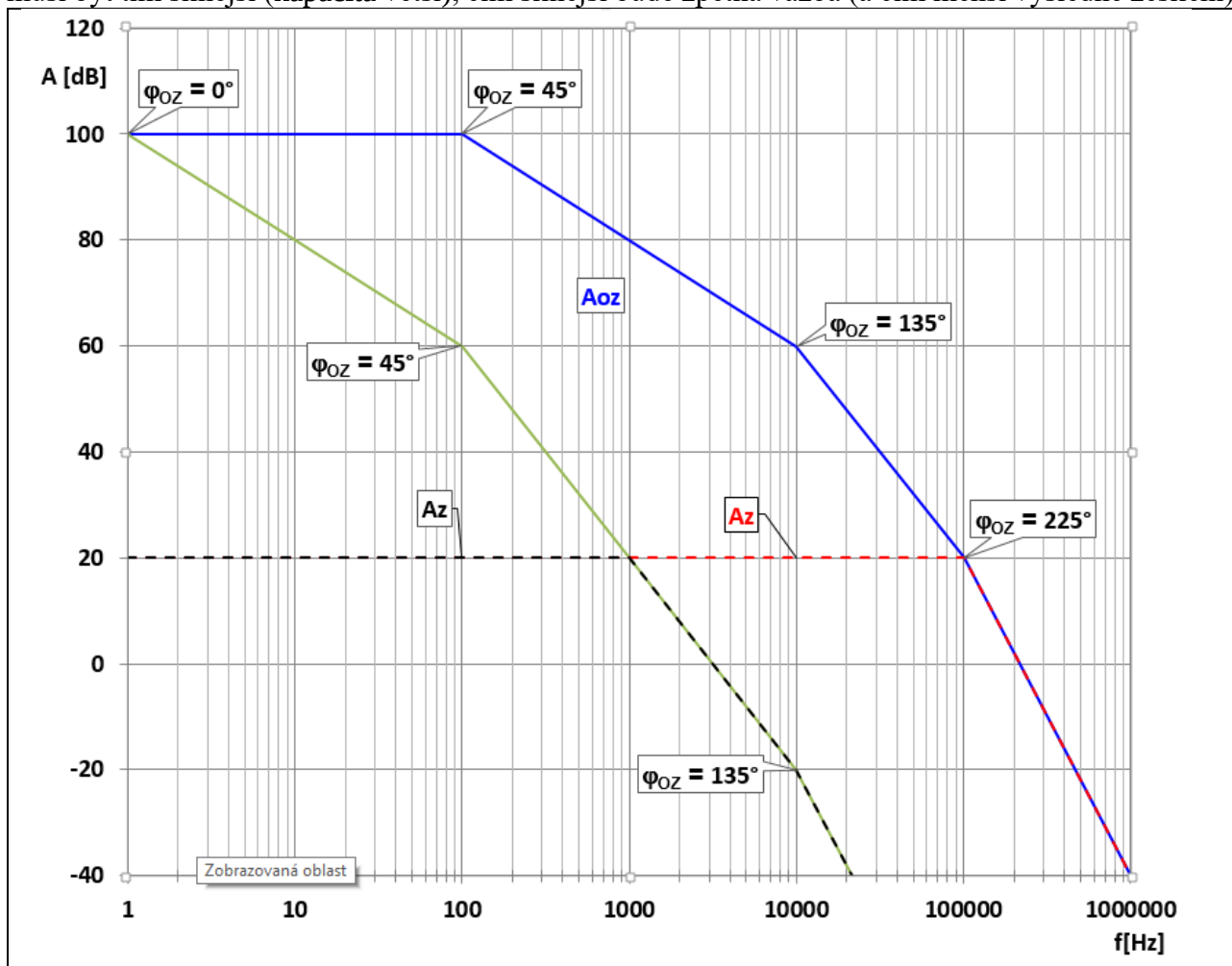
Které proměnné při tom můžeme ovlivnit?

Nemůžeme dosáhnout toho, aby operační zesilovač při žádném kmitočtu neměl fázový posun 180° .

Nemůžeme změnit činitel zpětné vazby β , protože jím je dáno výsledné zesílení A_Z .

Můžeme ale omezit zesílení operačního zesilovače A_{OZ} tak, že k protnutí křivek A_Z a A_{OZ} dojde dříve, než se fázový posun A_{OZ} přiblíží ke 180° .

Uděláme to pomocí tzv. kmitočtové kompenzace. Do zesilovacího řetězce operačního zesilovače zařadíme kapacitu, která omezí jeho zesílení na vyšších kmitočtech. Tato kompenzace musí být tím silnější (kapacita větší), čím silnější bude zpětná vazba (a čím menší výsledné zesílení).



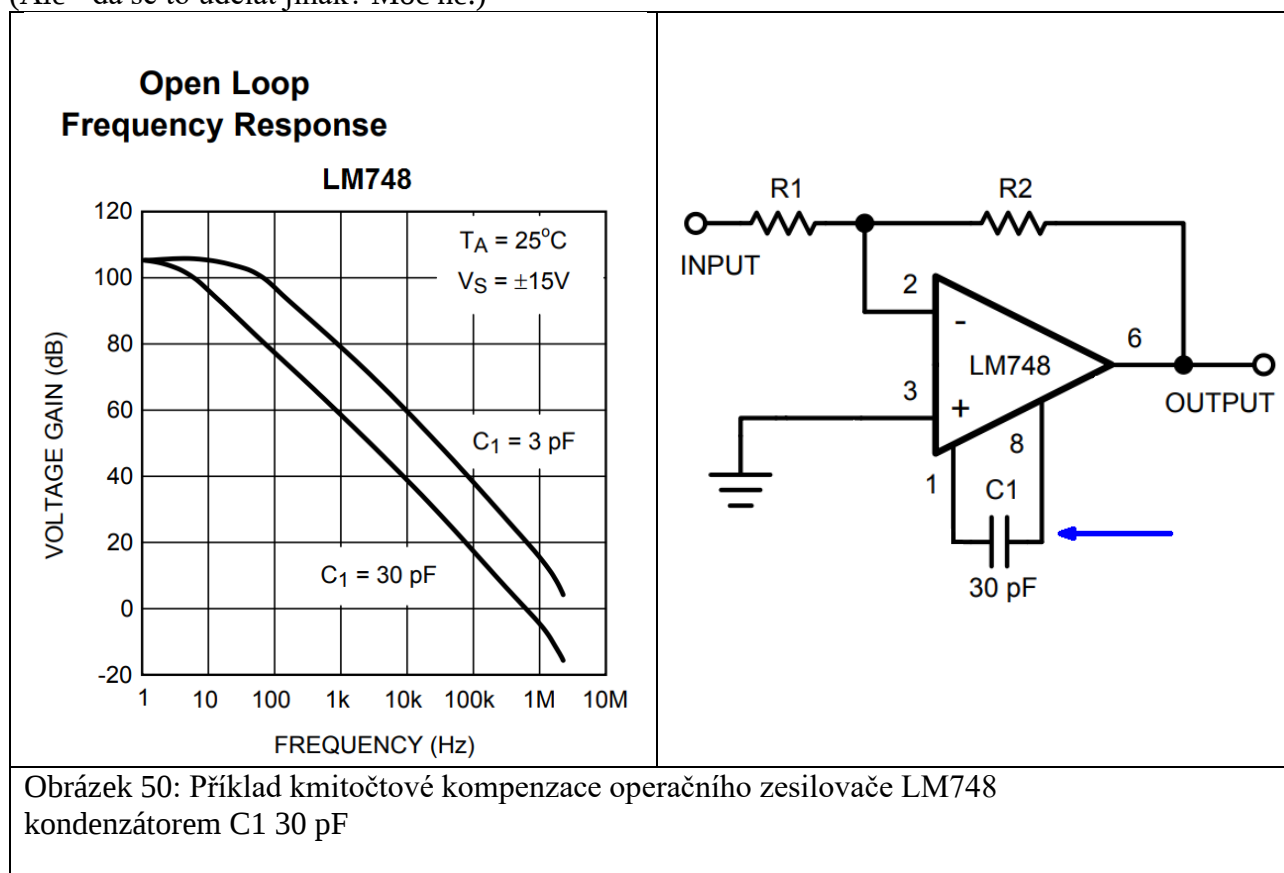
Obrázek 49: Amplitudová frekvenční charakteristika zesilovače.

Modrá křivka: zesílení operačního zesilovače bez kmitočtové kompenzace.

Zelená křivka: zesílení operačního zesilovače s kmitočtovou kompenzací.

Čárkované křivky: výsledné zesílení zesilovače – černá s kompenzací, červená bez kompenzace.

Nevýhodou kmitočtové kompenzace je omezení kmitočtového rozsahu operačního zesilovače. (Ale - dá se to udělat jinak? Moc ne.)



5.6 Výkonové zesilovače

Výkonový zesilovač je předposledním článkem nf řetězce. Musí vybudit dostatečným výkonem a bez zkreslení reproduktor.

5.6.1 Parametry

- Výkon
- Zkreslení
- Účinnost

ad a. Výkon

Pro běžný poslech v místnosti stačí malý výkon desítky mW. Aby však bylo možno dosáhnout velké dynamiky poslechu, musí mít zesilovač dostatečnou výkonovou rezervu. Jinak by zvuky impulsního charakteru (např. údery bubnů) byly zkreslené.

ad b. Zkreslení

U tranzistorového výkonového zesilovače vzniká především

- zkreslení přebuzením: Od zesilovače žádáme víc, než může dodat, dochází k omezení výstupního signálu.
- přechodové zkreslení: Zkreslení malých signálů. Viz dále zesilovač třídy B, klidový proud.

ad c. Účinnost

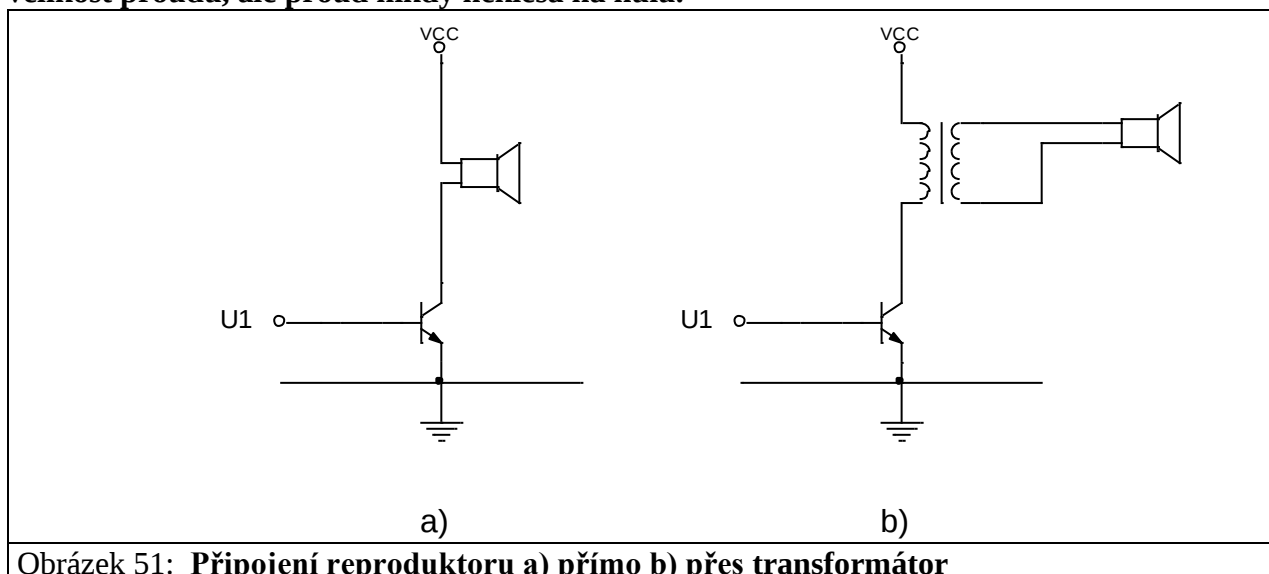
Má-li zesilovač dodat desítky nebo stovky wattů, musí mít dobrou účinnost. Nejen kvůli úsporám energie, ale také proto, že malá účinnost (tj. velké ztráty) přináší problémy s chlazením a vyvolává nutnost objemných a těžkých napájecích zdrojů.

5.6.2 Třídy výkonových zesilovačů

Výkonové zesilovače mohou být zapojeny ve třídě A, B, C nebo D.

a) Třída A

Ve třídě A teče aktivním prvkem (tranzistorem) proud nepřetržitě. Mění se sice velikost proudu, ale proud nikdy neklesá na nulu.



Obrázek 51: Připojení reproduktoru a) přímo b) přes transformátor

Výstupní odpor tranzistoru je velký, odpor reproduktoru je malý.

Proto v zapojení podle obr. a) nejsou obvody vzájemně přizpůsobeny, **nelze dosáhnout velkého výkonu**. Cívkou reproduktoru prochází **stejnoseměrný proud**, který trvale vychyluje membránu jedním směrem a tím zmenšuje dosažitelný rozkmit signálu.

V zapojení podle obr. b) jsou odpory tranzistoru a reproduktoru **vzájemně přizpůsobeny transformátorem**. Reproductorem neteče ss proud.

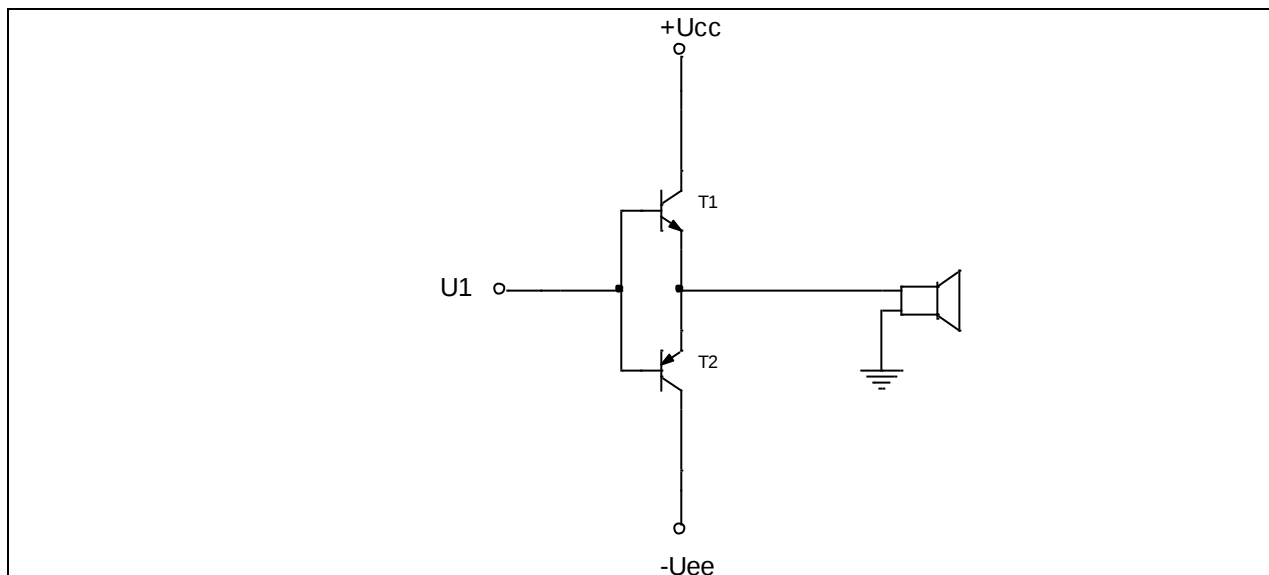
Maximální účinnost zesilovače ve třídě A je pouze 50%. Dosahuje se jí jen při plném vybuzení. Při menším vybuzení se účinnost zhoršuje, protože odběr ze zdroje je konstantní (kolektorem teče stále stejný ss proud), zatímco výkon do zátěže klesá.

Nejhorší je, že zesilovač **odebírá stále stejný proud, i když skoro nehraje**.

Transformátor je rozměrný, drahý a těžký prvek. Z uvedených důvodů se výkonový zesilovač ve třídě A téměř nepoužívá.

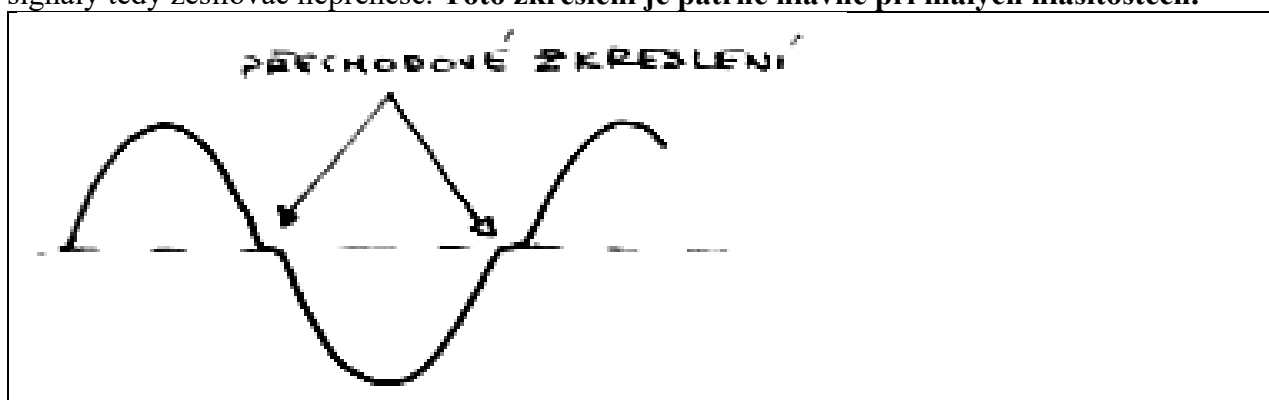
b) Třída B

Ve třídě B teče jedním aktivním prvkem proud jen v jedné polovině periody, ve druhé polovině teče druhým aktivním prvkem. Dva tranzistory se tedy v předávání výkonu do zátěže **střídají**. Zatímco jeden vede, druhý nevede. Proto se také tomuto zapojení říká dvojčinné.



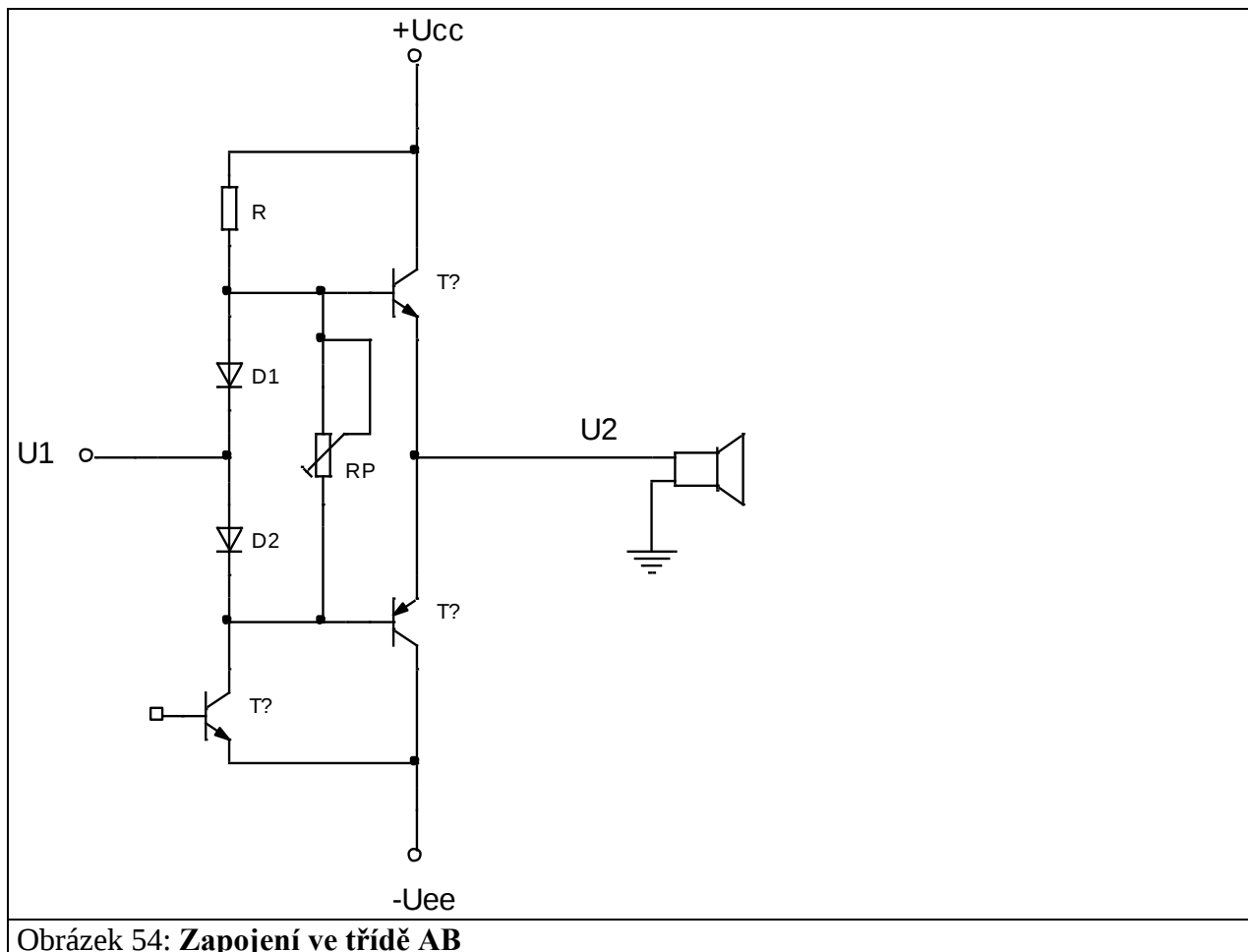
Obrázek 52: Zapojení ve třídě B

V zapojení podle obrázku je opravdu vždy jeden z tranzistorů zavřený. Pro dosažení velké účinnosti by to bylo výhodné, ale vzniká přitom tzv. **přechodové zkreslení**. Aby se horní tranzistor otevřel, musí jeho báze být o 0.7V kladnější než emitor. U dolního musí být báze o 0.7V zápornější. To znamená, že **na signály v rozmezí $\pm 0.7V$ nereaguje žádný z tranzistorů**. Tyto signály tedy zesilovač nepřenese. **Toto zkreslení je patrné hlavně při malých hlasitostech.**



Obrázek 53: Přechodové zkreslení

Aby tranzistory reagovaly i na nejmenší signály, je nutné trochu je pootevřít, tj. **dát jejich bázím předpětí 0.7V** ($0.7 + 0.7 = 1.4$ celkem). Díky tomuto předpětí teče **koncovými tranzistory malý klidový proud**. Už tedy neplatí doslova "jeden vede, druhý nevede". Dalo by se říci, že **malé signály jsou zesilovány ve třídě A, velké ve třídě B** (při velkém signálu se druhý z tranzistorů opravdu uzavírá). **Proto se tato třída často nazývá AB.**



Obrázek 54: Zapojení ve třídě AB

Průchodem kolektorového proudu tranzistoru T1 vzniká na trimru RP úbytek napětí, který pootevřítá koncové tranzistory. **Trimr nastavíme tak, aby koncovými tranzistory tekla klidový proud jednotky až desítky mA** (podle druhu tranzistorů a velikosti zesilovače).

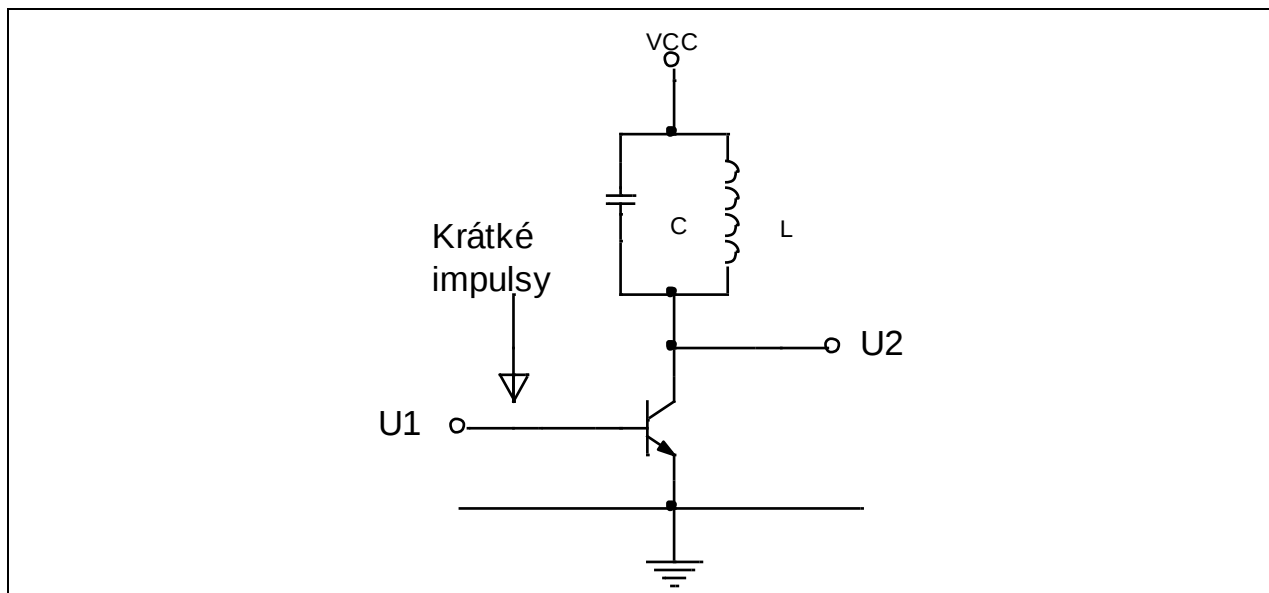
Pracovní bod nastavený jen trimrem by byl velmi labilní, byl by závislý hlavně na teplotě. Při zvýšení teploty se totiž zmenšuje prahové napětí přechodů báze – emitor tranzistorů. Tranzistory si proto vezmou více klidového proudu, tím se dále zahřejí a děj pokračuje velmi rychle: tranzistory se mohou zničit během několika vteřin.

Zapojení je nutno doplnit zápornou zpětnou vazbou pro stabilizaci pracovního bodu. Tuto zpětnou vazbu mohou tvořit např. diody D1, D2, které se připevní na stejný chladič jako koncové tranzistory. Při zvýšení teploty se zmenší úbytek napětí na diodách a tím se zmenší předpětí pro tranzistory. Podobně může být použit i termistor, jehož odpor s teplotou klesá.

Maximální dosažitelná účinnost ve třídě B je asi 78%, tedy podstatně lepší než ve třídě A. Hlavně ale **odebíraný výkon je přibližně úměrný užitečnému výkonu,** dodávanému do reproduktoru. Při nulové hlasitosti má zesilovač téměř nulový odběr, odebírá pouze klidový proud.

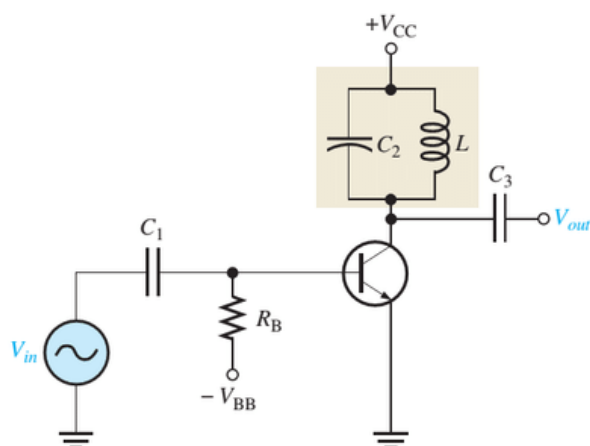
c) Třída C

Ve třídě C teče aktivním prvkem proud jen v malé části jedné púlperiody. Užívá se např. ve výkonových vf zesilovačích.

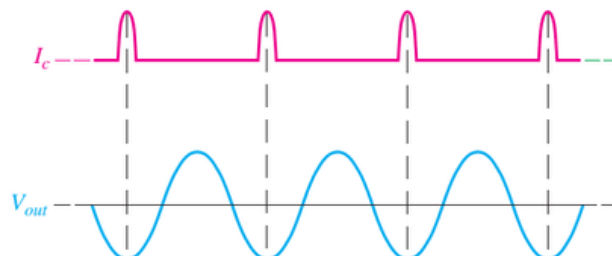


Obrázek 55: Zapojení ve třídě C

Rezonanční obvod dostává od tranzistoru jen krátké impulsy, které svou setrvačností doplní na sinusový průběh. Rezonanční obvod zde funguje podobně jako setrvačnick u spalovacích motorů: Motor sice dostává jen krátké impulsy v okamžicích výbuchů ve válcích, ale díky setrvačnicku se přesto točí plynule.



(a) Basic circuit

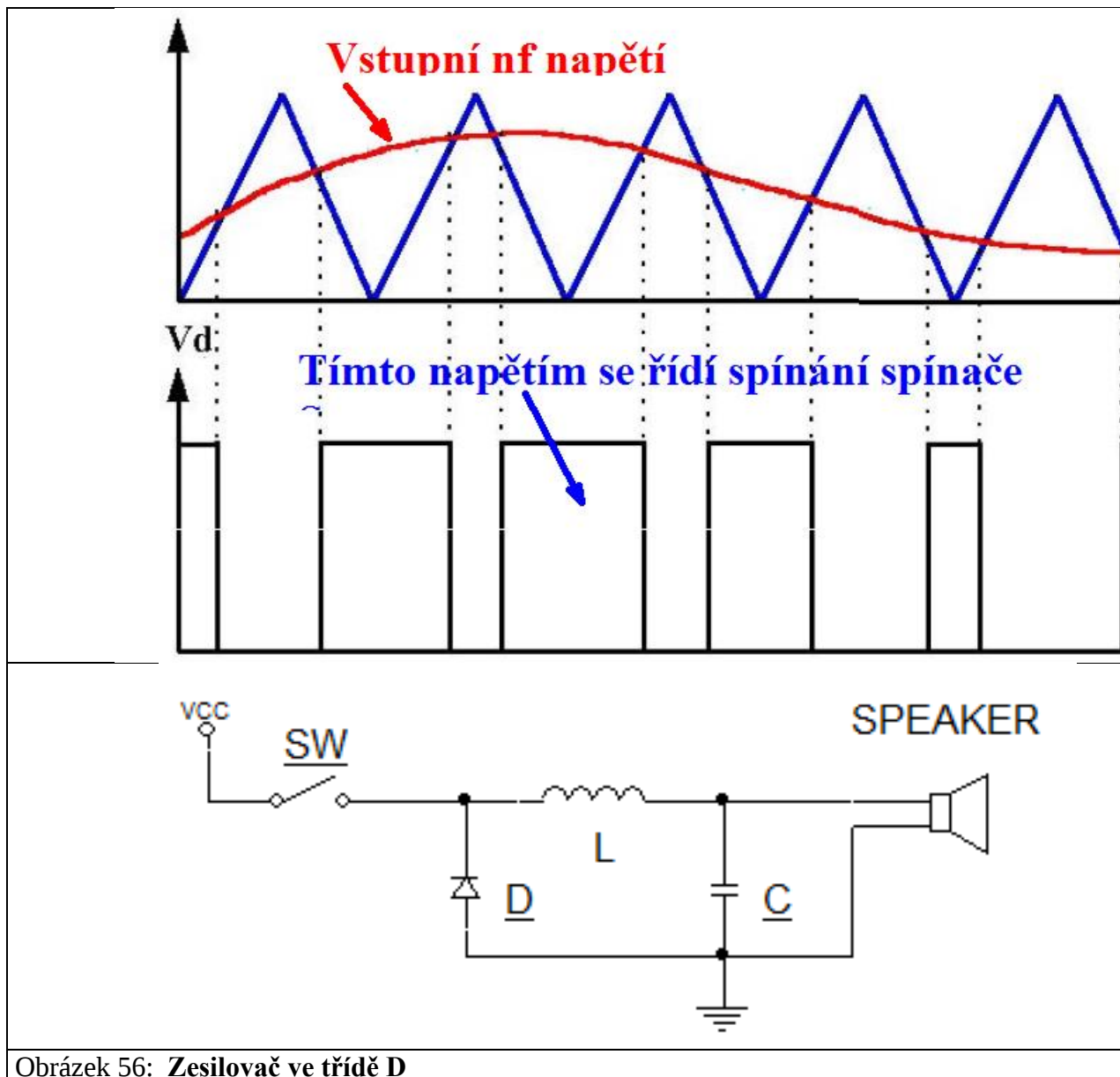


(b) Output waveforms

V nf zařízeních se třída C nepoužívá.

d) Třída D

Ve třídě **D** je aktivní prvek použit jako **spínač**: Buď je zcela sepnutý, vede a má nulový odpor, nebo je zcela rozepnutý, nevede, má nekonečný odpor. **Takový provoz** zapnuto - vypnuto umožňuje dosáhnout nejmenších ztrát a největší účinnosti. Na tranzistoru je teoreticky **nulový výkon** - buď má nulový proud (rozepnuto), nebo nulové napětí (sepnuto).



Obrázek 56: Zesilovač ve třídě D

Spínač SW (obvykle tranzistor FET) je spínán šířkově modulovaným signálem o kmitočtu desítek kHz, tedy neslyšitelném. Tlumivka a kondenzátor signál vyhladí tak, že na reproduktor se dostane jen střední hodnota signálu, která je úměrná okamžité hodnotě nf signálu.

Poznámka: Zapojení je silně zjednodušené: Např. zde není vyřešen problém s průchodem ss proudu reproduktorem.

Otázka: K čemu je ta dioda? (Odpověď hledejte v nauce o spínaných zdrojích.)

5.6.3 Ochrana proti přetížení

Tranzistory koncového stupně i reproduktor je nutno chránit před přetížením.

Ochrana koncových tranzistorů

Tranzistory lze poškodit

- a) napětím
- b) proudem
- c) výkonem

ad a.

Dosažitelný výkon zesilovače závisí i na napájecím napětí. Proto se používá pokud možno velké napájecí napětí. Koncové tranzistory musí být na toto napětí dimenzovány. Při návrhu je nutno počítat s tím, že napětí nestabilizovaného zdroje bez zátěže a při zvýšeném napětí sítě je

podstatně větší, než při zatížení. V integrovaných zesilovačích se používají zvláštní struktury na ochranu obvodů před přepětím.

ad b.

Koncové tranzistory se mohou poškodit proudem, který vznikne při impulsním přetížení nebo při zkratu. Na jejich ochranu se používají obvody pro omezení výstupního proudu. Viz dále: Konkrétní zapojení zesilovače.

ad c.

Proti poškození výkonem musí být koncové tranzistory chráněny dostatečným dimenzováním a chlazením.

Ochrana reproduktorů

Reproduktor se může poškodit

- a) výkonem
- b) stejnosměrným proudem

ad a.

Reproduktory musí být dimenzovány na větší výkon, než je výstupní výkon zesilovače. Elektronická ochrana je možná, ale není běžná.

ad b.

Při poruše zesilovače (např. průraz vazebního kondenzátoru) se na reproduktor může dostat velké ss napětí, které jej spolehlivě spálí. Ochranné obvody detekují ss složku napětí na reproduktoru a v případě nebezpečí reproduktor odpojí pomocí relé. Je-li takový obvod spřažen i se síťovým vypínačem, připojí reproduktor až po ustálení přechodných jevů po zapnutí zesilovače a odpojí jej ihned po vypnutí napájení. Tím se odstraní rázy v reproduktoru, které jinak doprovázejí zapnutí a vypnutí zesilovače.

5.6.4 Dosažitelný výkon

Maximální dosažitelný výkon zesilovače je dán

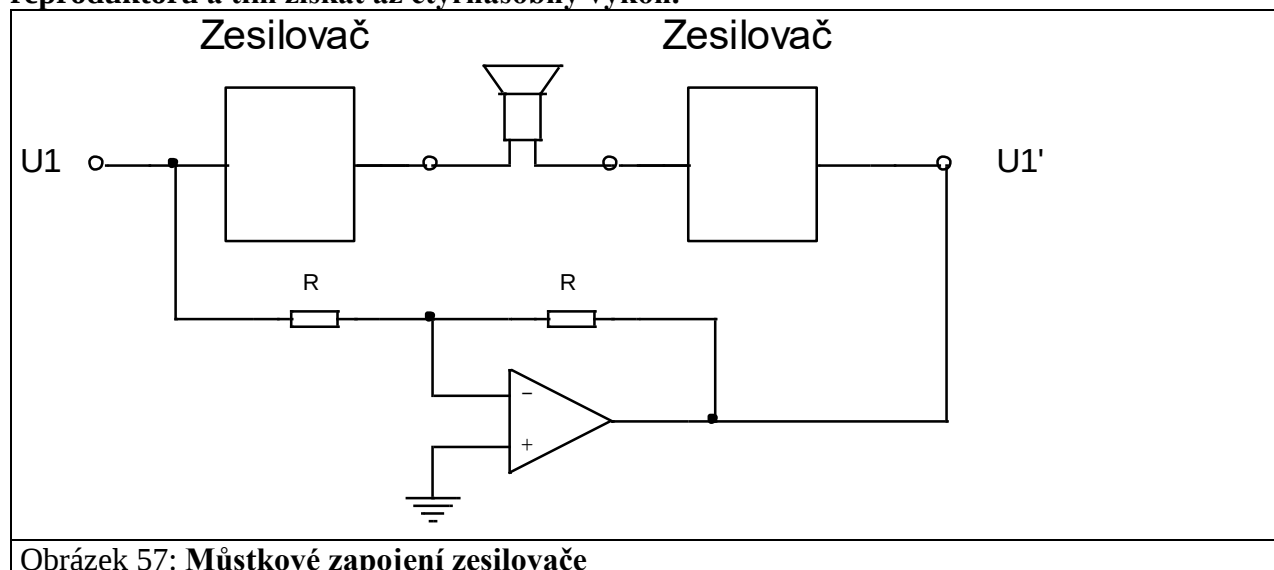
$$P_{max} = \frac{U^2}{R}$$

To znamená, že maximální výkon je určen

- a) napájecím napětím
- b) odporem reproduktoru

ad a.

Čím větší napájecí napětí, tím větší proud a tedy i výkon je možno vnutit do reproduktoru. Proto např. v autě při napájecím napětí 12V je dosažení velkého výkonu obtížné. Proto se zde používá tzv. můstkové zapojení, které umožní zdvojnásobit rozkmit napětí na reproduktoru a tím získat až čtyřnásobný výkon.



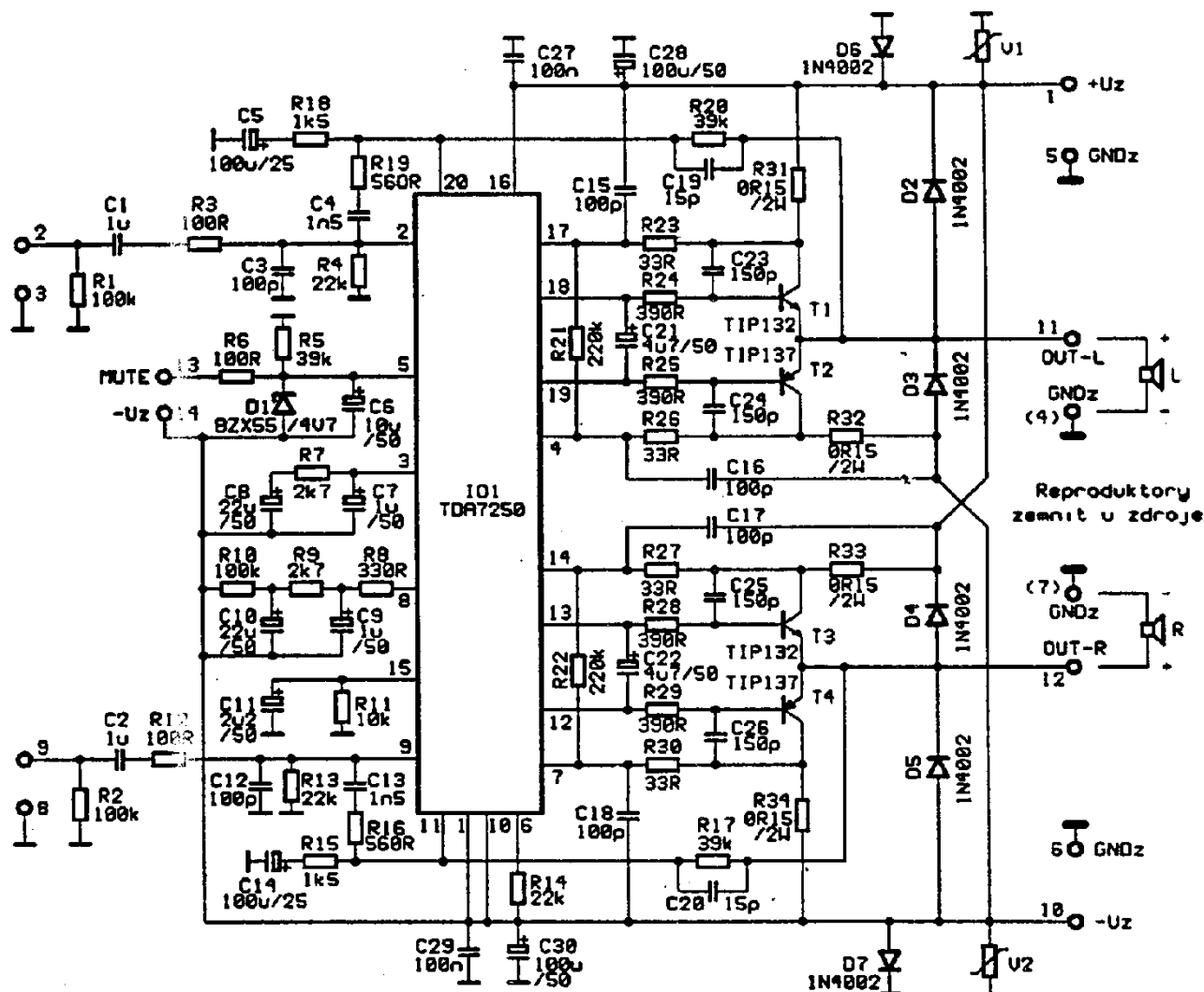
Obrázek 57: Můstkové zapojení zesilovače

ad b.

Při stejném napájecím napětí je výkon nepřímě úměrný odporu zátěže. Proto u zesilovačů vidáme dva údaje max. výkonu: větší pro 4Ω , menší pro 8Ω .

5.6.5 Příklad zapojení

Schéma zapojení KSD7251



5.7 Vysokofrekvenční zesilovače

5.7.1 Širokopásmové zesilovače

Širokopásmový je takový zesilovač, který zesiluje široké pásmo kmitočtů, např. 6 MHz. Jiné zesilovače zesilují jen pásmo úzké, např. nízkofrekvenční zesilovače asi 20 kHz, mezifrekvenční zesilovače jednotky až stovky kHz.

Širokopásmové zesilovače se používají např. v osciloskopech pro zesilování signálu, který se má zobrazit na obrazovce. Jednoduché „amatérské“ osciloskopy zobrazují, a tedy zesilují signály do kmitočtů jednotek MHz, drahé profesionální osciloskopy stovky MHz i více. Osciloskopy musí být schopné zobrazit i stejnosměrná napětí, proto jejich zesilovače musí přenášet i stejnosměrný signál, tedy signál s kmitočtem 0 Hz. Jejich kmitočtový rozsah musí začínat od 0 Hz.

Horní mezní kmitočet širokopásmového zesilovače je obvykle dán parazitními kapacitami, které uvnitř součástek i mezi nimi svádějí vysoké kmitočty do země a vytvářejí pro ně zpětné vazby.

Parazitní záporná zpětná vazba zmenšuje horní mezní kmitočet, kladná zpětná vazba může způsobit rozkmitání zesilovače.

Proto je nutno používat speciální součástky, např. vysokofrekvenční tranzistory. Při konstrukci je nutno dbát na minimální délky spojů, správné rozložení součástí, stínění. Nejlépe vyhovují součástky SMD, protože mají minimální rozměry, krátké přívody. Jejich parazitní kapacity jsou proto nejmenší.

5.7.2 Úzkopásmové zesilovače

Podrobnosti hledej na

<http://bernkopf.cz/skola/>

odkaz Předměty – Elektronika – Materiály – Prezentace – Vysokofrekvenční zesilovače.

6. Filtry

Elektronické filtry jsou obvody, které mají propouštět nebo potlačovat určitou část kmitočtového pásma signálu. Např. filtr typu dolní propust propouští nízké kmitočty, zatímco vysoké kmitočty zadrží.

Filtry skládáme z rezistorů, kondenzátorů a cívek. Podle toho pak mluvíme o filtrech RC, RL nebo LC. V dalším textu se budeme zabývat především filtry RC.

Pasivní filtry nemají zesilovač, mají jen pasivní součástky. Přenos pasivních filtrů RC může být nejvýše 1, tj. signál na výstupu může být nanejvýš tak velký, jak velký je signál na vstupu. Většinou je ale signál na výstupu menší, tj. pasivní filtry RC signál zeslabují.

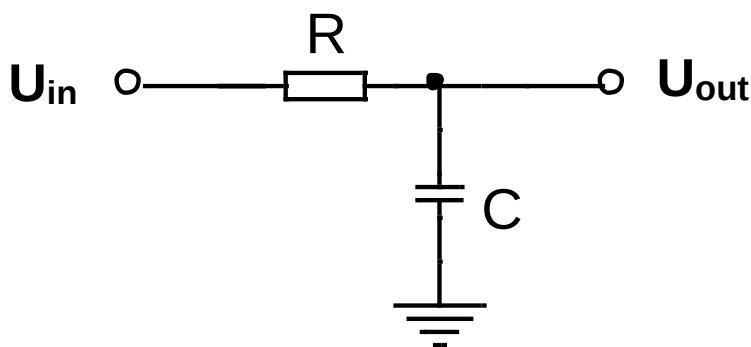
Aktivní filtry obsahují zesilovač, proto jejich přenos může být i vyšší než jedna, tj. signál na výstupu může být větší než na vstupu.

6.1 Pasivní filtry

6.1.1 Dolní propust

Dolní propust je obvod, který propouští signály nízkých kmitočtů, ale potlačuje signály s kmitočty vyššími, než je mezní kmitočet.

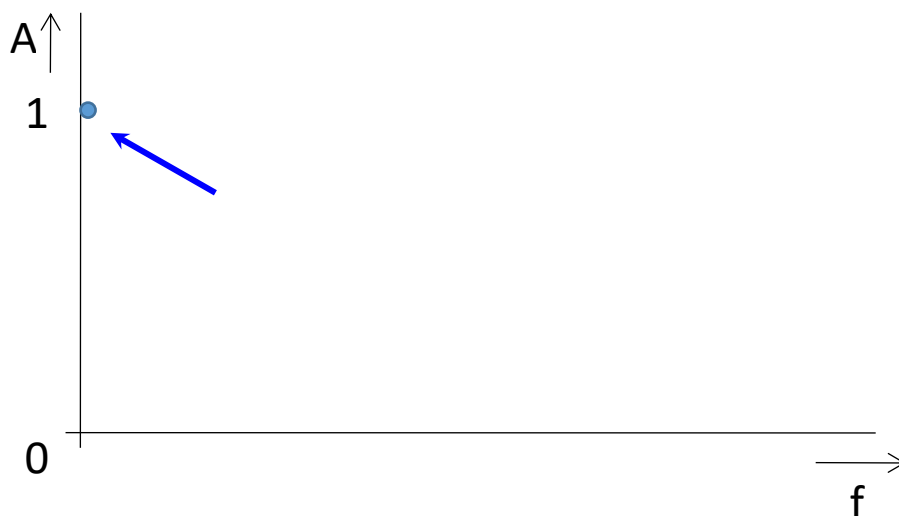
Nejjednodušší dolní propust složíme z jednoho rezistoru a jednoho kondenzátoru:



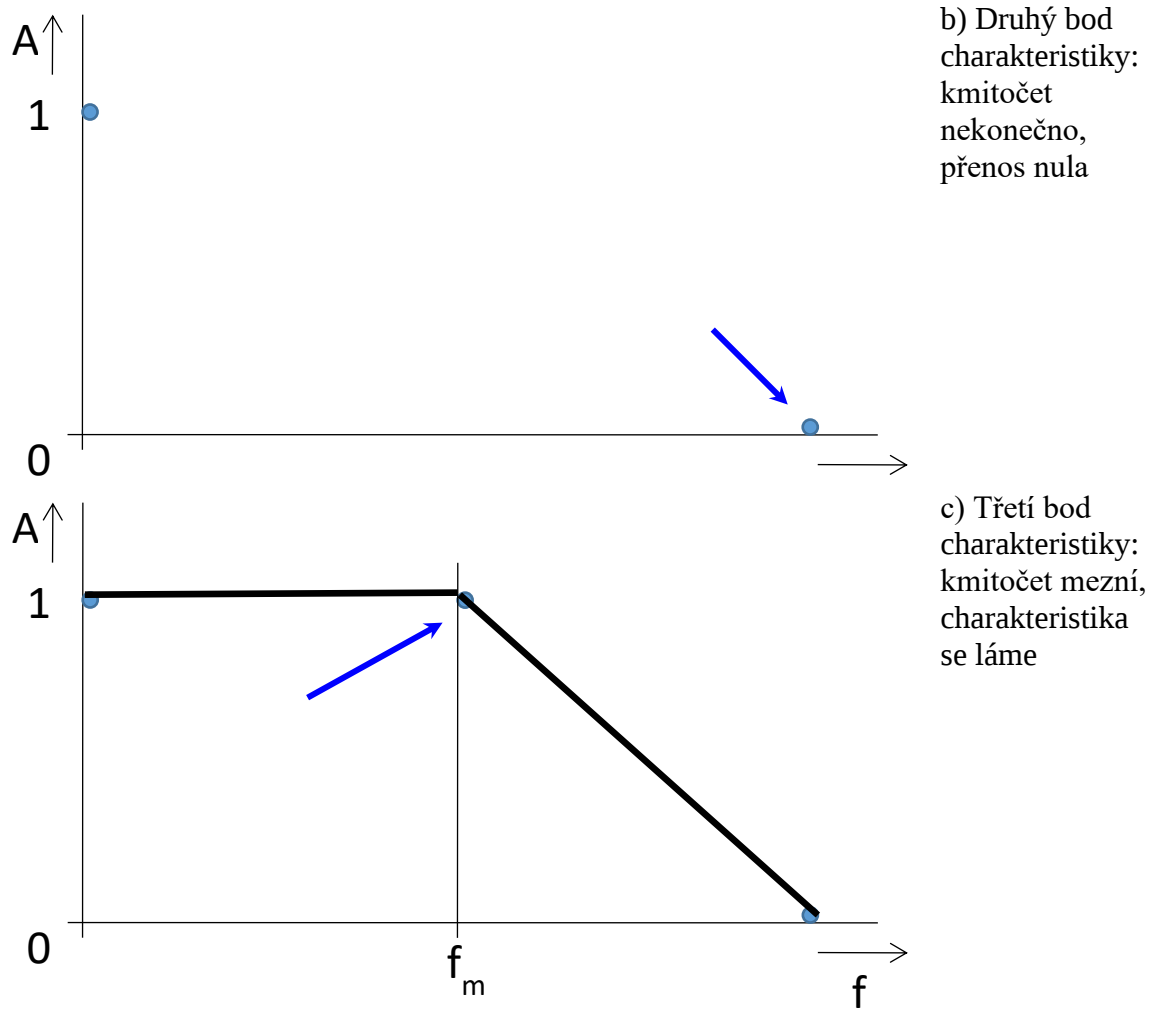
Obrázek 58: Dolní propust – integrační článek

Kmitočtovou charakteristiku, tj. závislost přenosu A_u na kmitočtu, vymyslíme takto:

Přiložme na vstup napětí u_1 , které bude mít tak malý kmitočet, že se bude měnit nekonečně pomalu, tj. nebude se měnit vůbec. Bude to tedy napětí stejnosměrné.



a) První bod charakteristiky: kmitočet nula, přenos jedna



Obrázek 59: Konstrukce kmitočtové charakteristiky dolní propusti

Toto stejnosměrné napětí nejdříve přes rezistor **R** nabije kondenzátor **C**. Mezi elektrodami kondenzátoru je izolant, např. papír. Přes tento izolant stejnosměrný proud trvale protékat nemůže (nepoteče přece skrz papír!). Až bude kondenzátor nabitý, žádný proud už do něj nepoteče. Napětí **u₂** na výstupu bude stejné jako napětí **u₁** na vstupu. Na výstup se tedy dostalo všechno, co jsme přivedli na vstup. Napěťový přenos **A_u** je tedy jedna:

$$A_u = \frac{U_{in}}{U_{out}} = 1$$

A máme první krajní bod charakteristiky (Obrázek 59 a).

Ted' přiložme na vstup napětí **u₁** o kmitočtu velmi vysokém, přímo nekonečném. Kondenzátor se tímto napětím bude stále nabíjet – vybíjet. Při tom do něj poteče nabíjecí – vybíjecí proud. Kondenzátor tedy průchodu proudu nebrání. Čím větší kmitočet, tím menší impedance kondenzátoru. Až při kmitočtu nekonečném je impedance kondenzátoru nulová. Výstupní svorky s napětím **u₂** jsou kondenzátorem zkratované, jako by byly propojeny drátem. Napětí na nich je tedy nulové.

Napěťový přenos **A_u** je tedy nula:

$$A_u = \frac{U_{in}}{U_{out}} = 0$$

A máme druhý krajní bod charakteristiky (Obrázek 59 b).

A někde mezi těmito krajními body bude třetí bod, ve kterém končí přenos 1 a charakteristika začne sklánět dolů (Obrázek 59 c). Tomuto bodu říkáme mezní kmitočet.

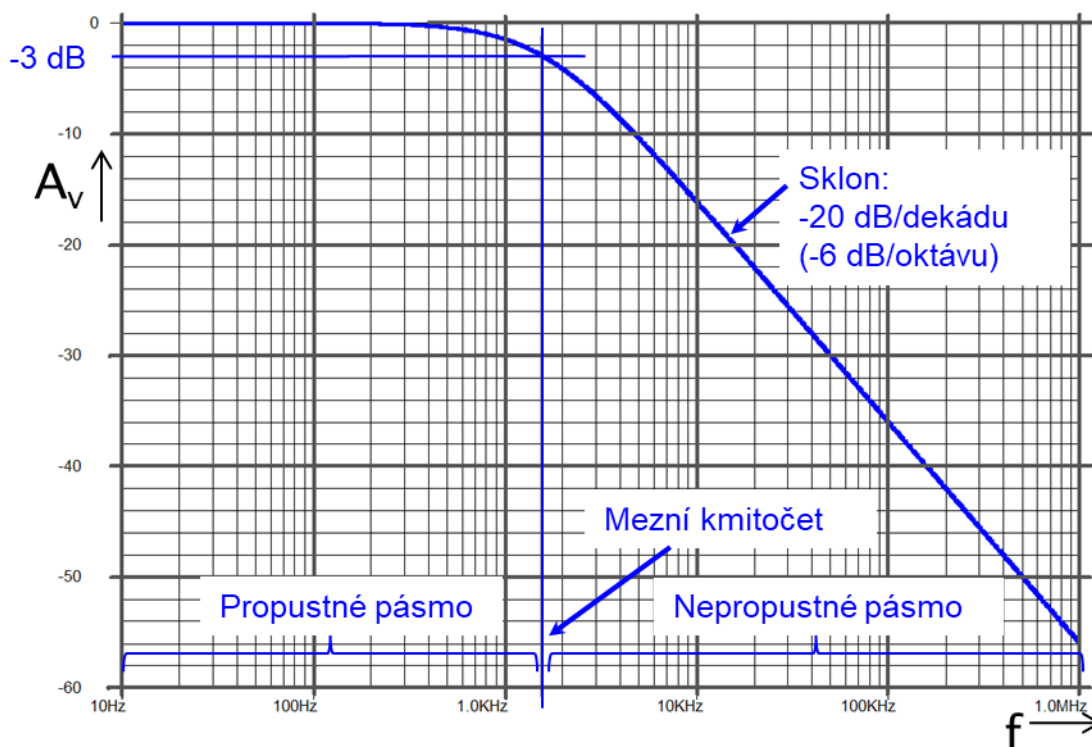
Mezní kmitočet je dán vzorcem:

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC}$$

Pamatujeme si: Čím větší kondenzátor, tím pomaleji probíhají děje na něm, tj. tím menší mají kmitočet. Čím větší kyblík, tím pomalejší nalévání – vylévání. Proto je kondenzátor ve vzorci pod lomítkem.

Podobně odpor: Čím delší a tenčí trubka (čím větší odpor), tím pomalejší napouštění – vypouštění kyblíku (kondenzátoru). Proto je i odpor ve vzorci pod lomítkem.

Na dalším obrázku (Obrázek 60) je příklad charakteristiky dolní propusti, kde vodorovná i svislá osa jsou ocejchovány v logaritmickém měřítku.



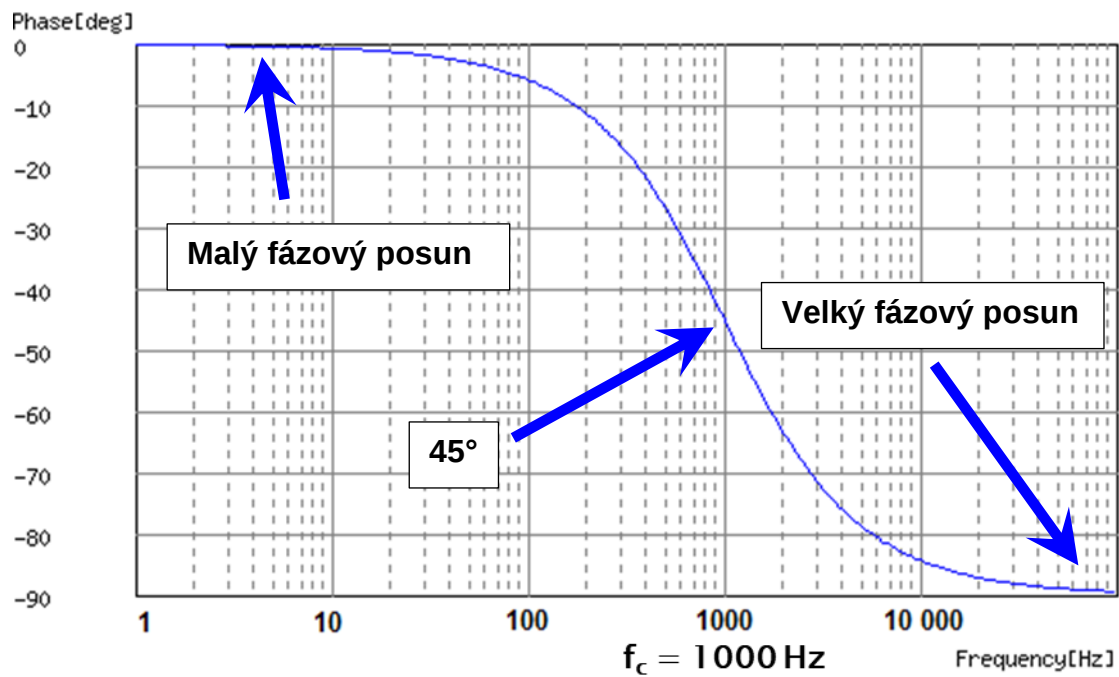
Obrázek 60: Amplitudová kmitočtová charakteristika dolní propusti v logaritmickém zobrazení

Obrázek 61 ukazuje příklad fázové kmitočtové charakteristiky dolní propusti.

Při malém kmitočtu stačí nabíjení – vybíjení kondenzátoru sledovat změny vstupního napětí. Fázový posun je téměř nulový.

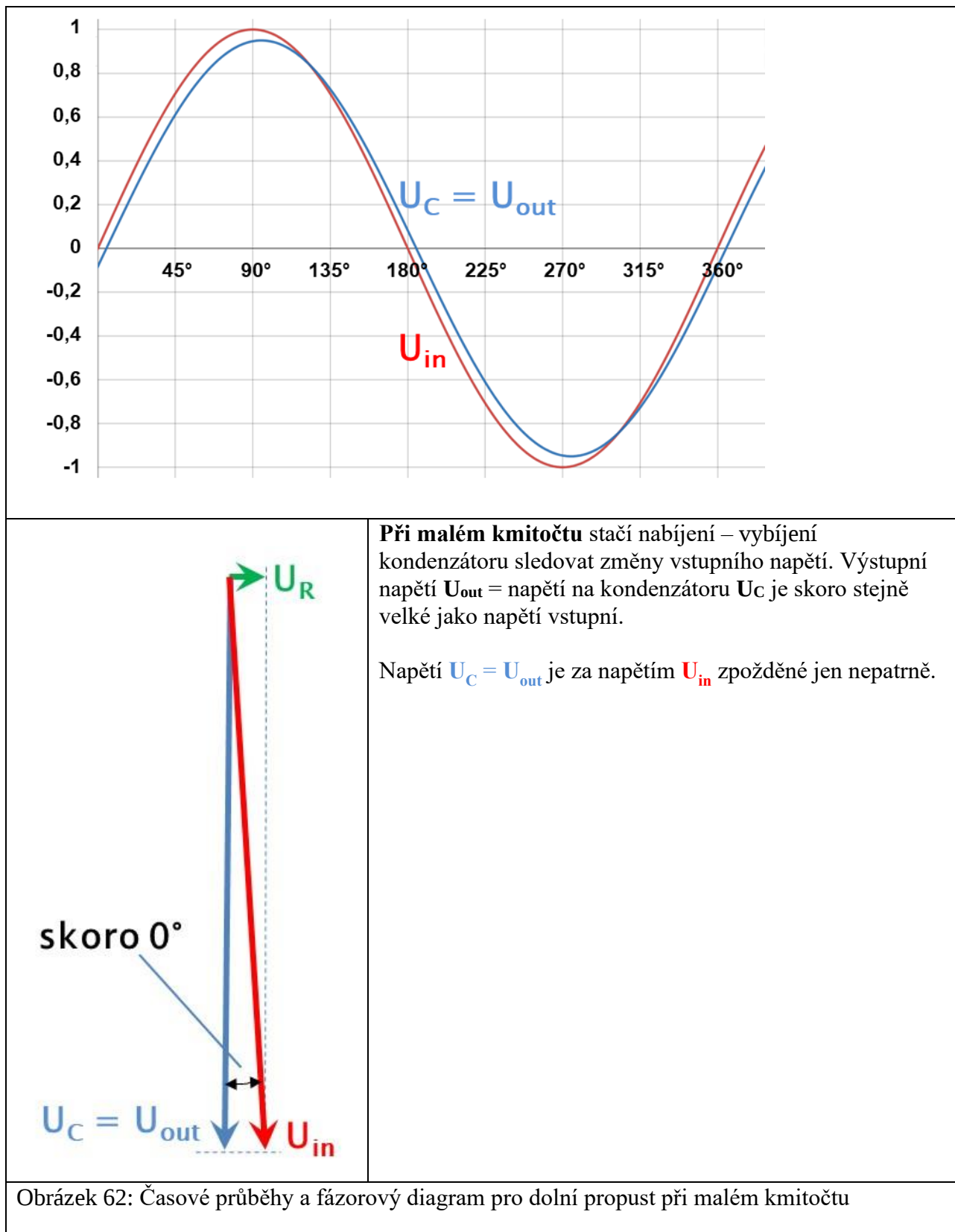
Při mezním kmitočtu je fázový posun přesně 45° .

Při velkém kmitočtu nestačí nabíjení – vybíjení kondenzátoru sledovat změny vstupního napětí. Fázový posun je největší, skoro 90° .



Obrázek 61: Fázová charakteristika dolní propusti – integračního článku

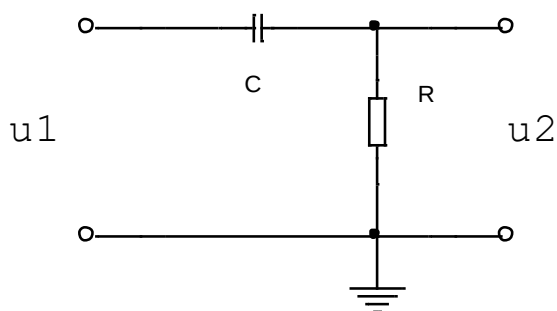
Velikosti napětí a fázové posuny pro různé kmitočty můžeme zobrazit také pomocí fázorových a časových diagramů.



Obrázek 62: Časové průběhy a fázorový diagram pro dolní propust při malém kmitočtu

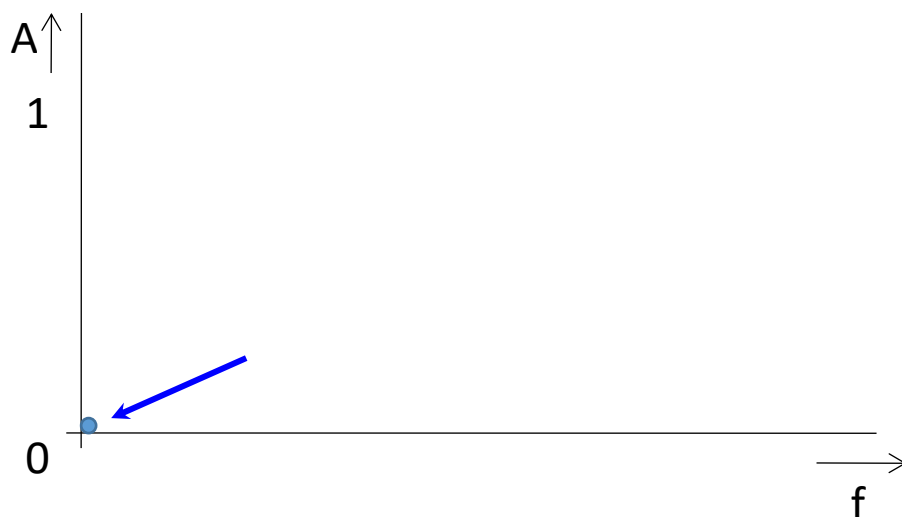
6.1.2 Horní propust

Horní propust propouští vysoké kmitočty, zadržuje nízké kmitočty.
Nejjednodušší horní propust složíme z rezistoru a kondenzátoru:

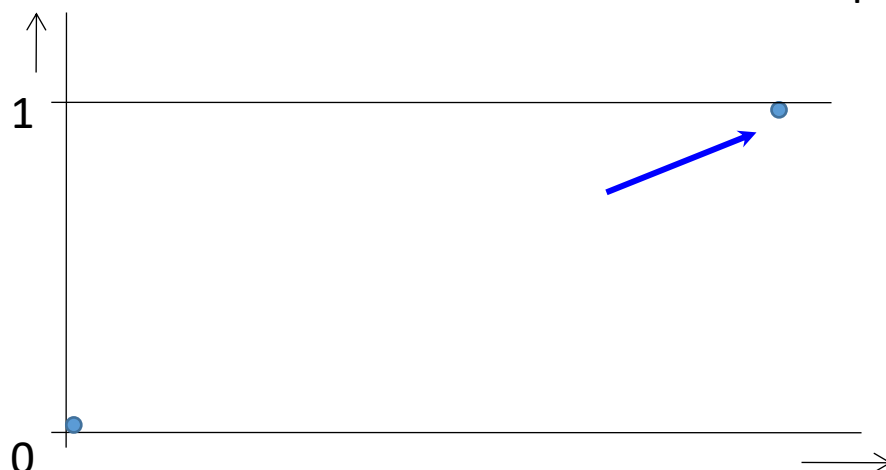


Obrázek 63: Horní propust – derivační článek

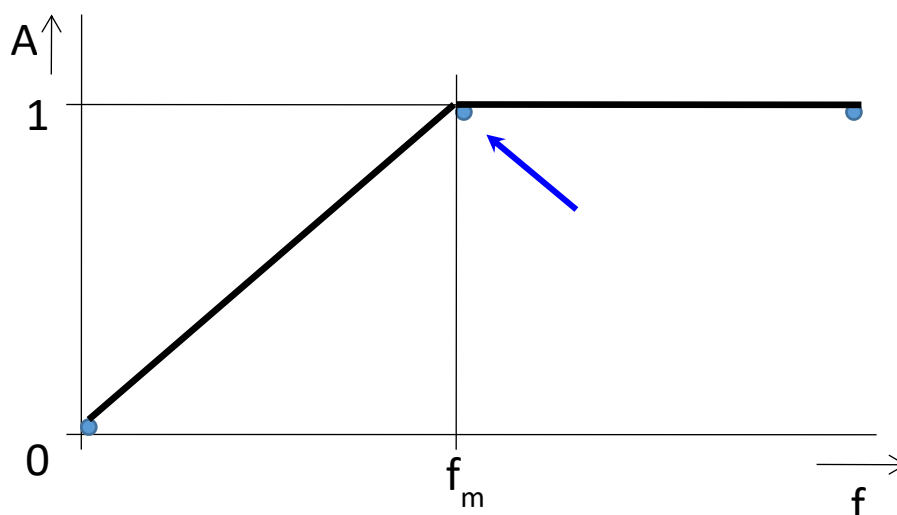
Kmitočtovou charakteristiku, tj. závislost přenosu A_u na kmitočtu, opět vymyslíme takto:
Přiložme na vstup napětí u_1 , které bude mít tak malý kmitočet, že se bude měnit nekonečně pomalu, tj. nebude se měnit vůbec. Bude to tedy napětí stejnosměrné.



a) První bod charakteristiky: kmitočet nula, přenos nula



b) Druhý bod charakteristiky: kmitočet nekonečno, přenos jedna



c) Třetí bod charakteristiky: kmitočet mezní, charakteristika se láme

Obrázek 64: Konstrukce kmitočtové charakteristiky horní propusti

Toto stejnosměrné napětí nejdříve přes rezistor R nabije kondenzátor C. Mezi elektrodami kondenzátoru je izolant, např. papír. Přes tento izolant stejnosměrný proud trvale protékat nemůže (nepoteče přece skrz papír!). Až bude kondenzátor nabitý, žádný proud už do něj nepoteče. Když odporem na výstupu neteče žádný proud, není na něm ani žádné napětí (správněji nulový proud, nulové napětí...). Napětí u_2 na výstupu tedy bude nulové, na výstup se ze vstupního napětí nedostává nic. Napěťový přenos A_u je tedy nula:

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = 0$$

A máme první krajní bod charakteristiky.

Ted' přiložme na vstup napětí u_1 o kmitočtu velmi vysokém, přímo nekonečném. Kondenzátor se tímto napětím bude stále nabíjet – vybíjet. Při tom do něj poteče nabíjecí – vybíjecí proud. Kondenzátor tedy průchodu proudu nebude klást odpor. Čím větší kmitočet, tím menší odpor (správně impedance) kondenzátoru. Až při kmitočtu nekonečném je odpor kondenzátoru nulový (správně impedance nulová). Všechno, co přivedeme na vstup, se objeví i na výstupu. Napětí na výstupu je tedy stejné jako na vstupu, přenos A_u je jedna:

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} = 1$$

A máme druhý krajní bod charakteristiky.

A někde mezi těmito krajními body bude třetí bod, ve kterém charakteristika přestává stoupat a začíná přenos 1. Tomuto bodu říkáme mezní kmitočet. Je dán vzorcem:

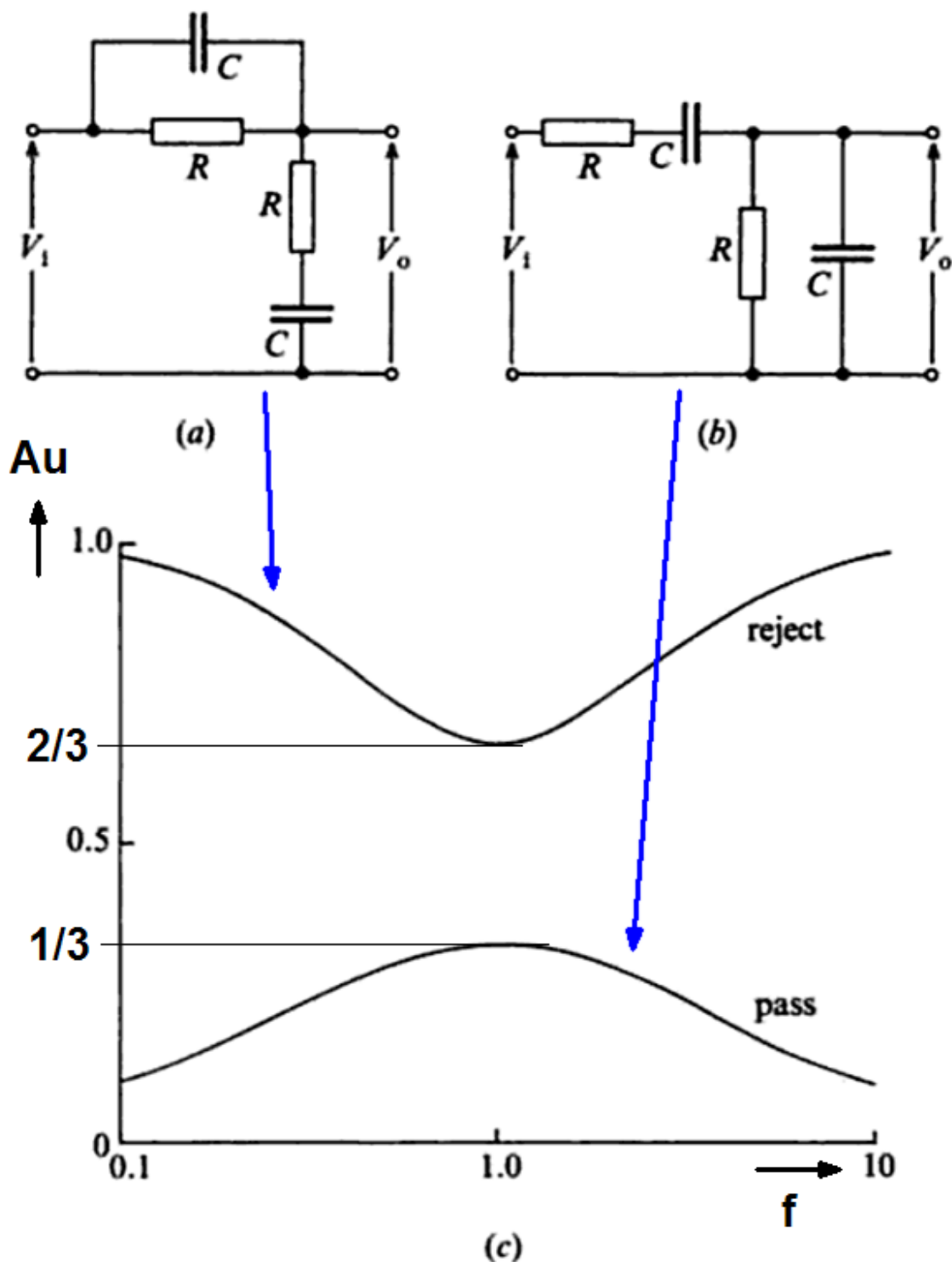
$$f_m = \frac{1}{2\pi RC}$$

6.1.3 Wienův článek

a) Zapojení

Wienův článek je filtr, složený ze dvou RC článků – paralelního a sériového, které jsou zapojeny jako napěťový dělič. Podle způsobu zapojení obou RC článků pak Wienův článek pracuje jako pásmová zádrž nebo jako pásmová propust.

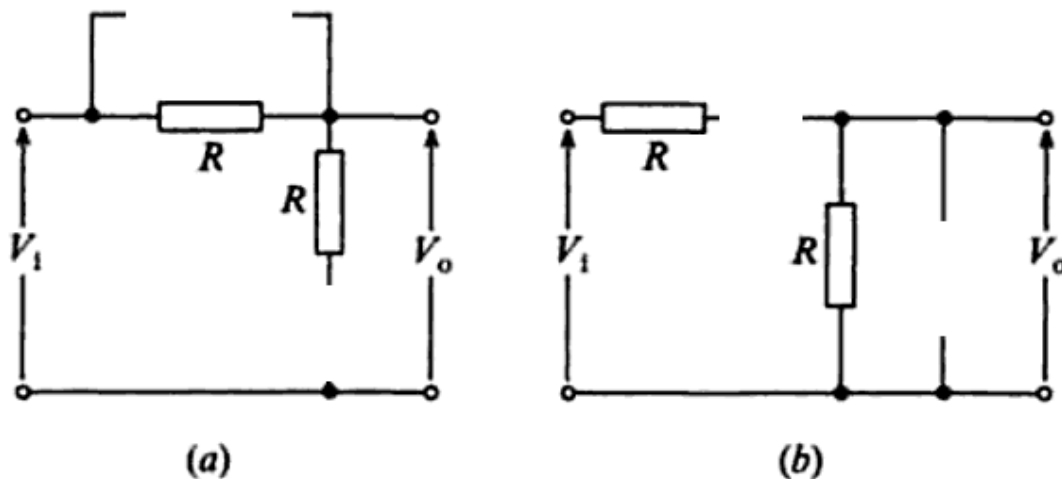
Jsou jen dvě možnosti, jak oba RC články zapojit: Bud' na straně vstupní začneme paralelní kombinací RC a na straně výstupní bude sériová kombinace (Obrázek 65 **Error! Reference source not found.**a), nebo obráceně, na straně vstupní začneme sériovou kombinací RC a na straně výstupní bude paralelní kombinace (Obrázek 65 b).



Obrázek 65: Wienův článek – a) pásmová zádrž (reject), b) pásmová propust (pass), c) závislosti přenosu na kmitočtu

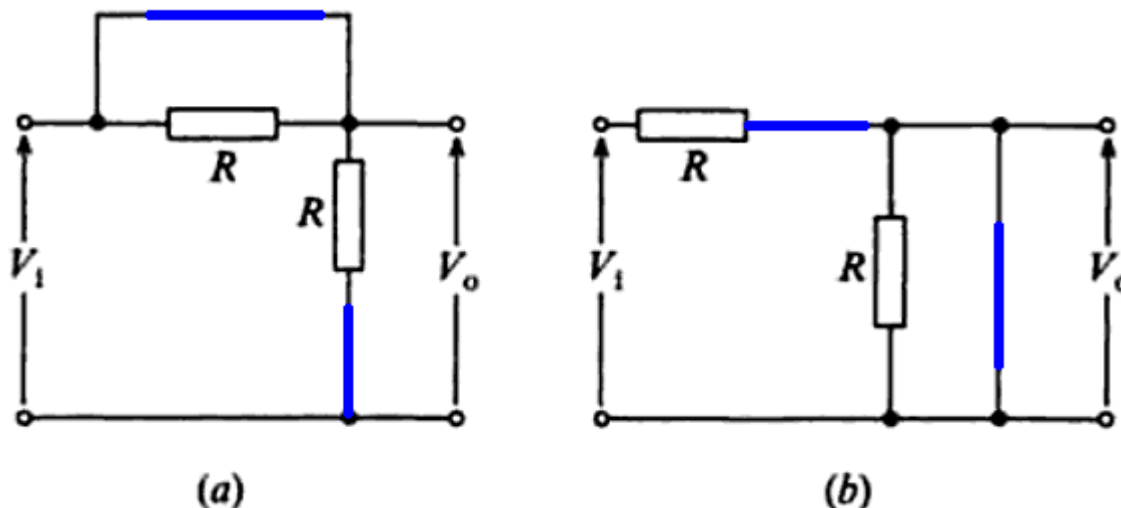
O jaký druh filtru se jedná, zjistíme jednoduchou úvahou.

Zkusíme (jen jako) na filtr přivést signál velmi nízkého kmitočtu – stejnosměrný. Oba kondenzátory jsou nevodivé, protože stejnosměrný proud se nedostane přes izolaci mezi jejich deskami. Můžeme tedy oba kondenzátory odpojit, jako by tam nebyly (Obrázek 66Error! Reference source not found.).



Obrázek 66: Náhradní schéma Wienova článku pro velmi nízké kmitočty – a) pásmová zadrž, b) pásmová propust. Kondenzátory jsou při nízkých kmitočtech nevodivé, proto jsme je vymazali.

Na dalším obrázku (Obrázek 67) jsou náhradní schémata obou variant Wienova článku pro velmi vysoké kmitočty. Kondenzátory jsou při vysokém kmitočtu velmi vodivé, chovají se jako zkrat, proto jsme je v náhradních schématech nahradili tlustými modrými dráty.



Obrázek 67: Náhradní schéma Wienova článku pro velmi vysoké kmitočty – a) pásmová zadrž, b) pásmová propust

Obvod na obrázcích a) propouští jak stejnosměrný signál, tak signál o velmi vysokém kmitočtu. Rezonanční¹ kmitočet naopak propouštět nebude, je to tedy pásmová zadrž.

Obvod na obrázcích b) nepropouští ani stejnosměrný signál, ani signál o velmi vysokém kmitočtu. Rezonanční kmitočet naopak propouštět bude, je to tedy pásmová propust.

b) Rezonanční kmitočet

Odvození rezonančního kmitočtu pro Wienův článek je dosti složité, a to i když pro zjednodušení použijeme oba rezistory stejné, i oba kondenzátory stejné. Nakonec ale s tímto zjednodušením vyjde stejný vzorec, jako pro mezní kmitočet derivačního nebo integračního článku:

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC}$$

¹ Pojem „rezonanční kmitočet“ by se správně měl používat jen ve spojení s LC rezonančními obvody. U pásmových zadrž a propustí RC by se tento kmitočet měl nazývat kvazirezonanční („jako rezonanční“) nebo kritický.

c) Přenos

Ve vzorci pro přenos Wienova článku při rezonančním kmitočtu vždy figuruje jedna třetina: Pásmová propust jednu třetinu signálu propustí, pásmová zadrž jednu třetinu signálu zadrží. Přenos pásmové propusti je

$$A_r = \frac{1}{3}$$

Přenos pásmové zadržky je

$$A_r = 1 - \frac{1}{3} = \frac{2}{3}$$

Fázový posun při rezonančním kmitočtu je u obou variant Wienova článku nulový. Tím je např. umožněno použití Wienova článku ve známém oscilátoru s operačním zesilovačem a žárovkou (Obrázek ?????????????).

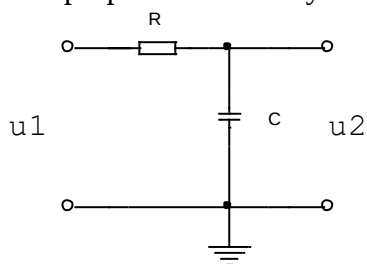
6.2 Filtry s operačními zesilovači

Pasivní filtry mají tyto nevýhody:

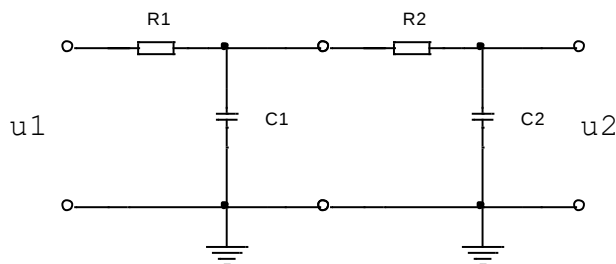
- Nezesilují, mohou signál jen zeslabovat
- Nelze je jednoduše řadit za sebe (do kaskády) a tím získat lepší vlastnosti

6.2.1 Kaskádní řazení dolních a horních propustí

Nejjednodušší dolní propust RC potlačuje kmitočty nad mezním kmitočtem, ale málo. V kmitočtové charakteristice je to dáno sklonem pravé části 20 dB/dekádu¹. Kdybychom chtěli vysoké kmitočty potlačit více a mít charakteristiku se sklonem 40 dB/dekádu, zapojili bychom dvě dolní propusti do kaskády:



a) jednoduchá dolní propust RC



b) dvě dolní propusti zapojené do kaskády

Obrázek 68: Jednoduché řazení propustí do kaskády nepřináší žádoucí výsledky

Čekáme, že spojené stejné propusti budou mít mezní kmitočet stejný jako původně jedna, a že potlačení vysokých kmitočtů bude dvojnásobné, tj. sklon charakteristiky bude 40 dB/dekádu.

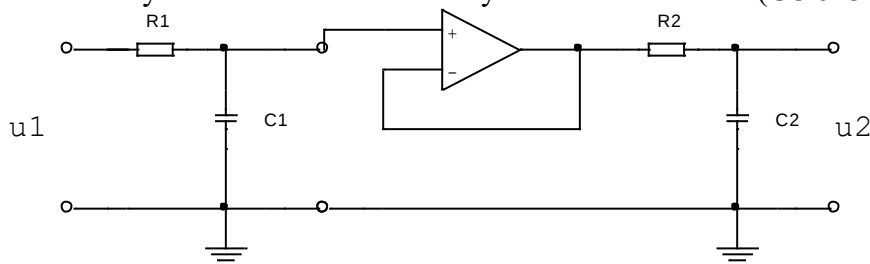
Bohužel, nebude to tak. A to proto, že

- Oba obvody se vzájemně ovlivňují.
- Levý obvod očekává na svém výstupu provoz bez zátěže, a místo toho tam vidí nějaký odpor R a za ním kondenzátor C. Proto jeho parametry budou jiné, než kdyby byl sám.
- Pravý obvod očekává na svém vstupu buzení z nějakého „tvrdého“ generátoru, a místo toho tam vidí nějaký kondenzátor C a za ním odpor R. Proto i jeho parametry budou jiné, než kdyby byl sám.

¹ To znamená, že při zvýšení kmitočtu o dekádu, tj. na desetinásobek (např. z 1 kHz na 10 kHz) se přenos zmenší o 20 dB, tj. na desetinu. Stejnou vlastnost vyjadřuje údaj „6 dB na oktávu“: při zvýšení kmitočtu o oktávu, tj. na dvojnásobek (např. z 1 kHz na 2 kHz) se přenos zmenší o 6 dB, tj. na polovinu. Oba údaje tedy říkají: kolikrát se zvýší kmitočet, tolikrát se zmenší přenos.

Celkovým výsledkem bude rozplizlá charakteristika, neurčitý mezní kmitočet a obtížný výpočet.

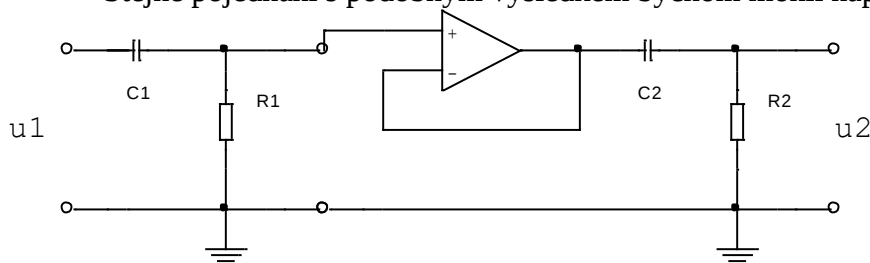
Když ale mezi oba RC obvody zařadíme zesilovač (Obrázek 69),



Obrázek 69: Oddělení stupňů kaskády zesilovačem – dolní propust

levý obvod bude na svém výstupu vidět nekonečný vstupní odpor operačního zesilovače a nebude tedy zatížen, a pravý obvod bude buzen z nulového výstupního odporu operačního zesilovače, a bude tedy mít svůj „tvrdý“ generátor. Oba obvody teď budou pracovat tak, jako by byly samostatné. Výsledkem jejich spolupráce bude charakteristika, jakou jsme chtěli: Mezní kmitočet přesně podle výpočtu, sklon charakteristiky 40 dB/dekádu.

Stejně pojednání s podobným výsledkem bychom mohli napsat i o horní propusti:



Obrázek 70: Oddělení stupňů kaskády zesilovačem – horní propust

Na dalších obrázcích (Obrázek 71, Obrázek 72) jsou příklady jednoduchých RC filtrů se zesílením, tj. s přenosem větším než 1. Sklon jejich kmitočtové charakteristiky je 20 dB na dekádu.

Jejich kmitočtové charakteristiky snadno odvodíme, když prozkoumáme jejich chování při dvou extrémních kmitočtech – nulovém a nekonečném.

Jako příklad uvedeme dolní propust v neinvertujícím zapojení (Obrázek 71a).

Při nulovém kmitočtu je kondenzátor nevodivý a přenos je dán jen oběma odpory:

$$A_u = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

Při malých kmitočtech se obvod tedy chová jako zesilovač s uvedeným zesílením.

Při velmi vysokém kmitočtu kondenzátor představuje zkrat, zkratuje odpor R_2 , a přenos je dán vzorcem

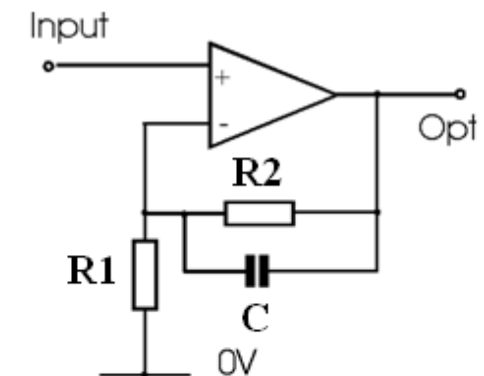
$$A_u = \frac{0}{R_1} + 1 = 1$$

Při vysokých kmitočtech se tedy obvod chová jako zesilovač se zesílením jedna.

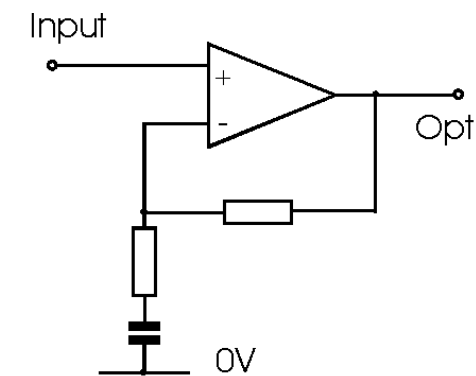
A mezi kmitočtem nulovým a nekonečným je kmitočet mezní:

$$f_m = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

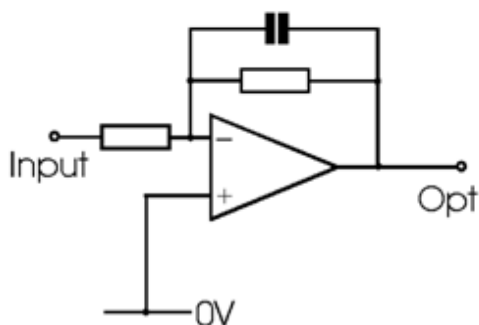
Pokud bychom měli obavu, že mezní kmitočet bude ovlivněn i odporem R_1 , tak nebude. Odpory R_1 a R_2 jsou odděleny „tvrdým“ bodem invertujícího vstupu, který díky záporné zpětné vazbě přesně sleduje vstupní napětí a žádný jiný signál přes sebe nepustí.



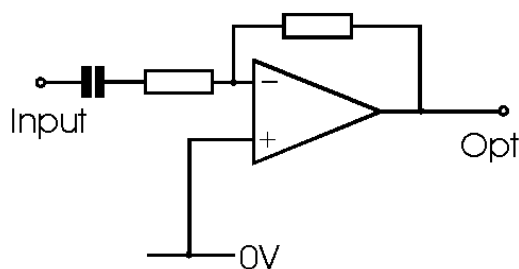
(a) Non-inverting configuration



(a) Non-inverting configuration



(b) Inverting configuration



(b) Inverting configuration

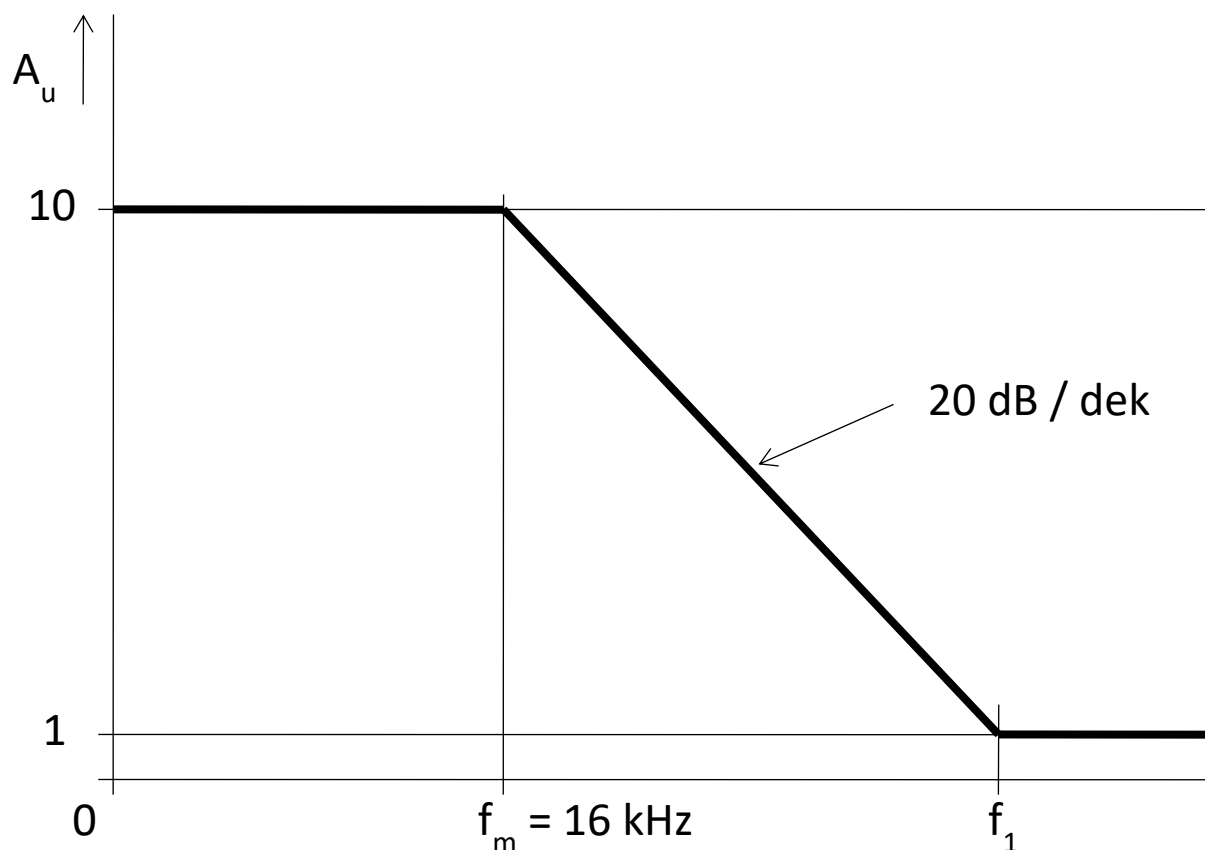
Obrázek 71: Dolní propust se zesílením > 1 Obrázek 72: Horní propust se zesílením > 1

Kmitočtová charakteristika obvodu (Obrázek 71a) pro hodnoty $R1 = 1k$, $R2 = 10k$, $C = 1n$ je na dalším obrázku (Obrázek 73). Druhý výrazný kmitočet (označený f_1), který vypadá jako mezní, je tam, kde se přímka se sklonem 20 dB/dek protne s přímkou označující přenos $A_u = 1$. Tento kmitočet proto závisí např. také na tom, jaké zesílení (v našem případě 10) jsme nastavili poměrem obou odporů.

Nad kmitočtem f_1 je impedance kondenzátoru C malá, skoro nulová. V náhradním zapojení bychom proto mohli kondenzátor nahradit zkratem a z obvodu se stane neinvertující zesilovač se zesílením 1 (sledovač). Odpor R1 už na přenos nemá žádný vliv – je prostě připojený jako zátěž k výstupu zesilovače.

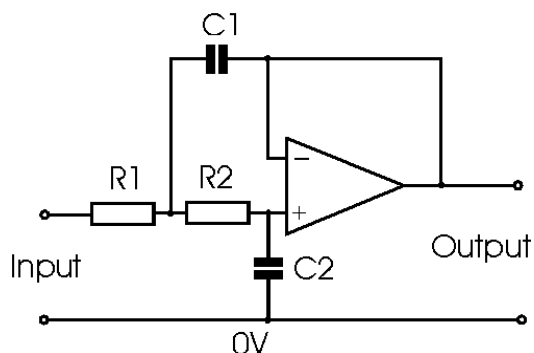
Cvičení: Je-li jedno zesílení 10, druhé 1, sklon charakteristiky 20 dB/dek, jaký je kmitočet f_1 ? Kdo jako první správně odpoví (SMS, e-mail, telefon, osobně) a odpověď zdůvodní, získá 10 bodů.

U obvodů na dalších obrázcích (Obrázek 71 b, Obrázek 72 a, b) bychom kmitočtové charakteristiky sestavili na základě obdobných úvah.

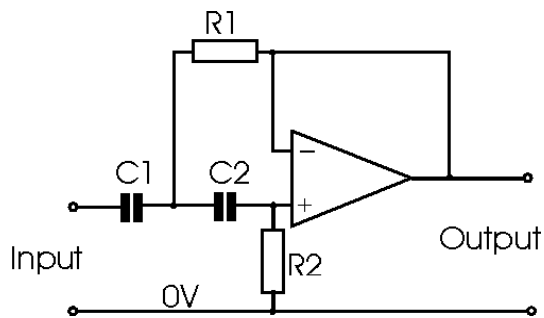


Obrázek 73: Kmitočtová charakteristika dolní propusti s OZ v neinvertujícím zapojení a zesílením $A_u = 10$ (viz Obrázek 71 a)

Na dalších obrázcích jsou dolní propust (Obrázek 74) a horní propust (Obrázek 75) s operačním zesilovačem, maximálním přenosem 1 a sklonem charakteristiky 40 dB/dekádu. Vysvětlení funkce těchto zapojení je komplikovanější a nebudeme se jím zde zabývat.



Obrázek 74: Dolní propust se sklonem charakteristiky 40 dB/dekádu

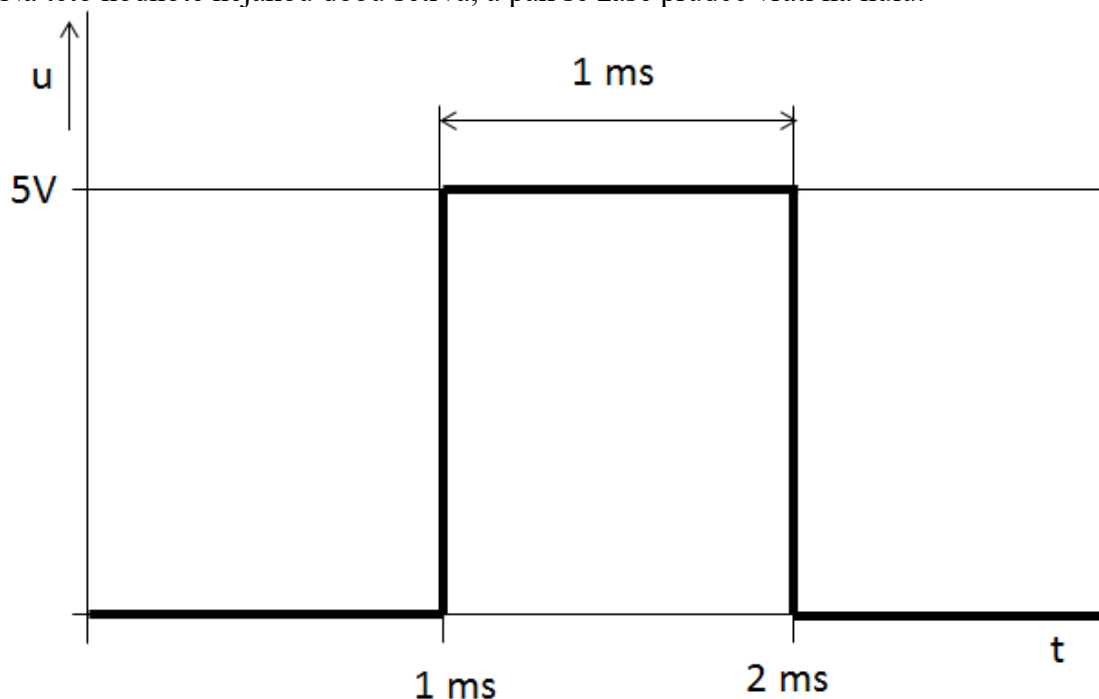


Obrázek 75: Horní propust se sklonem charakteristiky 40 dB/dekádu

7. Impulsové obvody

7.1 Impulsový signál ideální a skutečný

Impuls je signál, který z nulové hodnoty prudce vzroste na nenulovou hodnotu, které říkáme amplituda. Na této hodnotě nějakou dobu setrvá, a pak se zase prudce vrátí na nulu.



Obrázek 76: Ideální impuls o amplitudě 5V, trvající 1 milisekundu

Obrázek 76 ukazuje ideální impuls o amplitudě pět voltů, který trvá jednu milisekundu. Začíná v čase 1ms, trvá 1ms, končí v čase 2ms.

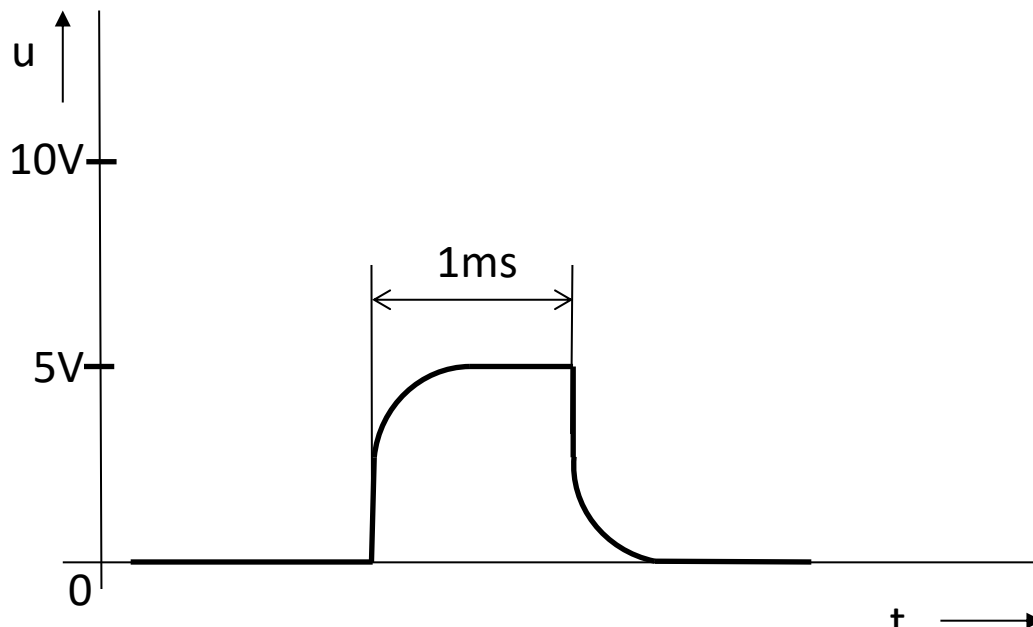
U ideálního impulsu signál vzroste za nekonečně krátkou dobu z nuly na hodnotu amplitudy, a pak se zase za nekonečně krátkou dobu vrátí na nulu.

Samozřejmě není možné, aby v přírodě něco trvalo nekonečně krátkou dobu, tj. aby to trvalo nulový čas.

Ve skutečnosti nějakou dobu trvá, než signál vzroste z nuly na svoji amplitudu, a potom zase nějakou dobu trvá, než se vrátí zpátky k nule.

Obrázek 77 ukazuje skutečný impuls, jehož nástupná i sestupná hrana trvají nenulovou dobu.

Toto pokažení hran impulsu mají na svědomí všudypřítomné parazitní kapacity, které se při každé změně signálu musí nabíjet – vybíjet, což samozřejmě chvíli trvá. Tyto chvíle se např. v počítači mnohokrát opakují, sčítají, a jsou příčinou toho, že každá akce počítače nějakou dobu trvá. Tyto parazitní kapacity spolu s odpory v obvodech tvoří mnoho dolních propustí (integračních článků), které nechtějí propouštět rychlé signály s vysokými kmitočty. A proto je náš počítač pomalý.



Obrázek 77: Skutečný impuls

7.2 Odezva RC článků na obdélníkový signál

Odezvu RC článků na obdélníkový signál můžeme zkoumat ze dvou pohledů:

- Pohled časový, tj. jak děje na kondenzátoru probíhá v čase, jak se kondenzátor ve spolupráci s rezistorem nabíjí a vybíjí
- Pohled kmitočtový, tj. jak RC článek propouští kmitočty obsažené v obdélníkovém signálu

V obou případech dojdeme ke stejným výsledkům.

7.3 Tvarovací obvody

7.4 Časová konstanta

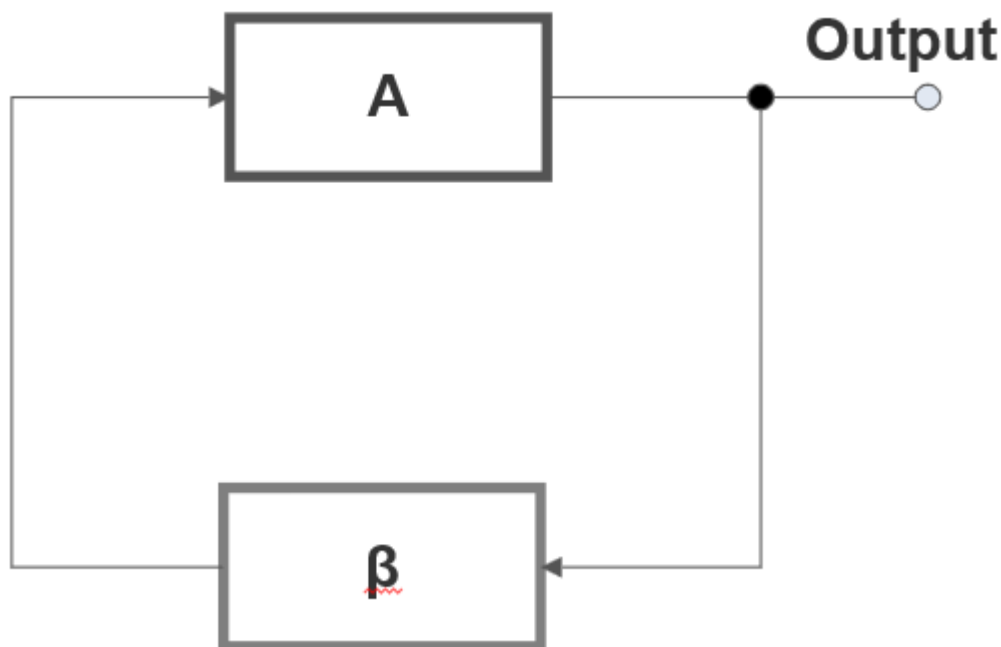
7.5 Nabíjení kondenzátoru ze zdroje napětí a zdroje proudu

8. Oscilátory

Oscilátor je obvod, který vyrábí trvalý periodický signál s požadovaným časovým průběhem. Nejčastější časové průběhy jsou sinus, obdélník, trojúhelník.

8.1 Podmínky ne/stability

Oscilátor vznikne ze zesilovače, kterému zavedeme kladnou zpětnou vazbu (Obrázek 78).



Obrázek 78: Zesilovač se zpětnou vazbou

Na obrázku blok označený **A** představuje zesilovač. Symbol **A** bude označovat zesílení zesilovače, tj. kolikrát větší signál je na výstupu zesilovače než na jeho vstupu.

Blok označený **β** představuje zpětnou vazbu, tj. obvod, který část výstupního napětí vede zpět do vstupu zesilovače. Symbol **β** bude označovat přenos zpětné vazby, tj. jaká část signálu bude přenesena zpět na vstup.

Zesilovač zajišťuje, aby energie ze zdroje doplňovala ztráty, které vznikají v obvodu. Jinak by oscilátor dokmital a zastavil se.

Zpětná vazba zajišťuje, že zesilovač svým vlastním signálem ze svého výstupu napájí svůj vstup a tím sám sobě zajišťuje signál, který zpracovává.

Zesilovač obvykle zesiluje, tj. signál na jeho výstupu je větší než na vstupu. Pak tedy $A > 1$.

Zpětná vazba obvykle zeslabuje, tj. to, co zpětná vazba přivádí zpět na vstup zesilovače, je slabší než to, co do zpětné vazby jde z výstupu zesilovače. Energie se tedy ve zpětné vazbě ztrácí. Pak platí $\beta < 1$.

Aby se energie celkově v obvodu neztrácela a oscilátor se nezastavil, musí zesilovač tyto ztráty nahrazovat. Zesilovač musí mít zesílení alespoň takové, jaké jsou ztráty ve zpětné vazbě. Tomu se říká **podmínka amplitudová**.

Zpětná vazba musí vstup zesilovače budit tak, aby podporovala signál, který už v zesilovači je. Když tedy signál na vstupu zesilovače např. právě stoupá, signál, přicházející ze zpětné vazby do vstupu musí také stoupat, aby to původní stoupání podpořil. Jinak by zpětná vazba dění v zesilovači nepodporovala, ale tlumila, a nebyla by to zpětná vazba kladná, ale záporná. Signál ze zpětné vazby tedy musí být ve fázi s tím signálem, který už na vstupu je. Tomu se říká **podmínka fázová**.

8.1.1 Podmínka amplitudová

Příklad: Přenos ve zpětné vazbě je $1/3$, tj. zpětná vazba přivede na vstup zesilovače třetinu toho, co je na výstupu. Jaké musí být zesílení zesilovače, aby nahradil ztráty ve zpětné vazbě tak, aby se oscilátor nezastavil?

Když zpětná vazba zeslabuje např. třikrát, zesilovač musí aspoň třikrát zesilovat. Když přenos zpětné vazby je

$$\beta = \frac{1}{3}$$

tak zesílení zesilovače musí být aspoň

$$A \geq 3$$

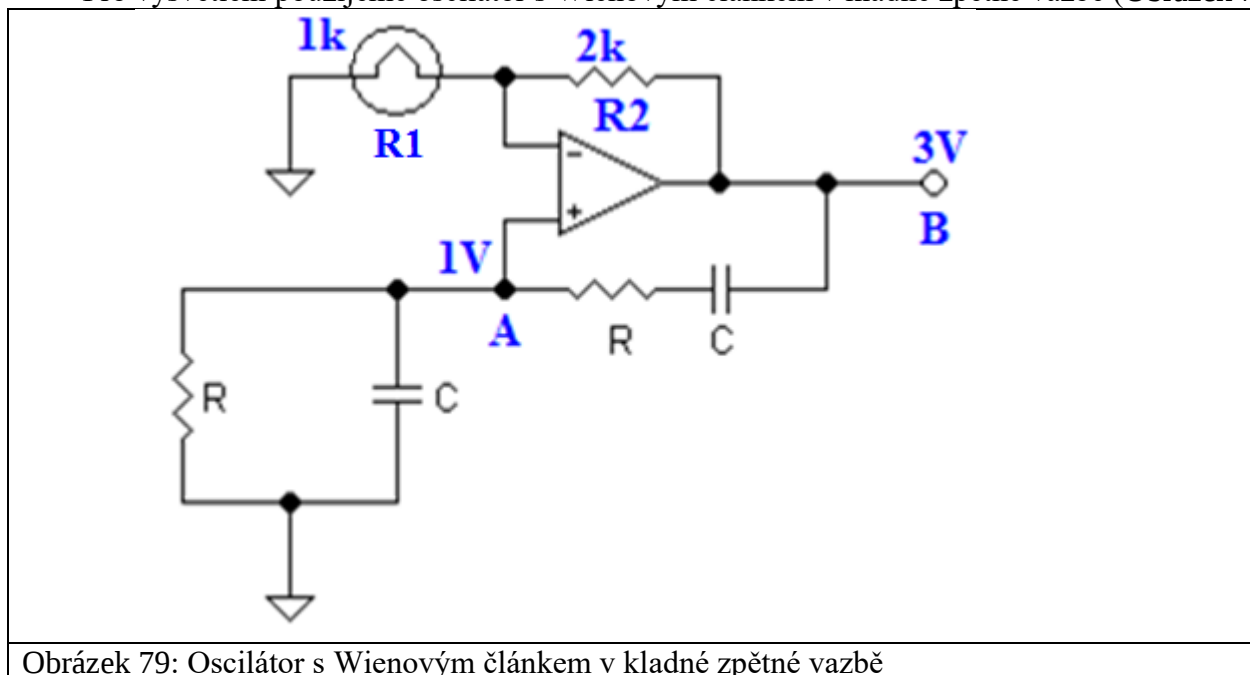
Neboli

$$A \geq 1/\beta$$

nebo

$$\beta A \geq 1$$

Pro vysvětlení použijeme oscilátor s Wienovým článkem v kladné zpětné vazbě (Obrázek 79).



Obrázek 79: Oscilátor s Wienovým článkem v kladné zpětné vazbě

Na výstupu oscilátoru v bodě B je napětí 3V. Wienův článek tvoří kladnou zpětnou vazbu a přivádí signál z výstupu zesilovače (bod B) do vstupu (bod A). Wienův článek má přenos $1/3$ (tj. zeslabuje 3x). Proto ze 3V na výstupu B přivede do vstupu A 1V.

Zesilovač musí z 1V na svém vstupu A udělat 3V na výstupu B. Proto musí mít zesílení 3.

Proto v ustáleném stavu

$$\begin{aligned} \beta * A &= 1 \\ \frac{1}{3} * 3 &= 1 \end{aligned}$$

8.1.2 Podmínka fázová

Příklad: Zesilovač má fázový posun nula, neboli když signál na vstupu stoupá, na výstupu také stoupá. Když je na vstupu maximum, je na výstupu také právě maximum atd. Stejně at' se chová i zpětná vazba. Celkový fázový posun na cestě ze vstupu na výstup a zpět přes zpětnou vazbu z výstupu na vstup je nula. Když signál na vstupu stoupá, zpětná vazba také přivádí „stoupá“. Fázová podmínka je tedy splněna, signál přiváděný z výstupu na vstup podporuje to, co už na vstupu je.

Fázovou podmínku můžeme napsat pomocí vztahu

$$\begin{aligned} \phi_A + \phi_B &= 0^\circ + 0^\circ \\ \phi_A + \phi_B &= 0^\circ \end{aligned}$$

Kdyby zesilovač fázi obracel o 180° , tj. když signál na vstupu stoupá, na výstupu klesá, a zpětná vazba by také fázi obracela o 180° , byl by celkový výsledek stejný jako v případě „ $0^\circ + 0^\circ$ “. Opět by platilo, že když signál na vstupu stoupá, zpětná vazba také přivádí „stoupá“. A přitom celkový fázový posun není 0° , ale

$$180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$$

A kdyby fázové posuny byly $360^\circ + 0^\circ$, nebo $360^\circ + 360^\circ$, nebo ..., výsledek by byl pořád stejný: Když na vstupu stoupá, zpětná vazba také přivádí „stoupá“.

Můžeme tedy fázovou podmínku napsat:

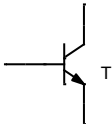
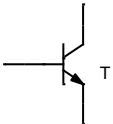
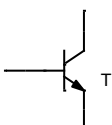
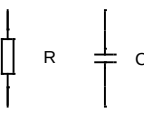
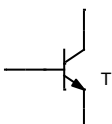
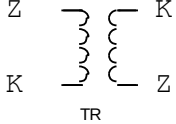
$$\phi_A + \phi_B = 0 + 2k\pi \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

Místo 180° (ve stupních) jsme napsali π (v radiánech) a celé to říká: Když zesilovač a zpětná vazba otáčejí fázi o 360° (tj. jednou dokola), nebo několikrát o 360° (tj. několikrát dokola), je to stejné, jako kdyby neotáčely fázi vůbec.

8.1.3 Realizace fázové podmínky

Celkový fázový posun ve smyčce zesilovač – zpětná vazba má být 0° , nebo násobek 360° .

Zesilovače obvykle skládáme z tranzistorů, zapojených se společným emitorem. Tranzistor jako zesilovač se společným emitorem obrací fázi o 180° . Celkový fázový posun v oscilátoru s takovým zesilovačem už nemůže být 0° , musí tedy být násobkem 360° , nejspíše tedy právě 360° . Fázový posun tranzistoru 180° musíme tedy doplnit posunem o dalších 180° .

Aktivní prvek – posun o 180°	Posun fáze o dalších 180°	Popis
		Posunu o dalších 180° se dosáhne přidáním dalšího tranzistoru. Výsledkem je dvojstupňový tranzistorový zesilovač, který otáčí fázi o celých 360° . Ve zpětné vazbě už proto další posun nebude. Příklad: multivibrátor se dvěma tranzistory
		Posunu o dalších 180° se dosáhne obvodem RC. Příklad: oscilátor RC s posouvanou fází
		Posunu o dalších 180° se dosáhne transformátorem. Sekundární vývody se přehodí vůči primárním, takže fáze je na nich proti primárním otočena o 180° . V obrázku je to naznačeno písmeny Z, K – jako začátek, konec vinutí. Cívky transformátoru bývají součástí obvodů LC, které určují kmitočet oscilátoru. Příklad: oscilátory LC

Tabulka 1: Možnosti posunutí fáze v oscilátoru

8.2 RC oscilátory

RC oscilátory používají k zavedení zpětné vazby obvody s odpory a kondenzátory. Hodnoty těchto součástí také určují kmitočet, na kterém oscilátor kmitá. U některých oscilátorů, např. s posouvanou fází, obvody RC také doplňují celkový fázový posun ve smyčce zesilovač – zpětná vazba na 360° .

Čím větší odpory a kapacity, tím pomalejší oscilátor, na tím menším kmitočtu kmitá. Vzorec pro výpočet kmitočtu takového oscilátoru se bude podobat tomuto:

$$f_{osc} = K \frac{1}{RC}$$

Tento vzorec říká, že čím větší odpor (odpory), tím menší kmitočet, protože R je ve vzorci dole, pod lomítkem. Podobně kondenzátory: čím větší kapacity, tím menší kmitočet.

8.2.1 Sinusové RC oscilátory

Sinusové oscilátory stabilizují velikost svého výstupního napětí, takže toto napětí nemá snahu vzrůstat nad všechny meze, a zůstává „neořezané“, nezkreslené.

Některé oscilátory stabilizují svoje výstupní napětí prostě tím, že „na víc nemají“, viz např. dále oscilátory s posouvanou fází (Obrázek 80, Obrázek 81). V oscilátoru s posouvanou fází je zesilovač tvořen jediným tranzistorem, jehož zesílení je malé a mění se v závislosti na pracovním bodu tranzistoru. A právě změnou pracovního bodu tranzistoru pomocí odporového trimru (v uvedených příkladech není nakreslený) můžeme nastavit minimální zkreslení oscilátoru.

U jiných oscilátorů jsou pro stabilizaci velikosti výstupního napětí zvláštní obvody, např. viz dále oscilátory s Wienovým článkem (Obrázek 82). Je zde použit operační zesilovač, který má velkou rezervu zesílení, protože jeho zesílení je „skoro nekonečné“. Proto je nutno jeho zesílení omezit zvláštním obvodem – viz dále.

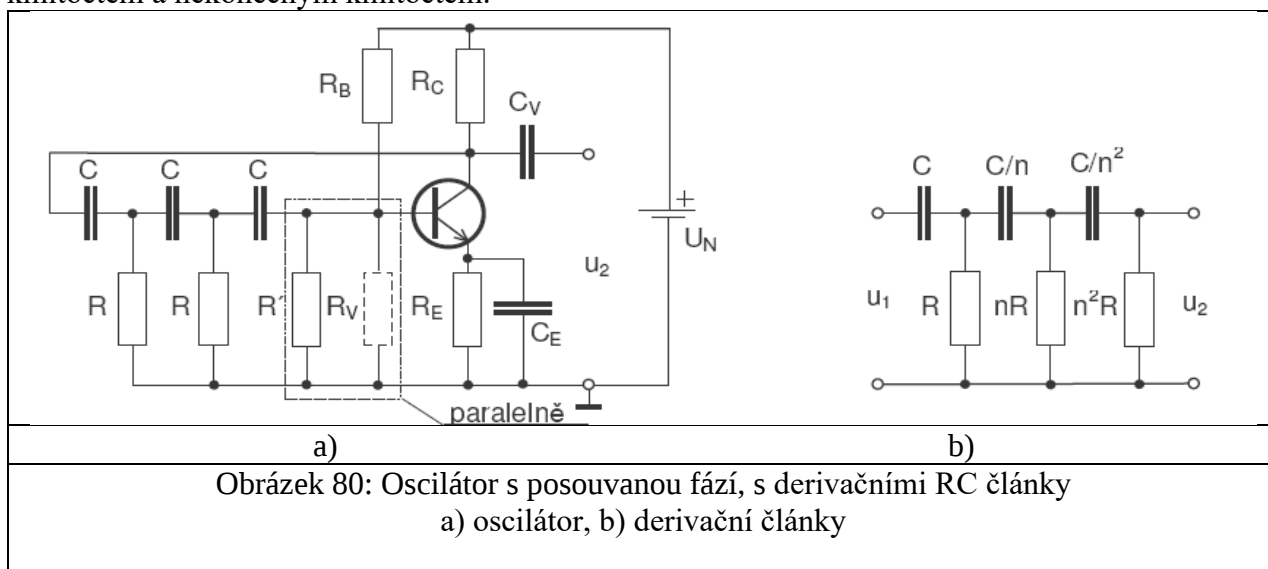
a) Oscilátory s posouvanou fází

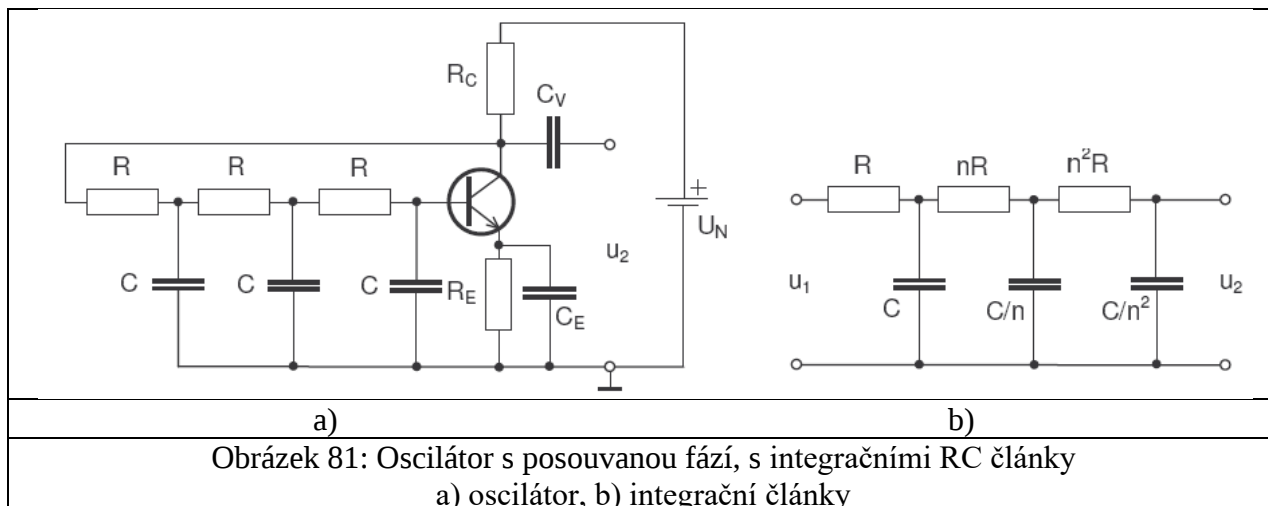
Mají zesilovač s jediným tranzistorem, který otáčí fázi o 180° . Proto je nutné pomocí dalšího obvodu otočit fázi o dalších 180° , aby výsledný fázový posun byl 360° .

Proud kondenzátorem je posunut o 90° proti napětí na něm. Mohli bychom tedy jedním RC článkem posouvat fázi signálu o 90° a pro celkový posun 180° bychom potřebovali jen dva RC články.

Jenže jednoduchý RC článek integrační nebo derivační posouvá fázi výstupního napětí přesně 90° jen při kmitočtech, na kterých je jeho přenos nulový. Derivační článek tedy při kmitočtu nulovém, integrační při kmitočtu nekonečném. Kdybychom tedy pro fázový posun přesně 180° , jaký potřebujeme, použili jen dva jednoduché RC články, dosáhli bychom tohoto posunu jen teoreticky, a to ještě k tomu jen při nulovém přenosu.

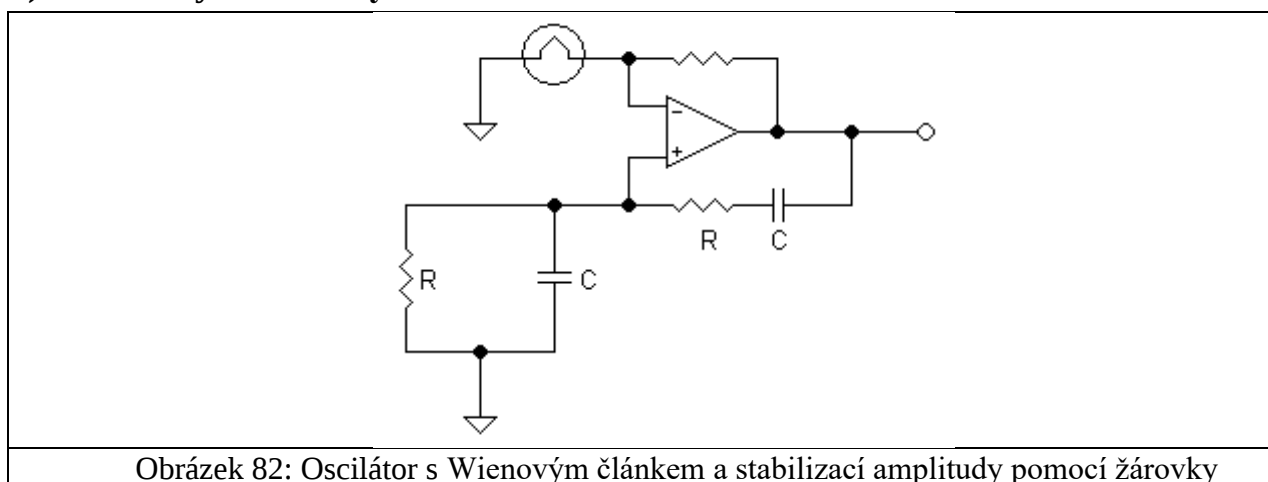
Proto použijeme ne dva, ale tři jednoduché RC články. Pak stačí, když každý z nich posune fázi jen o 60° . K tomu dojde při kmitočtu „rozumném“, tj. ani nulovém, ani nekonečném. Tento kmitočet s fázovým posunem 60° bude např. pro derivační článek mezi mezním kmitočtem článku (fázový posun 45°) a nulovým kmitočtem (fázový posun 90°). Pro integrační článek to bude mezi mezním kmitočtem a nekonečným kmitočtem.





Na obrázcích b) vidíme, že u trojnásobných RC článků jsou odpory směrem doprava větší a větší, kapacity menší a menší. To proto, aby vstupy článků vpravo příliš nezatěžovaly výstupy článků vlevo, na které jsou napojené. Takto alespoň částečně řešíme problém, který jsme u dvojnásobných propustí řešili vložení zesilovače s nekonečným vstupním a nulovým výstupním odporem (viz kapitola 6.2 Filtry s operačními zesilovači).

b) Oscilátory s Wienovým článkem



Oscilátor s Wienovým článkem (viz kapitola 6.1.3 Wienův článek) plní fázovou podmínku rozkmitání tak, že jeho zesilovač ani zpětná vazba neposouvá fázi ($\varphi_\beta = 0$, $\varphi_A = 0$):

$$\phi_A + \phi_\beta = 0 + 0$$

$$\phi_A + \phi_\beta = 0$$

Zpětnou vazbu totiž tvoří Wienův článek, který při svém kritickém (nebo také rezonančním) kmitočtu má nulový fázový posun mezi vstupním a výstupním napětím.

Wienův článek má při svém kritickém kmitočtu přenos $1/3$, přenos kladné zpětné vazby je tedy

$$\beta = \frac{1}{3}.$$

Aby byla splněna amplitudová podmínka rozkmitání

$$\beta A \geq 1,$$

musí tedy být zesílení zesilovače $A \geq 3$. Toto zesílení nastavíme velikostí odporů v záporné zpětné vazbě.

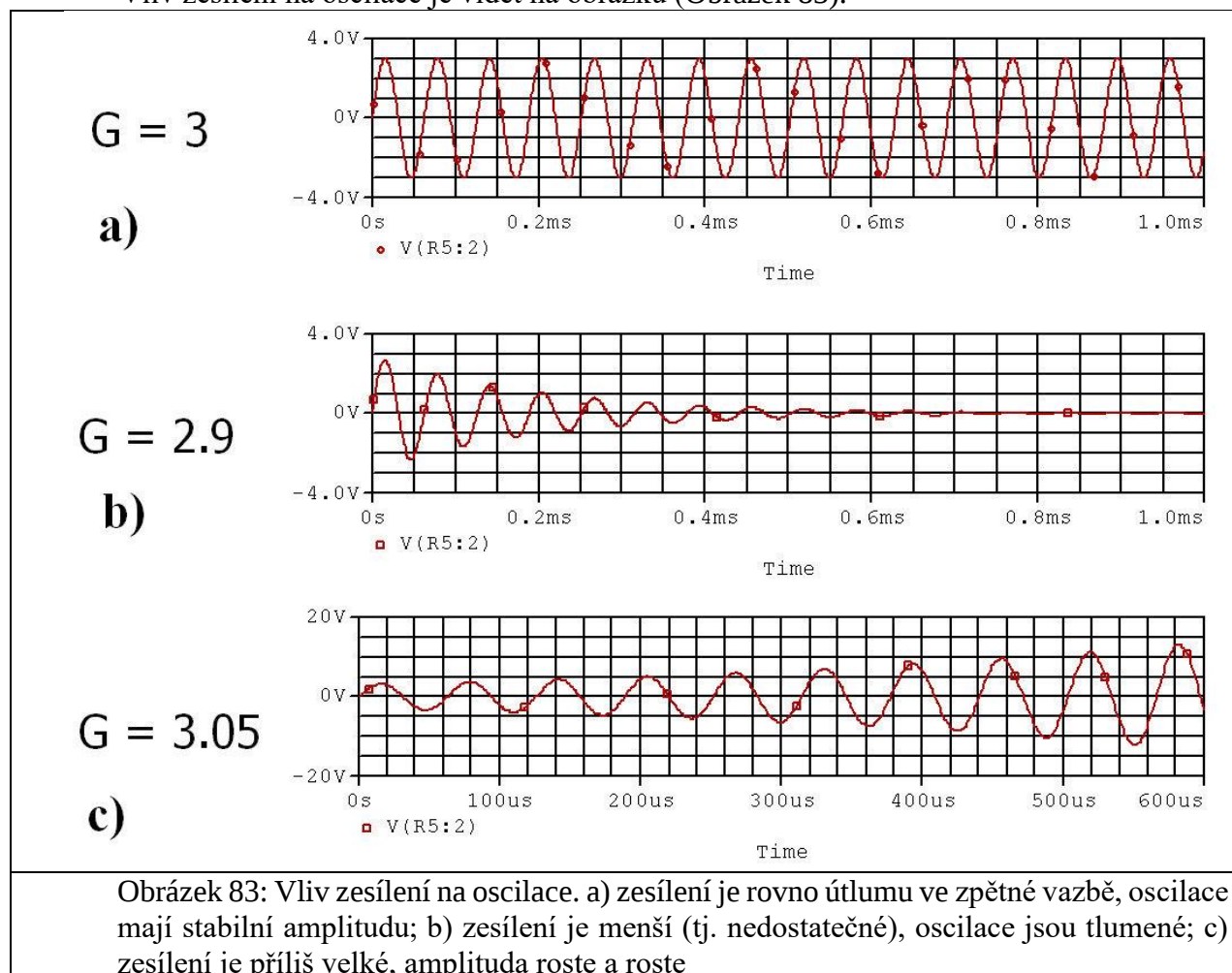
Nebylo by možné nastavit zesílení přesně a dlouhodobě tak, aby velikost amplitudy generovaného signálu byla konstantní, a zároveň aby signál nebyl zkreslený. Je-li totiž zesílení příliš velké, pak

$$\beta A > 1,$$

a amplituda se zvyšuje tak, že je generovaný signál zkreslený.

Je-li zesílení příliš malé, je
 $\beta A < 1$
 a oscilátor se vůbec nerozkmitá.

Vliv zesílení na oscilace je vidět na obrázku (Obrázek 83):



Proto je nutné regulovat zesílení automaticky. Používá se k tomu např. zapojení se žárovkou v záporné zpětné vazbě (Obrázek 82).

Když se výstupní napětí oscilátoru zvětšuje, vlákno žárovky se více zahřeje a zvětší se jeho odpor. Tím se zmenší poměr odporů R_2/R_1 v záporné zpětné vazbě, zesílení zesilovače se zmenší a zmenší se také amplituda a zkreslení výstupního signálu.

Místo žárovky může být použit termistor s kladným teplotním koeficientem (PTC = Positive Temperature Coefficient).

8.2.2 Nesinusové RC oscilátory

U těchto oscilátorů je zesílení zesilovače A tak velké a zpětná vazba β tak silná, že součin βA je mnohem větší než jedna. V takovém případě, jak ukazuje Obrázek 83c, amplituda výstupního napětí stále roste, až se ustálí na maximální hodnotě, která je obvykle dána napájecím napětím.

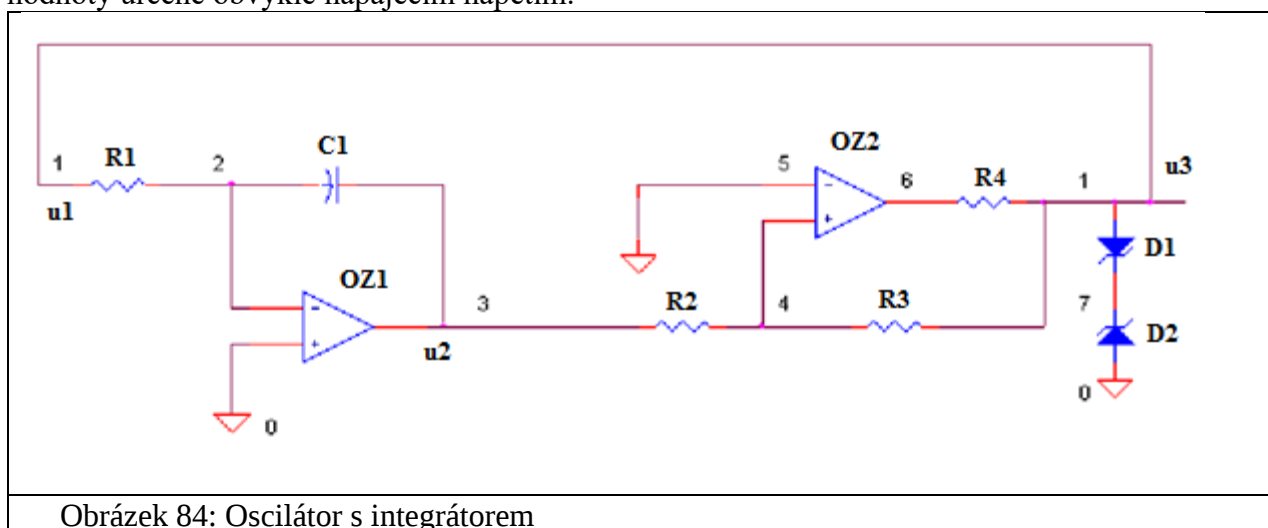
a) Oscilátor s integrátorem

Tento oscilátor (Obrázek 84) se skládá ze dvou hlavních částí: integrátoru (OZ1) a komparátoru s hysterezí (OZ2).

U komparátoru je pomocí rezistorů R_2 a R_3 zavedena kladná zpětná vazba. Díky ní má komparátor dvě rozhodovací úrovně. Vyšší rozhodovací úroveň je využita, když vstupní signál stoupá a protíná rozhodovací úroveň zdola nahoru. Nižší rozhodovací úroveň je využita, když vstupní signál klesá a protíná rozhodovací úroveň shora dolů.

Rozdíl mezi horní a dolní rozhodovací úrovní nazýváme hystereze.

U komparátoru žádná zpětná vazba neomezuje zesílení. Proto jakékoliv nepatrné napětí mezi vstupy "+" a "-" operačního zesilovače (OZ) se zesílí jeho nekonečným zesílením. V tomto zapojení proto OZ nemůže mít na svém výstupu jiné napětí, než maximální kladné nebo záporné, což jsou hodnoty určené obvykle napájecím napětím.



Obrázek 84: Oscilátor s integrátorem

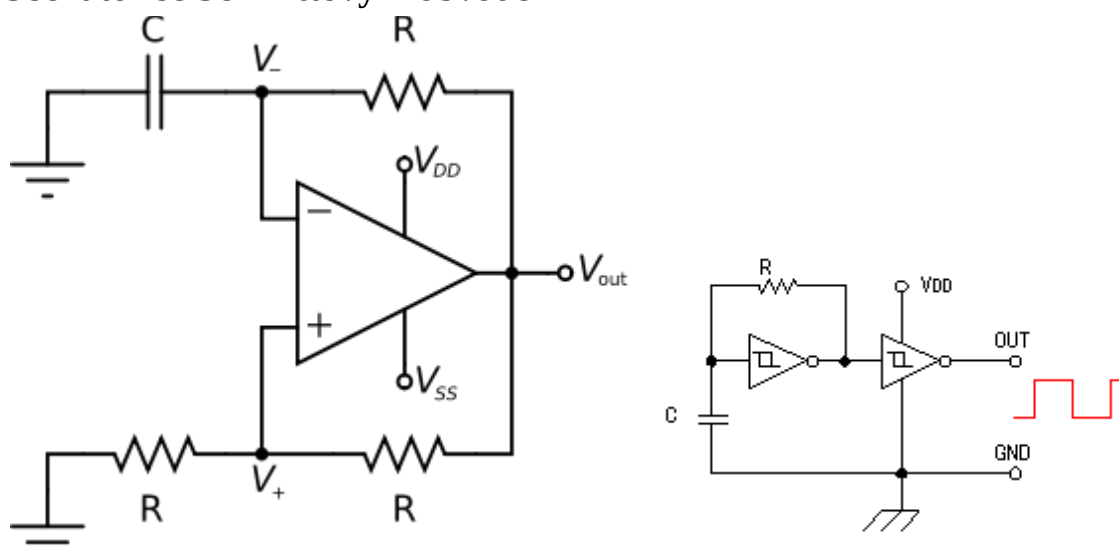
Diody D1, D2 v tomto zapojení omezují napětí v bodě 1 na hodnoty dané jejich Zenerovým napětím. Tím stabilizují obdélkové napětí, které z tohoto bodu budeme odebírat.

Řekněme, že odpory rezistorů R2 a R3 jsou takové, že horní rozhodovací úroveň komparátoru je +1 V, dolní rozhodovací úroveň -1 V (hystereze je tedy 2 V).

Dále řekněme, že na výstupu komparátoru je právě kladné napětí. Toto kladné napětí přes rezistor R1 nabíjí kondenzátor C1 tak, že jeho levý konec se stává kladnějším a pravý konec zápornějším. Napětí na výstupu OZ1 proto klesá. Až toto napětí klesne pod dolní rozhodovací úroveň, tj. pod -1 V, komparátor se překlápí a napětí na jeho výstupu se změní z kladného na záporné. Toto záporné napětí přes rezistor R1 nabíjí kondenzátor C1 tak, že jeho levý konec se stává zápornějším, pravý konec kladnějším. Napětí na výstupu OZ1 proto stoupá. Až stoupne přes horní rozhodovací úroveň, tj. přes +1 V, výstup komparátoru se překlápí opět na kladnou hodnotu a celý děj se bude stále opakovat.

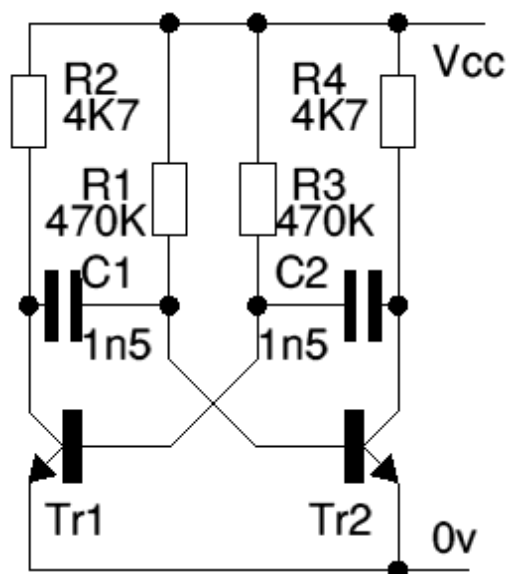
Napětí u2 bude mít trojúhelníkový průběh pohybující se mezi +1 V a -1 V. Napětí na výstupu OZ2 bude mít obdélkový průběh, jehož horní a dolní úrovně budou dány napájecím napětím. Napětí u3 bude mít obdobný obdélkový průběh, jehož horní a dolní úrovně budou dány Zenerovým napětím diod D1 a D2.

b) Oscilátor se Schmittovým obvodem



Obrázek 85: Oscilátory se Schmittovým obvodem

c) Multivibrátor



Obrázek 86: Multivibrátor

8.3 LC oscilátory

LC oscilátory často používají k zavedení zpětné vazby vzájemnou indukčnost mezi cívkami, které jsou uspořádány jako transformátor. Primární vinutí je zapojené na výstupu zesilovače (např. v kolektoru tranzistoru), sekundární vinutí je připojené na vstup zesilovače (např. do báze tranzistoru). Vzájemnou orientací primární a sekundární cívky dosáhneme toho, aby zpětná vazba byla kladná. Pokud zpětná vazba není kladná, přehodíme vývody na jedné z cívek.

Je-li jako zesilovací prvek použitý tranzistor v zapojení se společným kolektorem (který obrací fázi o 180°), pomocí transformátoru ve zpětné vazbě otočíme fázi o dalších 180°, a tím dosáhneme celkového fázového posunu 360°.

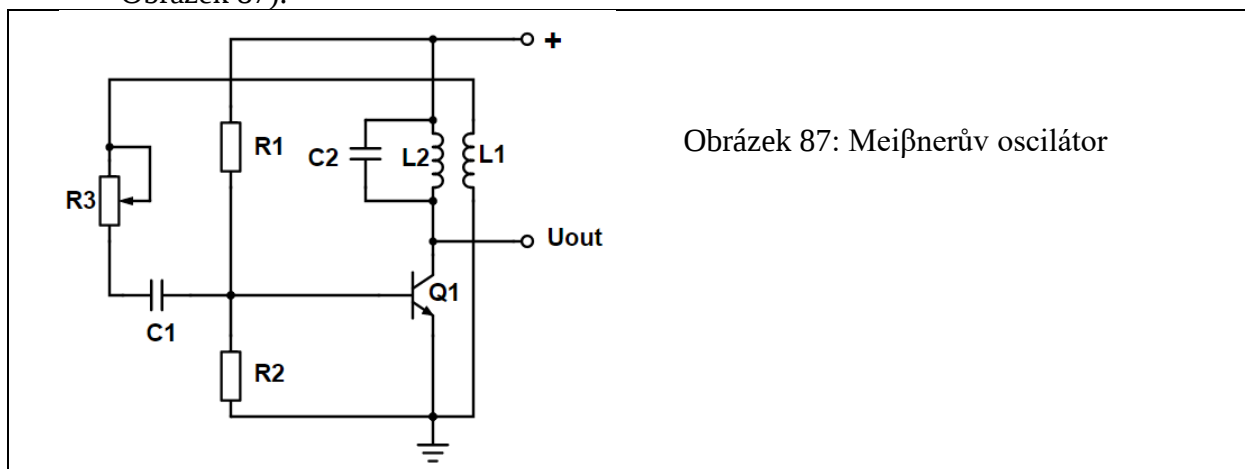
Obvody LC také určují kmitočet, na kterém oscilátor kmitá. Čím větší cívky a kondenzátory, tím pomalejší oscilátor, tím menší kmitočet, na kterém oscilátor kmitá. Vzorec pro výpočet kmitočtu takového oscilátoru se bude podobat tomuto:

$$f_{osc} = K \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Tento vzorec říká, že čím větší indukčnost, tím menší kmitočet, protože L je ve vzorci dole, pod lomítkem. Podobně kapacita: čím větší kapacita, tím menší kmitočet.

Typickým příkladem oscilátoru se zpětnou vazbou pomocí transformátoru je oscilátor Meißnerův (

Obrázek 87):



Obrázek 87: Meißnerův oscilátor

Rezonanční obvod je tvořen kondenzátorem C_2 a cívkou L_2 . Jejich hodnotami je tedy určen kmitočet, na kterém oscilátor kmitá:

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

Cívky L_1 , L_2 , tvoří transformátor. Jeho primárním vinutím je cívka L_2 .

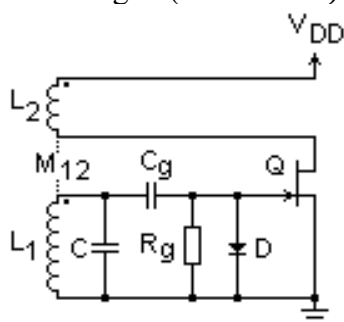
Zpětná vazba je zavedena induktivní vazbou mezi cívkami L_2 (primární) a L_1 (sekundární).

Fázová podmínka je zde splněna pomocí transformátoru: Tranzistor zavádí fázový posun 180° , transformátor dalších 180° , celkem tedy $180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$.

Stabilizace amplitudy je zde zajištěna takto:

Střídavým zpětnovazebním napětím, přicházejícím přes C_1 a R_3 na bázi tranzistoru, se v kladných půlvlnách pootevřít dioda přechodu báze – emitor tranzistoru. Při tom proteče tímto obvodem, a tedy i kondenzátorem C_1 , stejnosměrný proud. Tímto stejnosměrným proudem se C_1 nabije tak, že na jeho vývodu blíže k bázi (na obrázku jeho pravý konec) je zápornější napětí než na druhém vývodu, který je přes cívku L_1 a R_3 stejnosměrně uzemněný. Toto záporné napětí "pokazí" pracovní bod tranzistoru, klesne jeho zesílení a amplituda výstupního napětí se zmenší.

Dalším příkladem oscilátoru se zpětnou vazbou pomocí transformátoru je oscilátor Armstrongův (Obrázek 88):



Obrázek 88: Armstrongův oscilátor s laděným obvodem v řídicí elektrodě (tuned-gate)

Rezonanční obvod je tvořen kondenzátorem C a cívkou L_1 . Jejich hodnotami je tedy určen kmitočet, na kterém oscilátor kmitá:

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_1 C}}$$

Cívky L_1 , L_2 , tvoří transformátor. Jeho primárním vinutím je cívka L_2 .

Zpětná vazba je zavedena induktivní vazbou mezi cívkami L_2 (primární) a L_1 (sekundární).

Fázová podmínka je zde opět splněna pomocí transformátoru: Tranzistor zavádí fázový posun 180° , transformátor dalších 180° , celkem tedy $180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$.

Střídavým napětím na L_1C se díky diodě D kondenzátor C_g nabije tak, že má vlevo plus, vpravo minus. Jelikož je vlevo galvanicky uzemněný cívkou L_1 , napětí na jeho pravém konci má proti zemi zápornou stejnosměrnou složku a řídicí elektroda tranzistoru je tím zápornější, čím větší je střídavé napětí. Záporné napětí na řídicí elektrodě zmenšuje zesílení tranzistoru, a tím dochází ke stabilizaci amplitudy střídavého napětí: Větší vyráběné napětí zmenší zesílení, a to vyráběné napětí zmenší.

9. Záznam zvuku

9.1 Mechanický záznam

Mechanický záznam zvuku se používal u gramofonových desek.

Deska je vyrobena z plastu. Je na ní drážka v podobě spirály. Začátek záznamu je na vnějším okraji, konec u středu desky.

Drážka má mikroskopické nerovnosti. Deska se otáčí, jehla sleduje drážku a rozkmitává se podle nerovností v drážce. Kdybychom na jehlu připevnili membránu, kmitala by jako membrána reproduktoru a slyšeli bychom zvuk. Takto, bez elektroniky, fungovaly první gramofony.

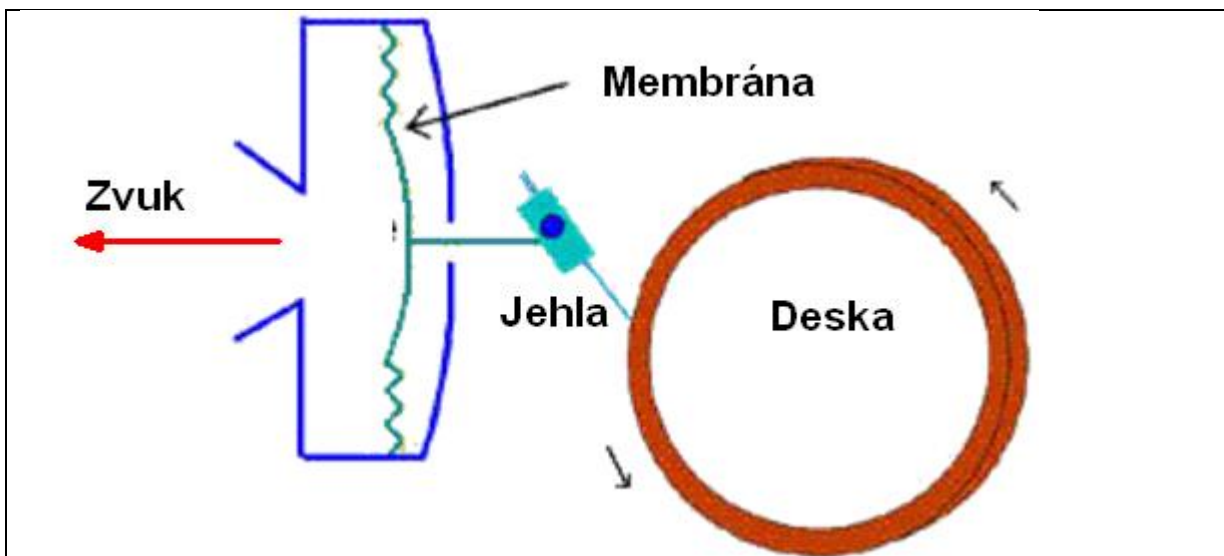
Když jehlu spojíme se systémem podobným mikrofону, dostaneme tzv. přenosku. Na výstupu přenosky je elektrický signál, odpovídající zaznamenanému zvuku. Ten můžeme zesílit a reprodukovat hlasitě.

Mechanický záznam je překonaný, už se skoro nepoužívá. Má tyto nevýhody:

- velké zkreslení
- špatný odstup signál/šum
- desky se přehráváním opotřebovávají
- citlivost na znečištění



Obrázek 89: Historický gramofon, gramofonové desky



Obrázek 90: Princip přenosky

9.2 Magnetický záznam

Magnetický záznam se používá v magnetofonech a videorekordérech.

Záznam se provádí na pásek z plastu, pokrytý magneticky tvrdým materiálem. Pásek se protahuje kolem záznamové hlavy. To je elektromagnet, do kterého se pouští elektrický signál odpovídající zvuku. Tímto signálem se pásek zmagnetuje podle zvuku.

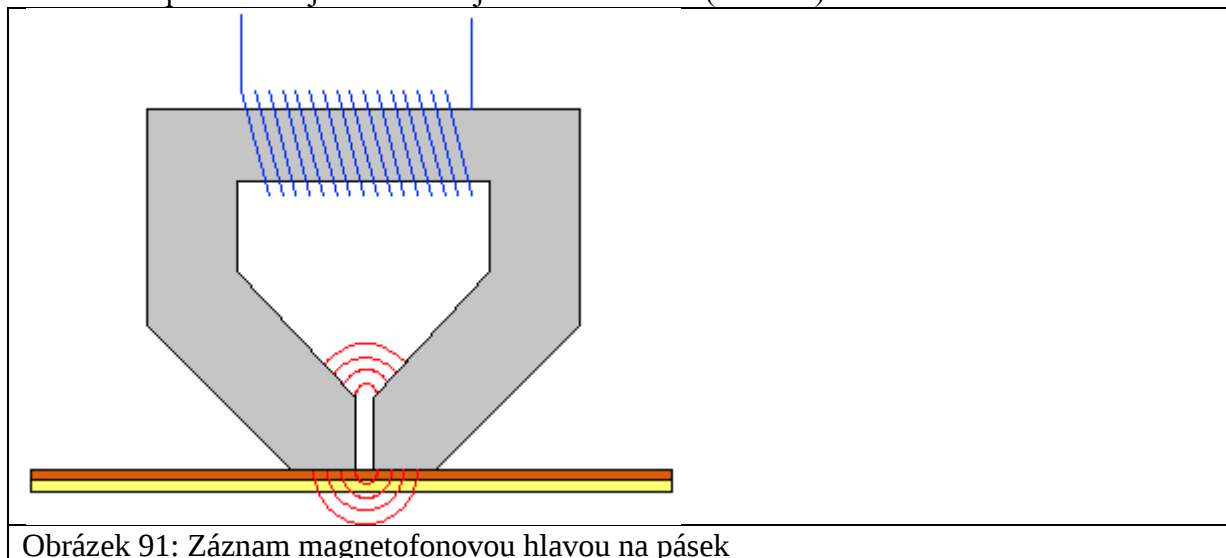
Při přehrávání se pásek protahuje kolem té samé hlavy, která teď funguje jako snímací. Zmagnetovaná místa na pásku indukují v cívce hlavy elektrické napětí odpovídající zaznamenanému zvuku.

Protože se stejná hlava používá pro záznam i snímání, říká se jí kombinovaná hlava.

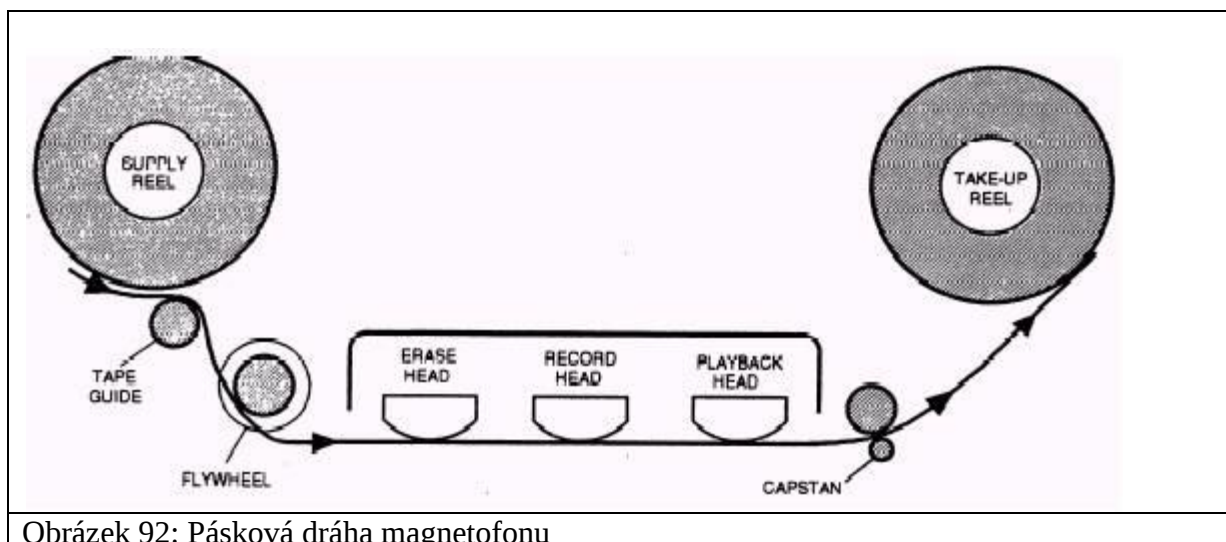
Před nahráváním nového záznamu se starý záznam musí smazat. Dá se smazat buď permanentním magnetem (jako když nechtě smažeme disketu), nebo vysokofrekvenčním magnetickým polem.

Při nahrávání tedy pásek prochází nejdříve kolem mazací hlavy, pak kolem kombinované (nahrávací).

Při přehrávání je v činnosti jen kombinovaná (snímací) hlava.



Obrázek 91: Záznam magnetofonovou hlavou na pásek



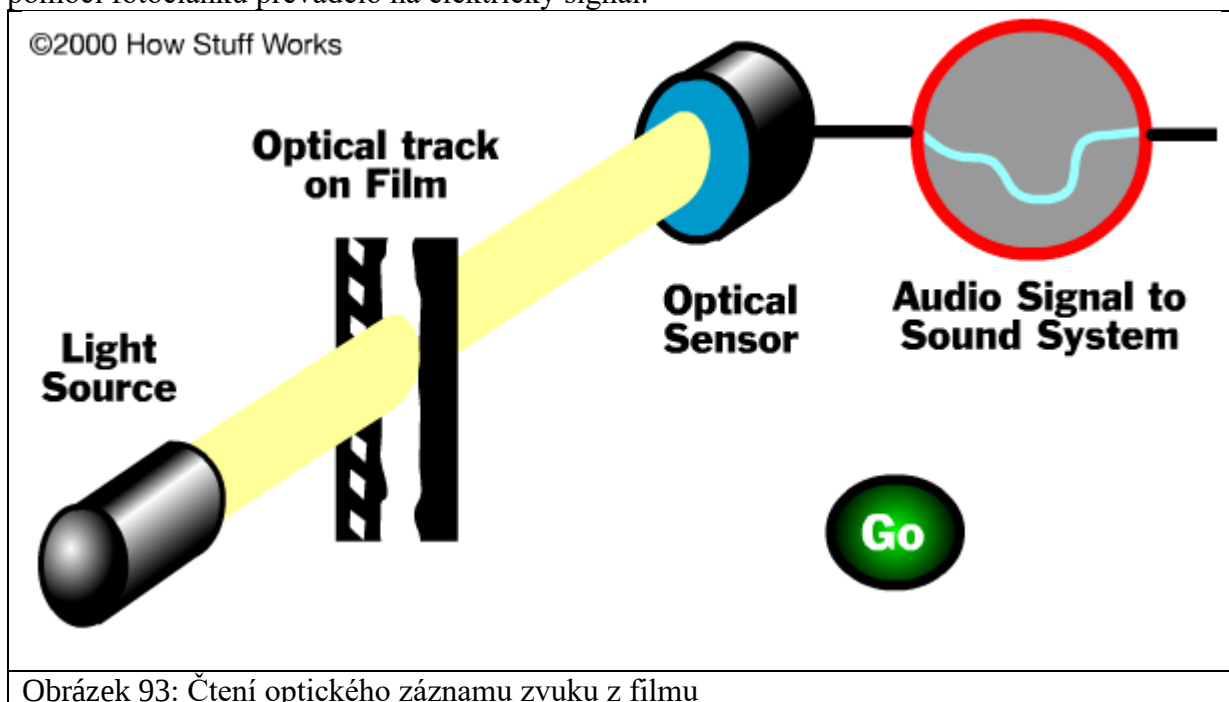
Obrázek 92: Pásková dráha magnetofonu

Stejný princip je použitý i v pevných discích. Záznam se neprovádí na pásek, ale na tuhý kotouč, pokrytý magnetickou vrstvou. Funkce všech tří hlav je sloučena do jedné, která provádí mazání, záznam i čtení.

9.3 Optický záznam

Optický záznam se používá ve filmu.

Zpočátku se používal analogový záznam. Vedle políček s obrazem byl vidět proužek s proměnnou průhledností. Ten se při promítání prosvětloval a světlo s proměnnou intenzitou se pomocí fotočlánku převádělo na elektrický signál.



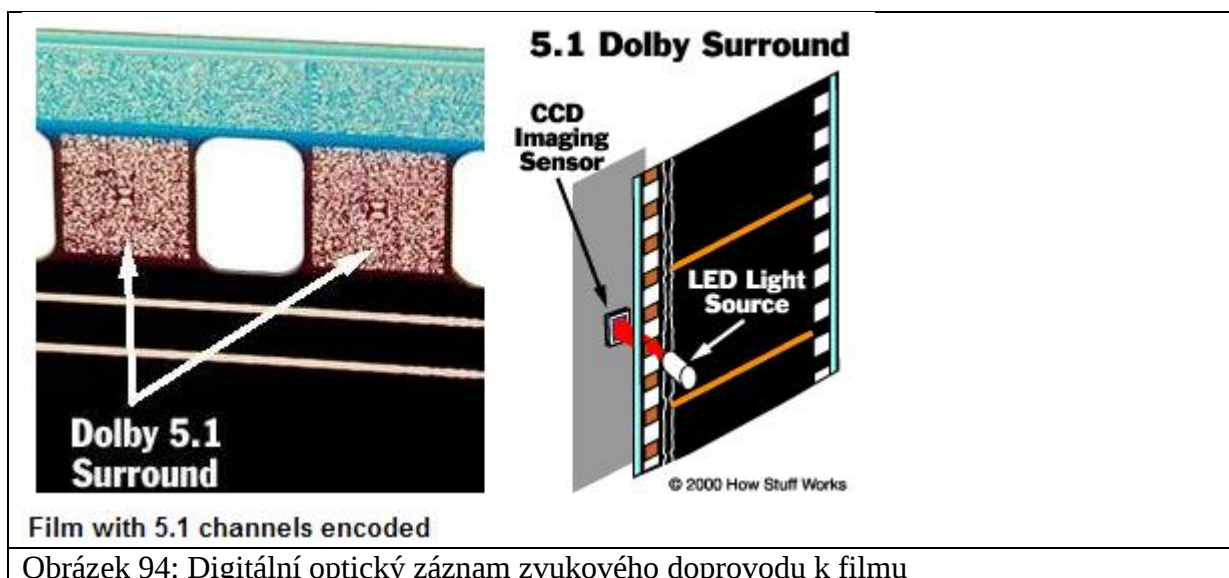
Obrázek 93: Čtení optického záznamu zvuku z filmu

Analogový záznam měl problémy s kvalitou a především s vícekanálovým zvukem. Proto se dělaly pokusy s magnetickým záznamem zvukového doprovodu k filmům. Vedle políček s obrázky byla stopa (stopy) s magnetickým záznamem. Tyto stopy se snímaly způsobem popsáním výše u magnetického záznamu.

Magnetický záznam zvuku u filmu měl velké problémy:

- malá trvanlivost (tlustý film poškozuje hlavy i magnetickou vrstvu)
- snadné poškození
- velká cena

Proto se dnes opět používá optický záznam, ale v digitální podobě.



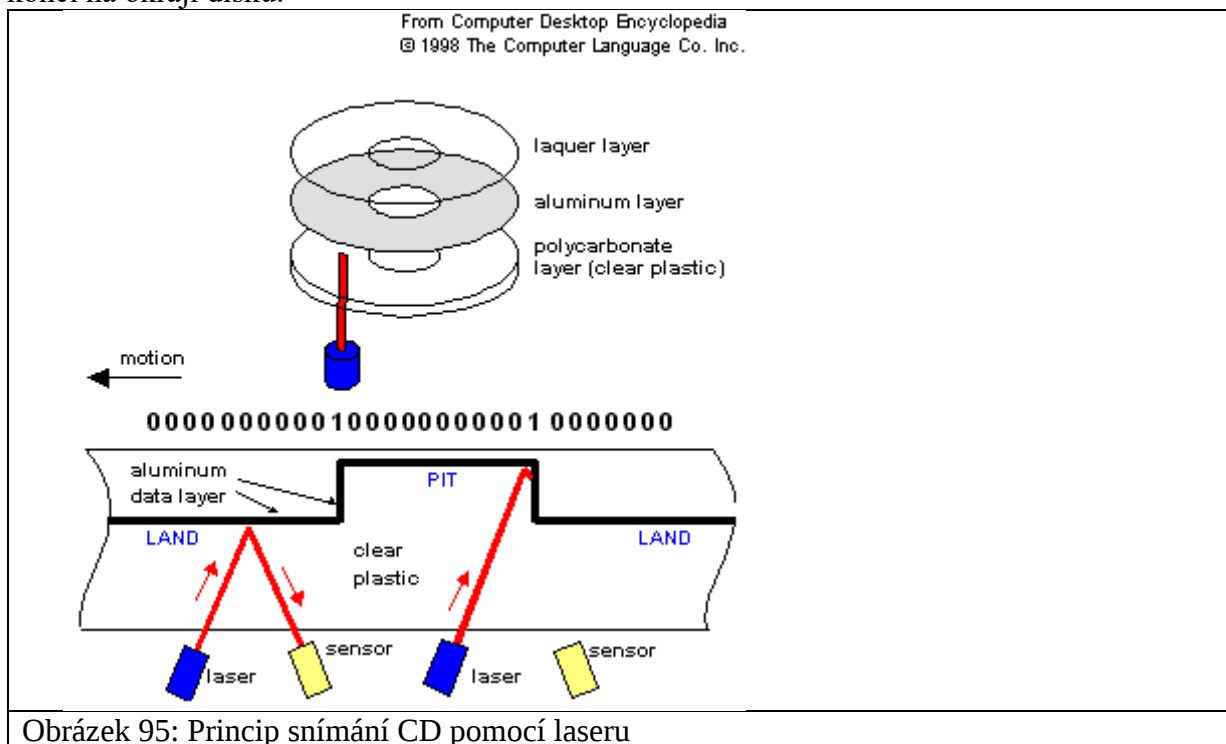
Obrázek 94: Digitální optický záznam zvukového doprovodu k filmu

9.4 Digitální záznam, CD

Při digitálním záznamu se analogový signál převede na sled čísel, která se zaznamenají na médium, kompaktní disk. Při reprodukci se pak zaznamenaná čísla čtou a převádějí se zpět na napětí.

Čísla jsou na CD zaznamenána v podobě důlků v hladké lesklé vrstvě. Při snímání se povrch CD osvětluje laserem a zachycuje se odražené světlo. Od hladké vrstvy (land) se paprsek odrazí, od důlku (pit).

Záznam na CD je uspořádaný do spirály, která je asi 5km dlouhá. Záznam začíná u středu, končí na okraji disku.



Obrázek 95: Princip snímání CD pomocí laseru

Záznam zvuku na CD má tyto výhody:

- vysoká kvalita
- odolnost proti poškození
- možnost kopírování bez ztráty kvality
- velká kapacita
- malé rozměry

10. Zařízení pro reprodukci zvuku

11. Rádioový přenos

11.1 Definice

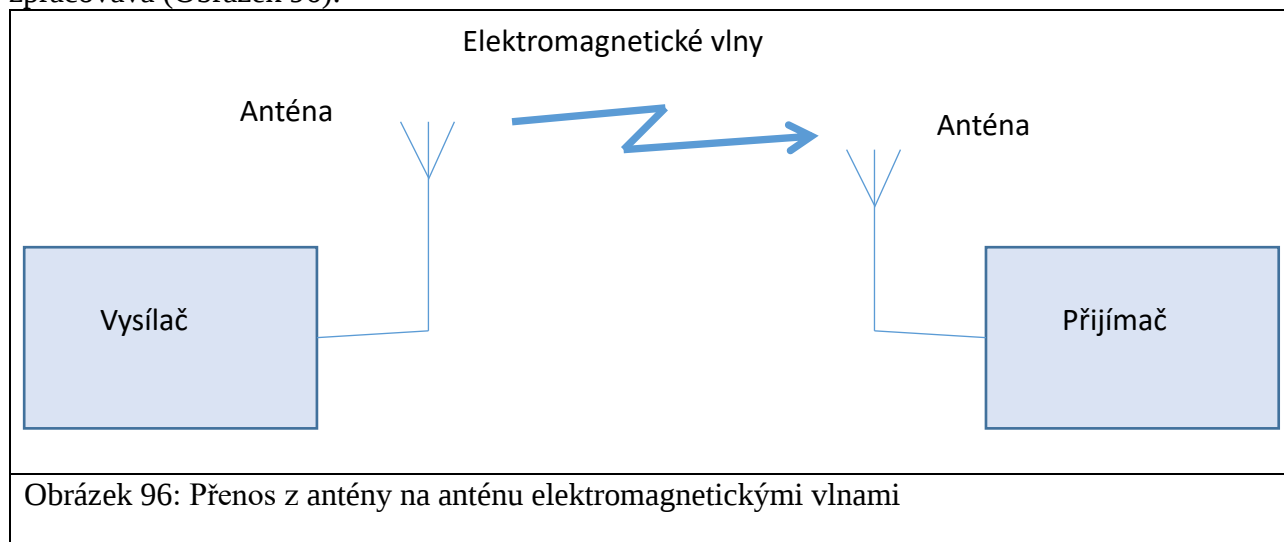
Rádiová komunikace je předávání informací pomocí rádiových signálů (elektromagnetických vln).

Příklady spojení:

- rozhlas
- televize
- navigace
- telemetrie
- mobilní telefon

11.2 Princip

Vysílač vysílá pomocí antény elektromagnetické vlny, které se šíří prostorem. Příjímač pomocí své antény toto elektromagnetické vlnění přijímá, mění je na elektrické napětí, a to dále zpracovává (Obrázek 96).

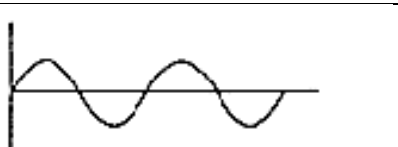
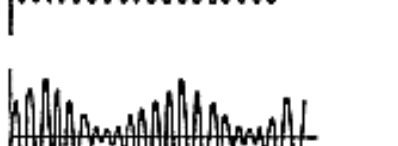
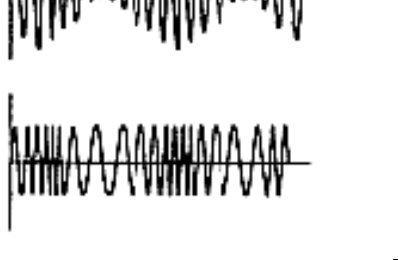


Nízkofrekvenční signál např. z mikrofonu není možno pouštět do antény přímo. Jeho kmitočet je na to moc malý, vlnová délka moc velká, antény by vycházely obrovské. A i kdyby to šlo, vysílat by mohl jen jeden vysílač, protože každý další už by jej rušil.

Proto se nízkofrekvenční signál (Obrázek 97a) „posadí na záda“ tzv. nosnému vysokofrekvenčnímu signálu (Obrázek 97b). Odborně řečeno, vysokofrekvenční signál se moduluje signálem nízkofrekvenčním. Tento nosný vysokofrekvenční signál má velký kmitočet, tj. malou vlnovou délku, proto antény pro něj vycházejí malé. Kromě toho můžeme pro přenosy použít nejrůznější kmitočty a provozovat mnoho vysílačů, které se vzájemně neruší.

11.3 Modulace

Při amplitudové modulaci mění modulovaný vysokofrekvenční signál svoji velikost (amplitudu) podle velikosti nízkofrekvenčního signálu (Obrázek 97c). Tím v sobě nese informaci, kterou obsahuje nízkofrekvenční signál, např. informaci o zvuku.

Modulating Signal		a) Nízkofrekvenční signál, např. z mikrofonu
Carrier		b) Nosný vysokofrekvenční signál
Amplitude Modulated Carrier		c) Vysokofrekvenční signál modulovaný nízkofrekvenčním (amplitudově)
Frequency Modulated Carrier		d) Vysokofrekvenční signál modulovaný nízkofrekvenčním (kmitočtově)
Obrázek 97: Namodulování nízkofrekvenčního signálu na nosný vysokofrekvenční signál		

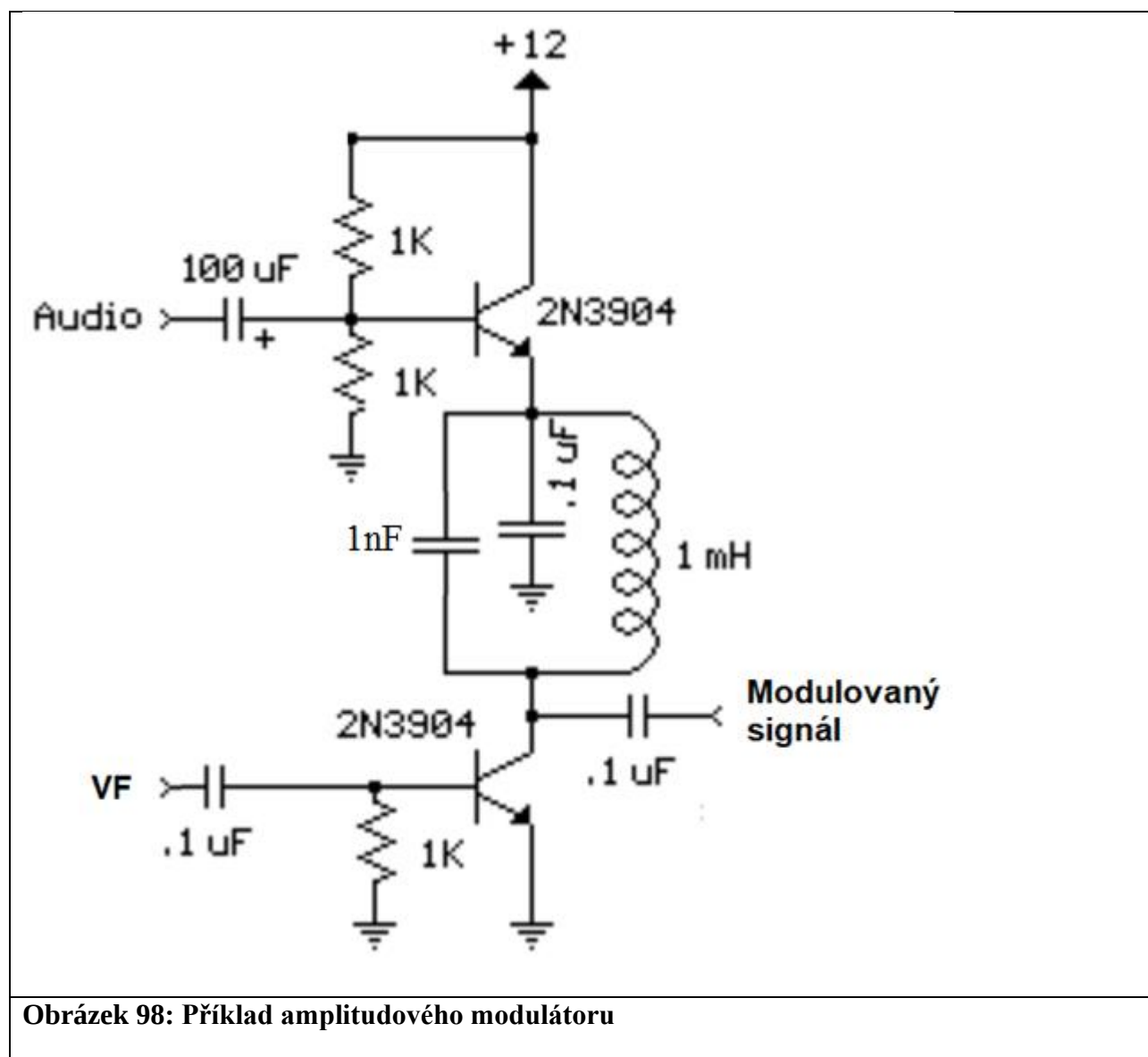
Při kmitočtové modulaci mění modulovaný vysokofrekvenční signál svůj kmitočet (frekvenci) podle velikosti nízkofrekvenčního signálu (Obrázek 97d).

11.3.1 Příklad amplitudového modulátoru

Horní tranzistor mění v rytmu audio signálu napájecí napětí pro dolní vf zesilovač.

Tím se mění amplituda vf signálu, tj. signál se amplitudově moduluje.

Kondenzátor 0,1 uF uprostřed rezonančního obvodu uzemňuje emitor pro vf signál, na nf signál nemá vliv.

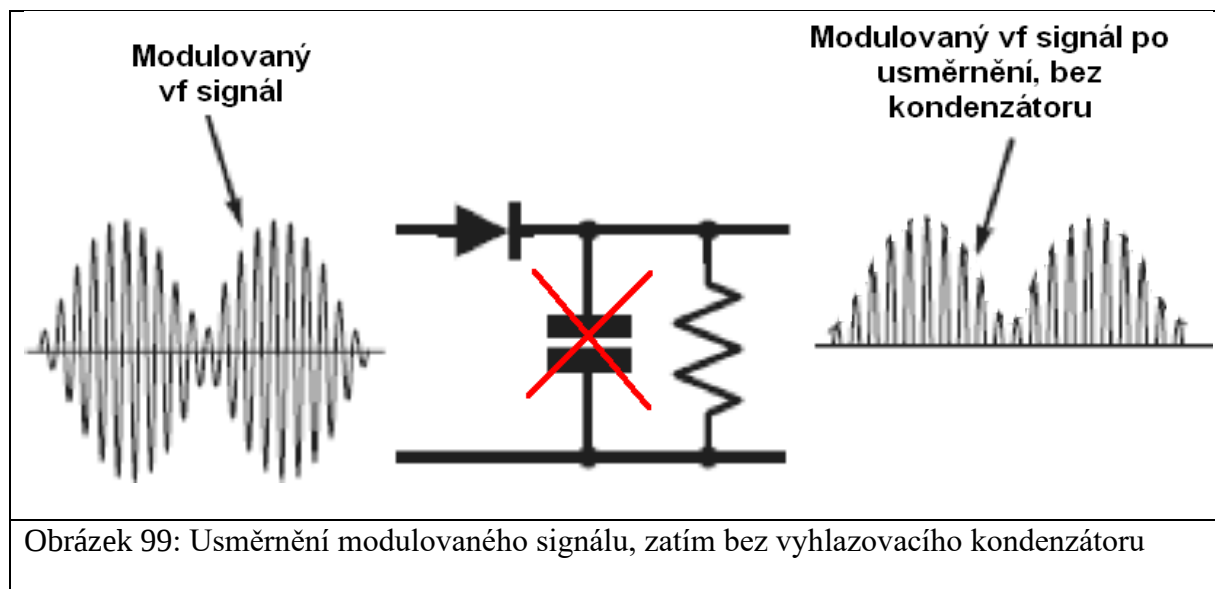


Obrázek 98: Příklad amplitudového modulátoru

11.4 Demodulace

11.4.1 Demodulátor AM

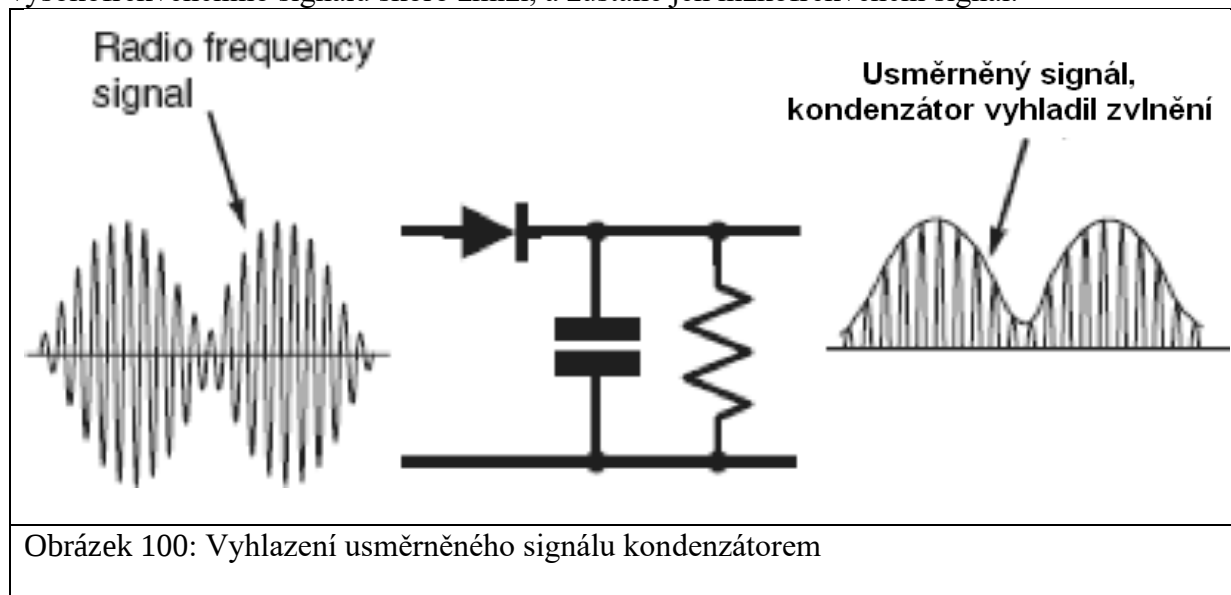
Na přijímací straně je zapotřebí oba signály opět oddělit: vysokofrekvenční vykonal svoji práci a je teď už zbytečný. Nízkofrekvenční signál je to, co jsme chtěli přenést. Musíme jej z modulovaného signálu dostat, zesílit a přivést do reproduktoru. Odtud uslyšíme to, co na vysílací straně říkají do mikrofону.



V modulovaném signálu vidíme tu informaci, kterou jsme do něj vkládali, tj. původní nf signál. Kdybychom ale takový signál pustili do sluchátek, nic bychom neslyšeli, protože kladné půlvlny se ruší stejně velkými půlvlnami zápornými.

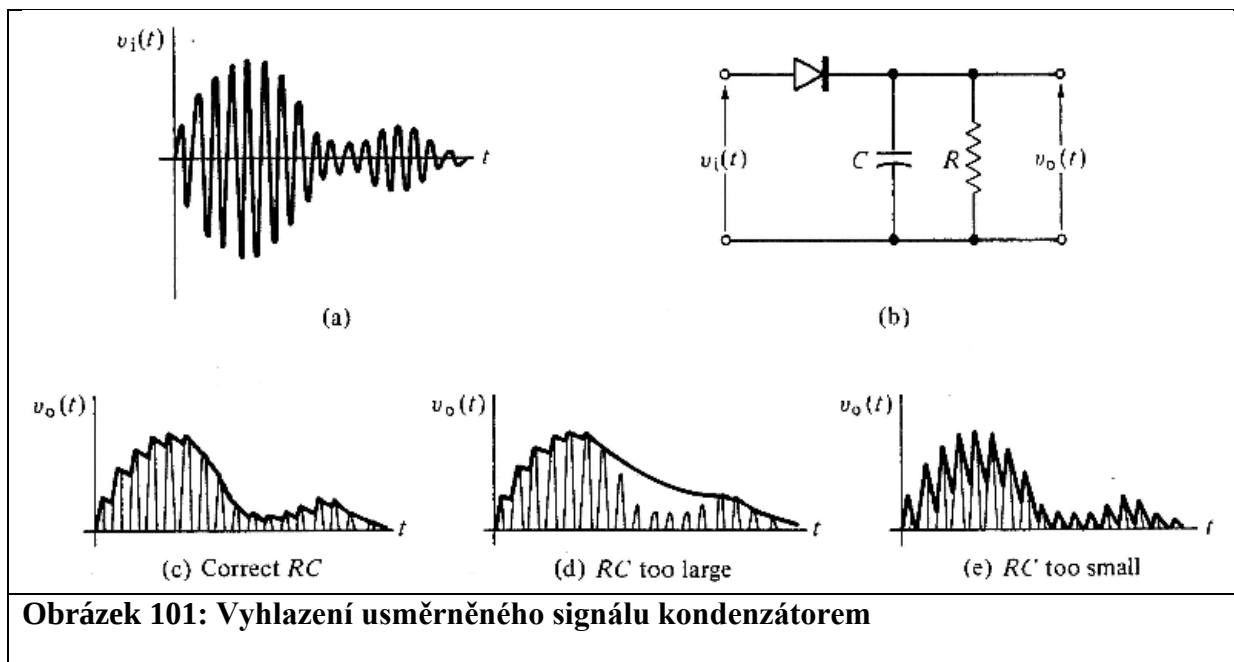
Modulovaný signál usměrníme (Obrázek 99), zatím bez toho kondenzátoru, který tam je škrtnutý. To už je lepší. Jenže sluchátka tento usměrněný signál stále ještě nezahrají, protože stále obsahuje příliš velké zbytky nosného signálu.

Doplníme-li teď ten kondenzátor (Obrázek 100), vysoký kmitočet nosného vysokofrekvenčního signálu skoro zmizí, a zůstane jen nízkofrekvenční signál.



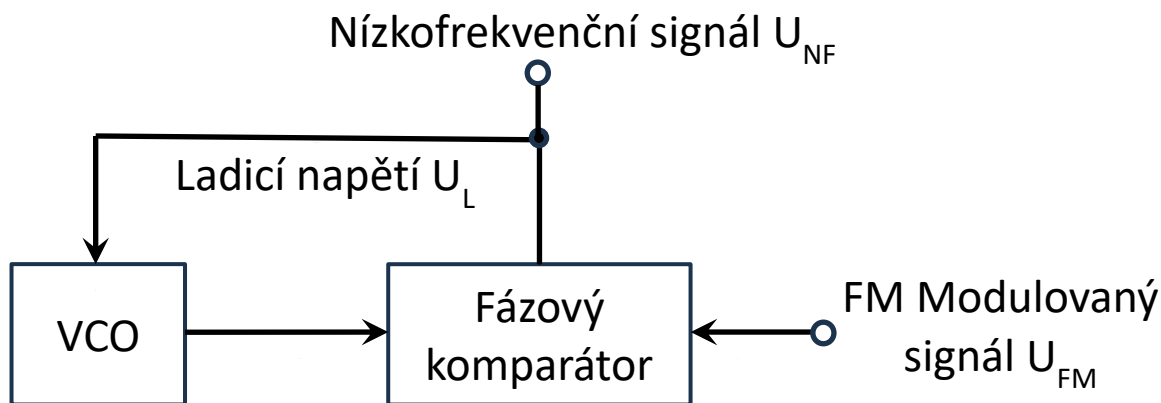
Viz **Obrázek 101**, kde vidíme

- c) kapacita kondenzátoru je optimální
- d) kapacita je příliš velká, zeslabuje vysoké tóny nf signálu
- e) kapacita je příliš malá, filtrace je neúčinná



11.4.2 Demodulátor FM

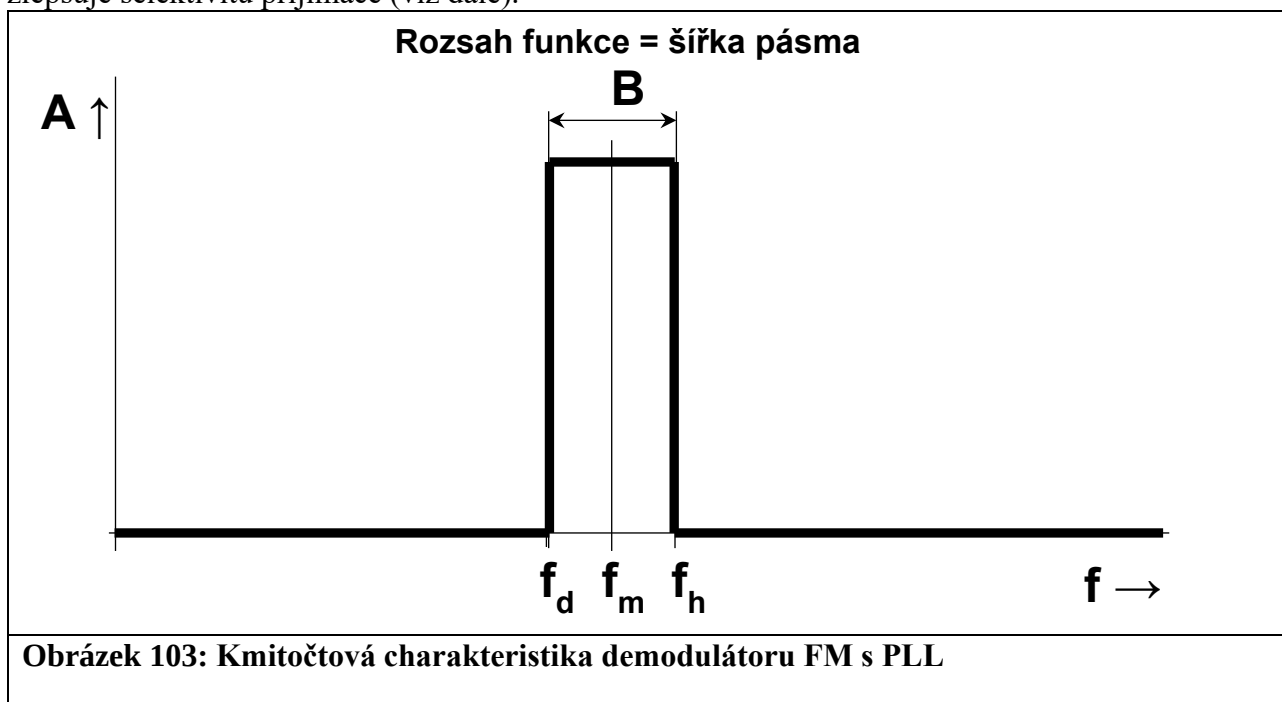
Pro demodulaci kmitočtově modulovaného signálu FM se často používá princip fázového závěsu - PLL (**Obrázek 102**):



Obrázek 102: Demodulátor FM na principu PLL

Fázový závěs je schopný naladit **VCO** na stejný kmitočet, jaký přichází zprava do fázového komparátoru. Budeme-li tedy zprava přivádět do fázového komparátoru signál s proměnným kmitočtem, tj. kmitočtově modulovaný, **VCO** bude stále doladován tak, aby jeho kmitočet byl stejný jako ten zprava. Ladicí napětí U_L se musí stále měnit tak, aby oba kmitočty byly shodné. U_L se tedy mění v rytmu toho signálu, kterým je signál U_{FM} modulován, tj. v rytmu signálu nízkofrekvenčního. Na výstupu fázového komparátoru je tedy demodulovaný nízkofrekvenční signál U_{NF} .

Celý systém má svůj nějaký střední kmitočet, kolem kterého je schopen fungovat. Na obrázku (**Obrázek 103**Obrázek 1) je tento kmitočet pojmenovaný f_m , protože se předpokládá, že demodulátor bude zpracovávat mezifrekvenční kmitočet v superhetu (viz dále). Ale kmitočty nižší než f_d a vyšší než f_h už systém nezpracuje. Pracuje jen v rozsahu kmitočtů, označeném **B** (Bandwidth). Když tedy demodulátor zpracovává jen určité pásmo kmitočtů, ostatní (nežádoucí) kmitočty potlačuje a tím zlepšuje selektivitu přijímače (viz dále).



11.5 Přijímače

Vlastnosti rozhlasových přijímačů

- frekvenční rozsahy
- citlivost
- selektivita
- frekvenční charakteristika
- výstupní výkon

ad a.

Frekvenční rozsahy komerčních rozhlasových přijímačů

Např. DV, SV, KV, VKV.

ad b.

Citlivost přijímače je schopnost přijímat slabé signály.

ad c.

Selektivita je schopnost přijímače vybrat ze všech signálů na vstupu jen žádoucí signál.

Vyjádření

- křivkou
- číselně, např. $B_{3dB} = 9 \text{ kHz}$

ad d.

Frekvenční charakteristika vyjadřuje schopnost přijímače přenášet užitečný nf signál. Je to závislost výstupního výkonu na modulačním kmitočtu.

ad e.

Výstupní výkon je maximální výstupní výkon, při němž zkreslení není větší než 10% (3% pro hi-fi).

Citlivost vs. selektivita

Řekli bychom, že nejdůležitější vlastností přijímače bude citlivost, tj. schopnost přijímat i vzdálené slabé vysílače. Ale pokud přijímač nebude mít zároveň dobrou selektivitu, bude příjem rušený mnoha nežádoucími stanicemi, které právě poslouchat nechceme.

Proto musíme oba parametry řešit společně.

11.5.2 Druhy přijímačů

Podle způsobu modulace

- AM
- FM
- AM + FM

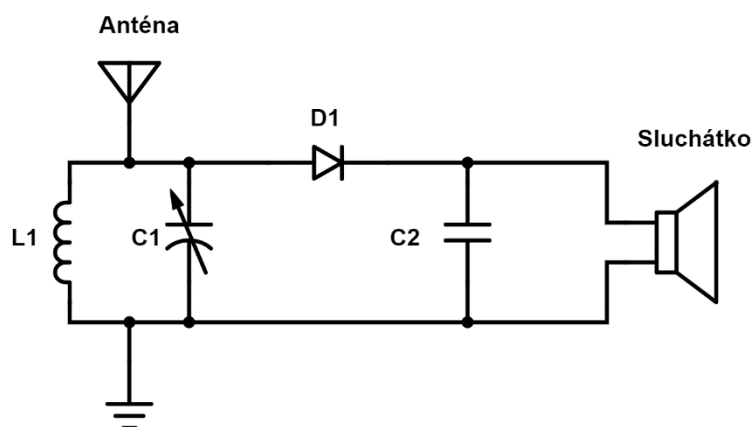
Podle funkčního principu

- detektorové – bez zesílení (krystalka)
- s přímým zesílením
- s nepřímým zesílením (superhet)

11.5.3 Detektorový přijímač bez zesílení – krystalka

Říkalo se mu krystalka podle krystalu galenitu, používaného dříve jako dioda. Pouze pasivně přijímá, nemá žádné aktivní prvky, žádné napájení. Obsahuje ale všechny základní moduly přijímače:

- anténa
- laděný obvod
- demodulátor
- elektroakustický měnič



Obrázek 14: Schéma krystalky

Funkce

Anténa zachytí elektromagnetické vlny a přemění je na elektrický signál.

Rezonanční obvod L_1C_1 vybere ze všech kmitočtů z antény především jeden, daný Thomsonovým vzorcem:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 * C_1}}$$

Pomocí proměnného kondenzátoru C_1 je možno přijímač přeladovat.

Dioda D_1 provede demodulaci amplitudově modulaného signálu.

Kondenzátor C_2 funguje jako dolní propust: odstraní vysokofrekvenční složku z demodulovaného signálu.

Sluchátko přemění elektrický signál na slyšitelný zvukový signál. Musí mít velkou impedanci, aby příliš nezatěžovalo předchozí obvody. Tím by se snižovala citlivost přijímače. Používala se sluchátka „radiová“, „radistická“ s impedancí $4000\ \Omega$.

Nevýhody

- Malá citlivost, protože přijímač obsahuje jen pasivní prvky, nemá žádné zesílení. Lze přijímat jen silné blízké vysílače.
- Špatná selektivita, protože přijímač obsahuje jen jediný laděný obvod, který je navíc tlumený přímým připojením antény a demodulátoru.

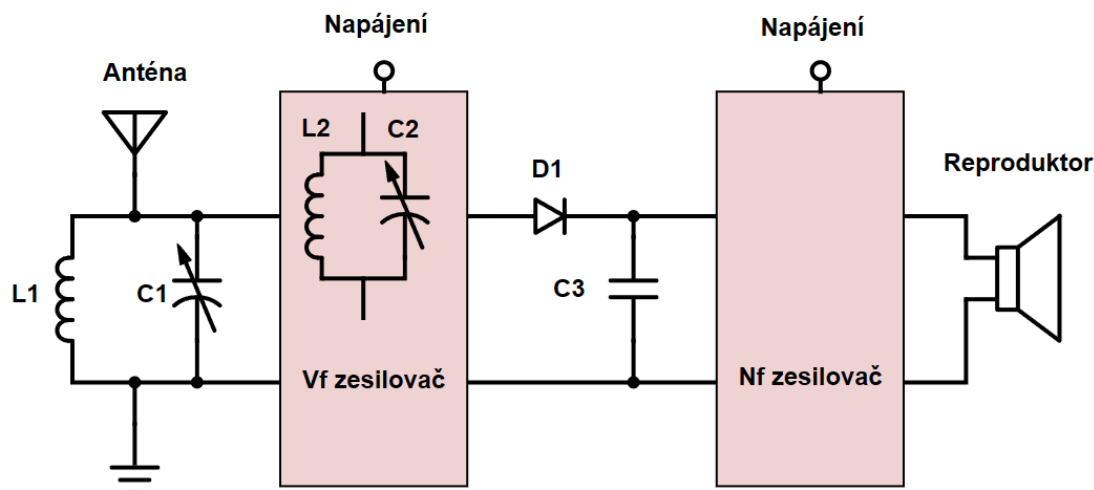
11.5.4 Přijímač s přímým zesílením

Název přijímače je odvozen od toho, že cesta signálu od antény k demodulátoru je přímá: Vf signál postupuje přímo, nemění se jeho charakter (kmitočet). Mění se pouze jeho amplituda.

Přijímač už má aktivní prvky (tranzistory) a napájení. Na výstupu může být reproduktor. Pro zlepšení selektivity a citlivosti se někdy používá kladná zpětná vazba.

Oproti krystalce má přidáný jeden nebo více vysokofrekvenčních zesilovačů. Tyto zesilovače mohou být laděné, čímž se zlepší selektivita.

Za demodulátor je možno vložit nízkofrekvenční zesilovač. To umožní použít reproduktor místo sluchátek.



Obrázek 14: Blokové schéma přijímače s přímým zesílením

Funkce

Signál zachycený anténou a vybraný laděným obvodem je zesílen ve vf zesilovači nebo zesilovačích.

Díky zesílenému vf napětí je diodový demodulátor účinnější, protože se tolik neuplatňuje prahové napětí diody.

Nízkofrekvenční zesilovač zesílí signál z demodulátoru a umožní dosažení výkonu potřebného pro reproduktor.

Nevýhody

- Pro dobrou selektivitu a citlivost je nutný vícestupňový vf zesilovač. Synchronní přeladování více stupňů je technicky náročné. Je těžké dosáhnout toho, že všechny stupně se přeladují stejně. Vícestupňový zesilovač je náchylný k rozkmitání.
- Při kapacitním ladění je selektivita na horním konci pásma mnohem horší než na dolním konci.

- S kladnou zpětnou vazbou je obsluha komplikovaná a při nastavení příliš silné kladné zpětné vazby se přijímač rozkmitá.

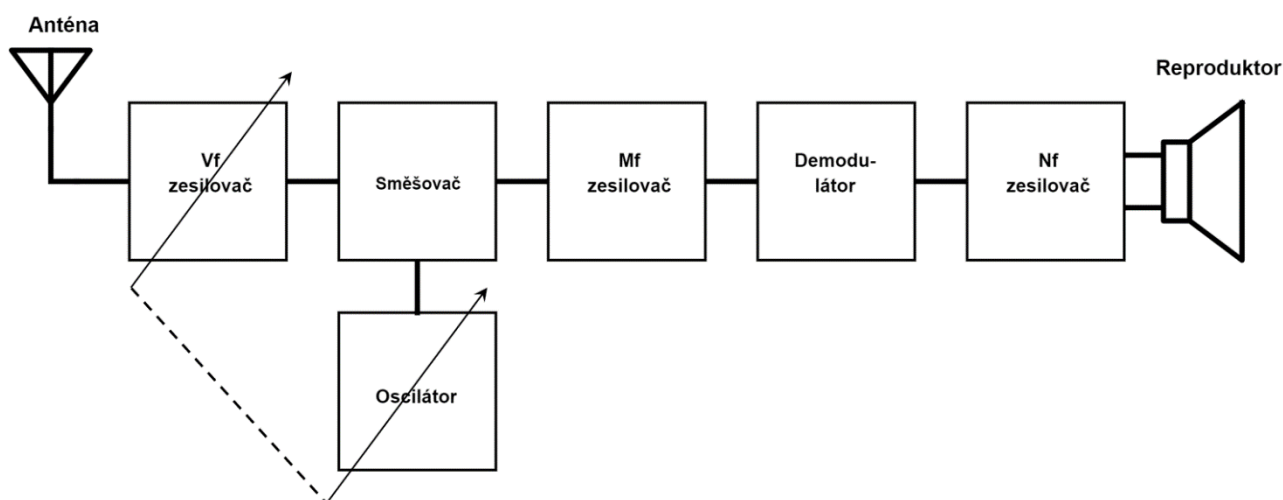
11.5.5 Přijímač s nepřímým zesílením – superhet

a) Princip

Signál od antény k demodulátoru nepostupuje přímo, mění se jeho základní vlastnost – kmitočet. Proto název „... s nepřímým zesílením“.

Problémy, kterými trpí předchozí konstrukce, se řeší tak, že selektivita a zesílení se soustředí především do jediného bloku, mezifrekvenčního zesilovače. Ten pracuje na jediném, stále stejném kmitočtu. Není tedy přeladitelný, proto se u něj snadno dosáhne potřebné šířky pásma i zesílení.

Přeladitelný zůstává vstupní vf zesilovač, na jehož selektivitu a zesílení už tolik nezáleží, protože tyto vlastnosti jsou soustředěny do mf zesilovače.



Obrázek 14: Blokové schéma superhetu

b) Funkce

Šipky přes vf zesilovač a oscilátor naznačují, že tyto bloky jsou přeladitelné. Čárkovaná čára mezi šipkami naznačuje, že oba bloky jsou přeladované současně. Oscilátor je laděn tak, že jeho kmitočet se od vstupního kmitočtu stále liší o konstantu, tzv. mezifrekvenční kmitočet.

Dříve se přeladovalo pomocí proměnného dvojitého kondenzátoru, nyní se používají varikapy. Varikapy umožňují snadnější přeladování. Kromě toho s varikapy je možno mít více obvodů přeladovaných současně a tím zlepšit selektivitu.

Ze všech vstupních kmitočtů (stanic) se ve vstupním obvodu vybere jeden. Z něj a z kmitočtu oscilátoru se ve směšovači vyrobí tzv. mezifrekvence.

Směšovač je obvod, který ze dvou vstupních kmitočtů vyrobí jejich rozdíl – mezifrekvenční kmitočet. Je-li např. kmitočet přijímané stanice 100 MHz, mezifrekvenční kmitočet má být 10,7 MHz, oscilátor musí být pro tuto stanici naladěn na 110,7 MHz:

$$f_{osc} - f_p = f_{mf}$$

$$110,7 \text{ MHz} - 100 \text{ MHz} = 10,7 \text{ MHz}$$

Mf signál jde ze směšovače do mf zesilovače. Mf zesilovač zesiluje jen jediný kmitočet, není nutno jej přeladovat.

Za mf zesilovačem už následují obvyklé bloky: demodulátor a nf zesilovač.

c) Výhody

- Velké a stabilní zesílení v celém pásmu vstupních kmitočtů.
- Výborná selektivita, nezávislá na přeladování.
- Mezifrekvenční zesilovač, který je určující pro zesílení a selektivitu přijímače, pracuje na jediném kmitočtu, nemusí se přeladovat.
- Stačí přeladovat jen dva obvody: vstupní obvod a oscilátor => jednoduchost a reprodukovatelnost.

11.6 Digitální rádio

Programy rozhlasových stanic se šíří digitální formou dvěma hlavními způsoby:

- internetové rádio
- vysílání DAB

11.6.1 Rozdíly mezi internetovým rádiem a DAB

Vlastnost	DAB (Digital Audio Broadcasting)	Internetové rádio
Způsob přenosu	Pozemní vysílání přes rádiové vlny	Přenos přes internet (IP protokol)
Přijímač	Speciální DAB rádio nebo autorádio s DAB tunerem	Jakékoli zařízení s internetem (mobil, PC, chytré rádio)
Kvalita zvuku	Stabilní kvalita (HE-AAC komprese)	Může kolísat podle rychlosti internetu
Dostupnost	Omezené na oblasti s DAB vysílači	Celosvětová dostupnost (pokud je internet)
Datová spotřeba	Bez datové spotřeby , funguje zdarma	Spotřebovává data , závisí na rychlosti připojení
Nabídka stanic	Omezená na stanice v DAB multiplexu	Obrovský výběr stanic z celého světa
Odolnost proti rušení	Stabilní signál, ale závisí na pokrytí	Závislé na kvalitě internetového připojení
Zpoždění (latence)	Malé (několik sekund)	Větší (i desítky sekund) kvůli internetovému přenosu

11.6.2 Internetové rádio

Internetové rádio využívá ke svému přenosu síť internet, prostřednictvím IP protokolu. Dá se přijímat jakýmkoliv zařízením s internetem, např. PC, mobil, chytré internetové rádio.

Poskytuje nepřeborný výběr stanic s dostupností na celém světě. Podmínkou příjmu je jen připojení k internetu. Kvůli internetovému přenosu může mít příjem zpoždění (latenci) za vysíláním až desítky sekund.

O internetovém přenosu se učíme podrobně v předmětu Technické vybavení počítačů.

11.6.3 Rádio DAB

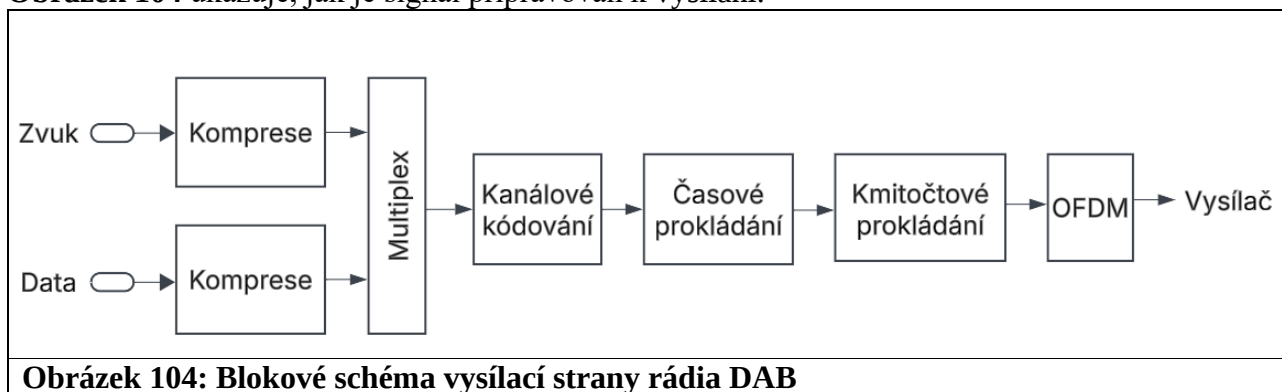
Digitální rádio DAB (Digital Audio Broadcasting) přenáší zvuk v digitální podobě, což má velké výhody, uvidíme dále. Zvuk i pomocná data se komprimují. Více stanic se multiplexuje (spojí) do jednoho signálu. Vysílá se pomocí OFDM modulace, která zvyšuje odolnost proti rušení.

Vysílání rádia DAB probíhá v pásmu VHF III (174–240 MHz), které původně bylo využito pro televizní vysílání.

Pásmo VHF (87,5–108 MHz), které se používá pro analogové FM rádio, bude ve vzdálené budoucnosti využito jinak, ještě se neví, jak. Např. se uvažuje o jeho využití pro mobilní komunikace, bezdrátový internet nebo jiné digitální služby.

a) Vysílač DAB

Obrázek 104 ukazuje, jak je signál připravován k vysílání:



Funkce jednotlivých bloků:

Komprese

Zvuk i pomocná data se komprimují, aby se snížil objem přenášených dat. Je to podobný proces, jako známé „zipování“ souborů. Ke komprimaci se ale používají jiné normy. Pro komprimaci zvuku je to např. norma MPEG.

Multiplexování

Multiplexer je součástka nebo zařízení, které má dva nebo více vstupů a jeden výstup. Umí na svůj výstup střídavě připínat signály ze svých vstupů. Zde se tak dva proudy (zvuk a data) spojí do jednoho, protože musíme jednou anténou vysílat jen jediný kanál.

Kanálové kódování

V tomto stupni se k signálu přidávají redundantní¹ informace, které potom pomohou při rekonstrukci dat narušených šumem nebo poruchami po cestě.

Prokládání

Při přípravě signálu DAB k vysílání se používá dvou druhů tzv. prokládání: **časové a kmitočtové**. Účelem obou je zamezit ztrátám souvislých bloků dat, protože takové chyby se těžko nahrazují.

Vysíláme např. slovo ABCDEF. Vysíláme písmeno po písmenu tak, jak jdou písmena za sebou. Jednotlivá písmena vysíláme sice pro jistotu každé na jiném kmitočtu, ale kmitočty jsou seřazené tak, že např. A se vysílá na nejnižším, F na nejvyšším kmitočtu. Nastane-li v **čase** porucha přenosu, postihne sousední písmena, např. takto: AB__EF. Nastane-li porucha některých **kmitočtů**, budou to pravděpodobně kmitočty sousední, a opět budou postižená sousední písmena, např. AB__EF. Při poškození sousedních písmen se porucha těžko opravuje.

Když ale rozhodíme písmena **časově**, tj. vysíláme je v jiném pořadí, např. DAEBFC, a zároveň je podobně rozhodíme po vysílacích **kmitočtech**, pak porucha dvou sousedních vysílaných písmen, např. DA__FC, ve výsledném znovu poskládaném slově vypadá takto: A_CD_F. Obě poruchy jsou sice v jednom slově, ale daleko od sebe, a proto se budou snadněji opravovat.

Časové prokládání chrání data proti poruše v určitém **čase**, na rozdíl od kmitočtového prokládání (viz dále), které chrání proti poruše na určitém **kmitočtu**.

Příklad:

Kdyby u Hustopeč nad Bečvou 28. února 2025 nejelo 17 vagónů s benzenem v jednom vlaku, ale bylo rozloženo do více vlaků, katastrofa by neměla tak hrozné ekologické a ekonomické následky. Odpovídalo by to časovému prokládání (vagony nejedou současně) i kmitočtovému prokládání (jedou v různých vlcích a jinými trasami).

¹ redundantní = navíc, které nejsou nezbytné

Tabulka 2 ukazuje příklad takového prokládání na úryvku textu:

Zvuk i pomocná data se komprimují, aby se snížil objem přenášených dat. Je to podobný proces, jako známé „zipování“ souborů. Ke komprimaci se ale používají jiné normy. Pro komprimaci zvuku je to např. norma MPEG.	tnobnuPžvré eaeijkJot cřiZlp.íuc poh d ráá tGea rmnůaupmio p m ip“ý imr kku šbvo íosoapmm.a mooís,žMzn ksntro kj iéuirřl jczpe io „jsoes,jacino yýape .rieunevíome.paázeeoa a rddosbKpnmocabnn Em ook. ynPáemv
a)	b)
Tabulka 2: Příklad prokládání a) Původní text, přenášený vcelku, v původním pořadí. Poruchou při přenosu bylo zničeno celé slovo „zipování“. Oprava bude složitá nebo nemožná, je těžké chybějící slovo si domyslet. b) Text upravený prokládáním. Písmena ze slova „zipování“ jsou zvýrazněna tučným písmem. Poruchou opět vypadlo celé slovo, „yýape“, ale ze slova „zipování“ teď chybí jen jediné písmeno: „zi_ování“. Proto bude snadné toto slovo si domyslet. Podobně snadné to bude i s ostatními slovy, která byla výpadkem „yýape“ postižena.	

Časové prokládání

Při časovém prokládání se data rozsekají na malé kousky, které se pak nevysílají popořádku, ale v jiném pořadí, rozházené. Při příjmu se pak kousky poskládají podle stejného kódu, podle kterého byly rozházeny, a tak jsou opět ve správném pořadí.

Kmitočtové prokládání

Při kmitočtovém prokládání se malé kousky dat vysílají na různých kmitočtech, a to ještě tak, že sousední kousky dat se nevysílají na sousedních kmitočtech. Když dojde k poruše na sousedních kmitočtech, nezpůsobí to poškození souvislého úseku dat, ale opět náhodně rozházených kousků. K vysvětlení můžeme znovu použít výše uvedený příklad (**Tabulka 2**) s tím, že místo rozházení po různých časech budeme mluvit o rozházení po různých kmitočtech.

Kmitočtové prokládání je příprava dat pro OFDM modulaci, viz dále.

Modulace OFDM¹

Každý vysílač potřebuje pro svoje vysílání svůj „prostor v éteru“. Odborněji – potřebuje pásmo kmitočtů určité šířky, neboli určitou šířku pásma.

Pro rozhlasové vysílače AM je šířka pásma, které vysílač potřebuje, přibližně 10 kHz.

Když například vysílač AM vysílá na nosném kmitočtu 1 MHz (1 000 kHz), jeho signál bude zabírat šířku pásma od 995 kHz do 1 005 kHz.

Pro analogové TV vysílání je šířka pásma signálu přibližně 7 MHz. Pokud by např. vysílání probíhalo na frekvenci 500 MHz, šířka pásma, kterou by tento signál zabíral, by byla přibližně 7 MHz. To znamená, že signál by zabíral pásmo od 497 MHz do 504 MHz.

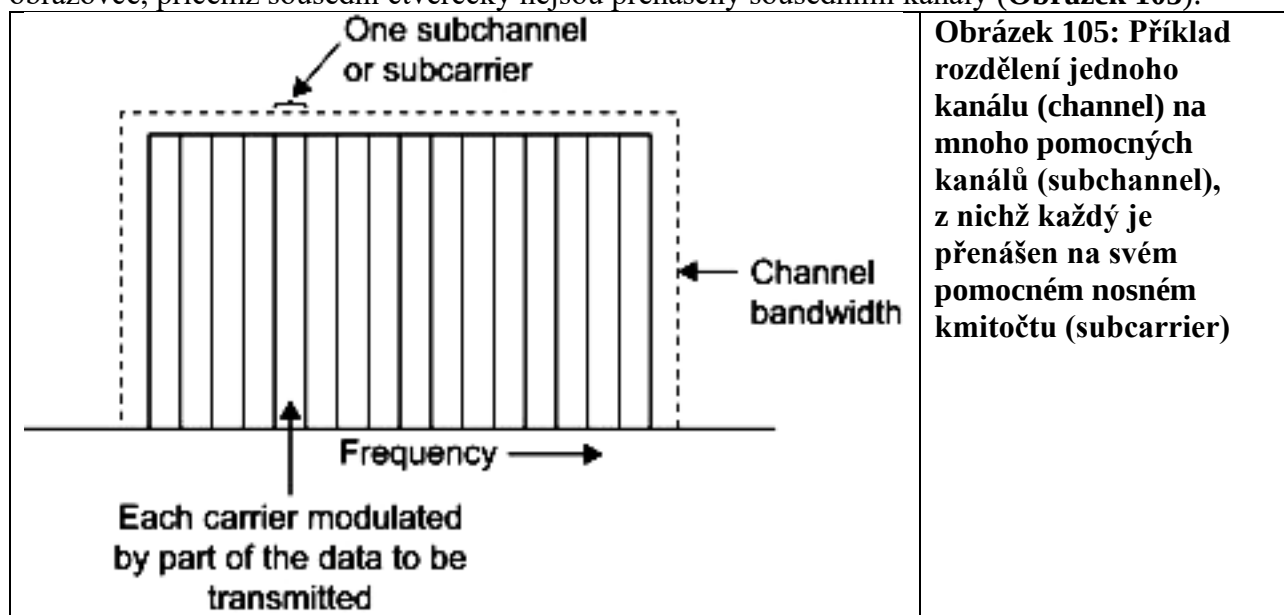
V klasických analogových systémech se pro všechny části signálu využije celé kmitočtové pásmo. Je to podobné, jako kdybychom celý náklad naložili do jedné lodi a odeslali najednou. Při poruše je tedy ohrožen vždy celý náklad.

Modulace OFDM využije šířku pásma, kterou má k dispozici, jinak.

Např. šířku kanálu 7 MHz, kterou má k dispozici pro televizi, rozdělí na mnoho pomocných kanálů, a každý z nich přenáší na samostatném pomocném nosném kmitočtu. Přenášená data rozhází do těchto pomocných kanálů tak, jak bylo popsáno v odstavci o kmitočtovém prokládání.

¹ OFDM = Orthogonal Frequency Division Multiplexing = Ortogonální frekvenční dělení vícecestného přenosu

Můžeme si představit, že každý z těchto pomocných kanálů přenáší jeden malý čtvereček na obrazovce, přičemž sousední čtverečky nejsou přenášeny sousedními kanály (**Obrázek 105**):

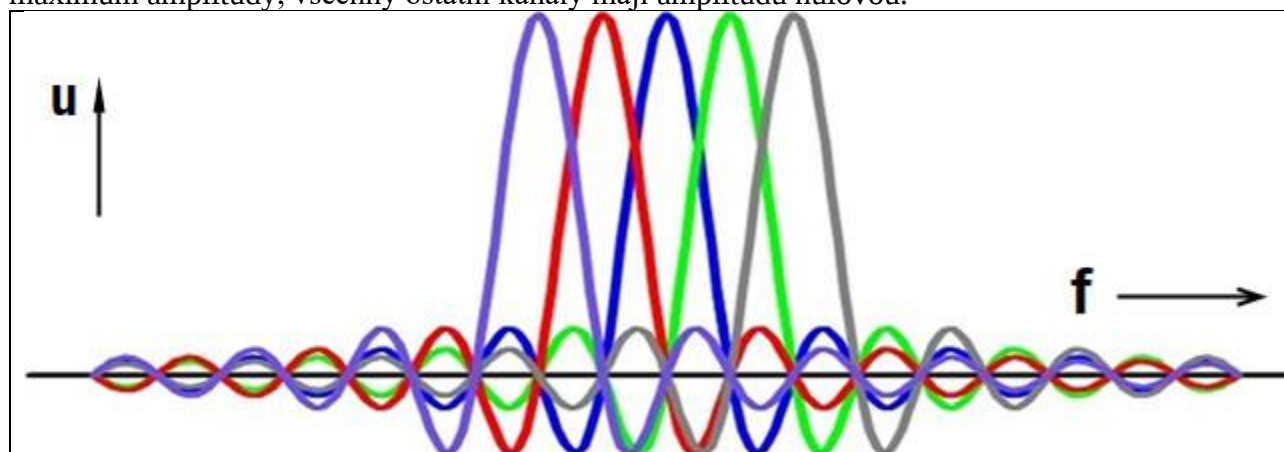


Teď je to podobné, jako kdybychom celý náklad rozdělili na mnoho malých částí, a každou tu část přepravovali samostatnou loďkou po jiné řece (a také v jiném čase, ještě je zde časové prokládání).

U rádia DAB/DAB+ je šířka pásma jednoho vysílacího kanálu přibližně 1,536 MHz, tj. 1 536 kHz. Celé pásmo je rozděleno na 1 536 pomocných kanálů, z nichž každý má šířku 1 kHz.

Slovo „Orthogonal“ ve zkratce OFDM znamená „pravoúhlý“. To ve spojení s kmitočty nedává moc smysl, že. To slovo zde neoznačuje „kolmost, 90°, pravý úhel“, ale to, že ty signály mají speciální matematické vlastnosti. To znamená, že kmitočty jsou tak šikovně zvolené, že přesto, že jsou namačkány těsně na sobě, a dokonce se částečně překrývají, vzájemně se neruší.

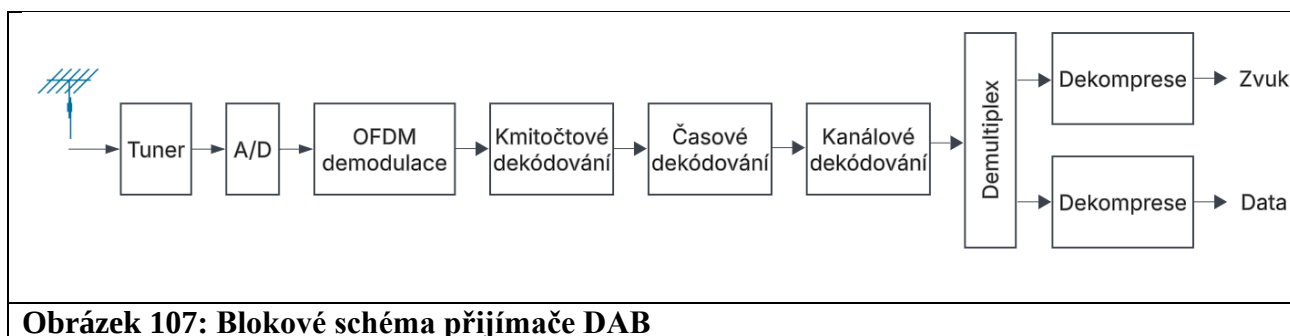
Obrázek 106 pomůže s vysvětlením. Pomocné nosné kmitočty jsou voleny tak, že na tom kmitočtu, kde jeden pomocný kanál má maximum amplitudy, všechny ostatní pomocné kanály mají amplitudu nulovou. Všimněme si v obrázku jedné barvy, třeba modré. Tam, kde modrý kanál má maximum amplitudy, všechny ostatní kanály mají amplitudu nulovou.



Obrázek 106: OFDM – na tom kmitočtu, kde jeden pomocný kanál má maximální amplitudu, všechny ostatní pomocné kanály mají amplitudu nulovou.

b) Přijímač DAB

Obrázek 107 ukazuje blokové schéma přijímače DAB. Při zpracování signálu v přijímači je zapotřebí udělat v obráceném pořadí opak těch operací, které jsme se signálem dělali před vysíláním.



Obrázek 107: Blokové schéma přijímače DAB

Tuner

Tuner je klasický rozhlasový přijímač, jak byl popsán např. v části o superhetu. Vybere kmitočet, signál zesílí a připraví pro další zpracování.

A/D

Analogově – digitální převodník. Převod do digitální podoby, ve které bude probíhat veškeré další zpracování.

OFDM demodulace

Demoduluje všechny pomocné kanály, na které byl signál namodulován před vysíláním.

Kmitočtové dekódování

Poskládá zpět kousky signálu, které byly před vysíláním rozházeny po různých pomocných kmitočtech.

Časové dekódování

Poskládá zpět do správného pořadí kousky signálu, které byly před vysíláním rozházeny v náhodném pořadí.

Po tomto zpětném kmitočtovém a časovém poskládání máme tedy rekonstruovaný tok signálu, ve kterém jsou ještě vložené redundantní (navíc) informace pro detekci a opravu chyb.

Kanálové dekódování

Podle přidáných redundantních informací se najdou a opraví chyby.

Po všech těchto operacích je k dispozici původní signál, bez redundantních informací, bez chyb, ale ještě komprimovaný, a navíc ještě stále je namixovaný zvuk dohromady s daty.

Demultiplex

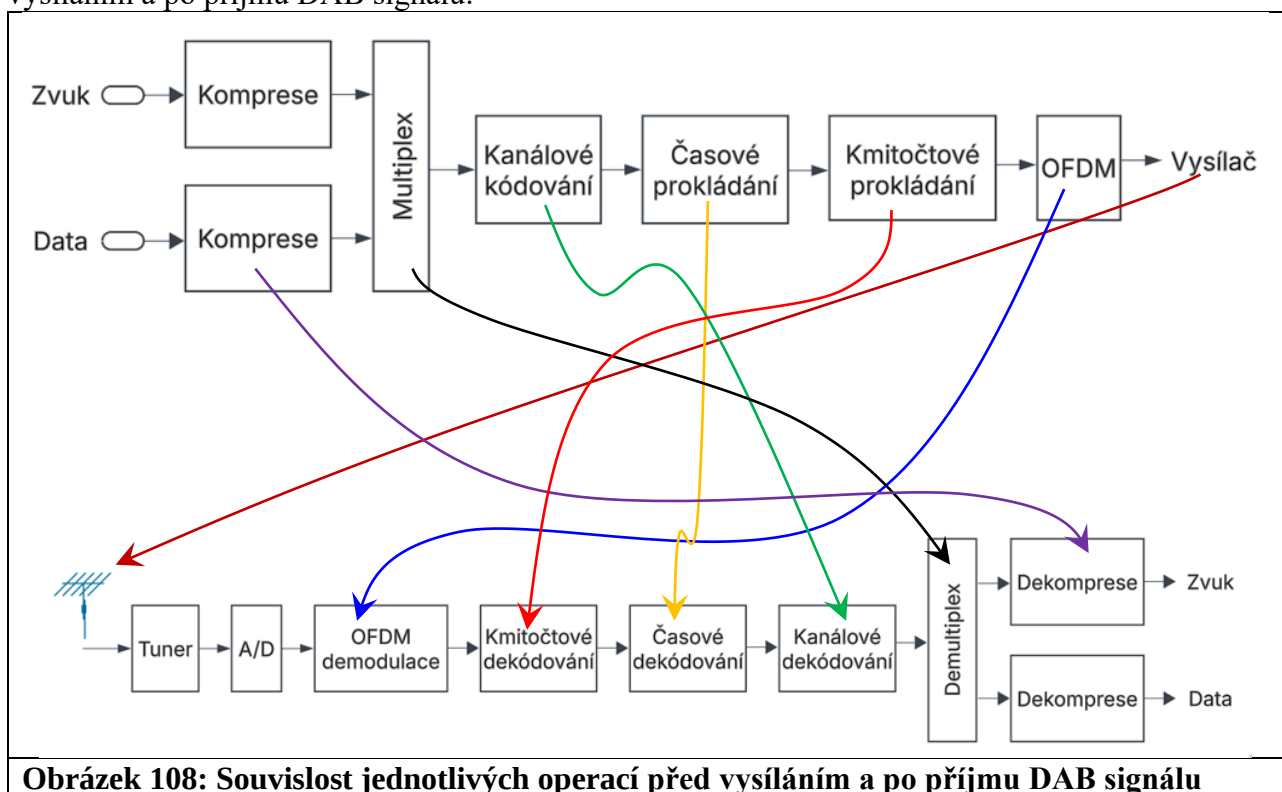
Demultiplexer je součástka nebo zařízení, které má jeden vstup a dva nebo více výstupů. Umí na svoje výstupy střídavě připínat signál ze svého vstupu. Zde se tak zvuk a data, které byly během přenosu zmixované dohromady, opět rozdělí na dva samostatné signály.

Demultiplexer zde rozplete, rozdělí od sebe zvuk a data.

Dekomprese

Provede dekompresi (něco jako „unzip“) komprimovaného signálu, aby bylo možné přehrát zvuk ve formě analogového signálu pro reproduktory a využít data, např. pro zobrazení jména skladby a interpreta.

Obrázek 108 pomocí různobarevných šipek naznačuje souvislost jednotlivých operací před vysíláním a po příjmu DAB signálu:



Obrázek 108: Souvislost jednotlivých operací před vysíláním a po příjmu DAB signálu

12. Televizní přenos

Při televizním přenosu je nutno přenést obraz a zvuk. Přenos zvuku byl popsán výše v kapitole o rozhlasovém přenosu. Proto se teď budeme zabývat jen přenosem obrazu.

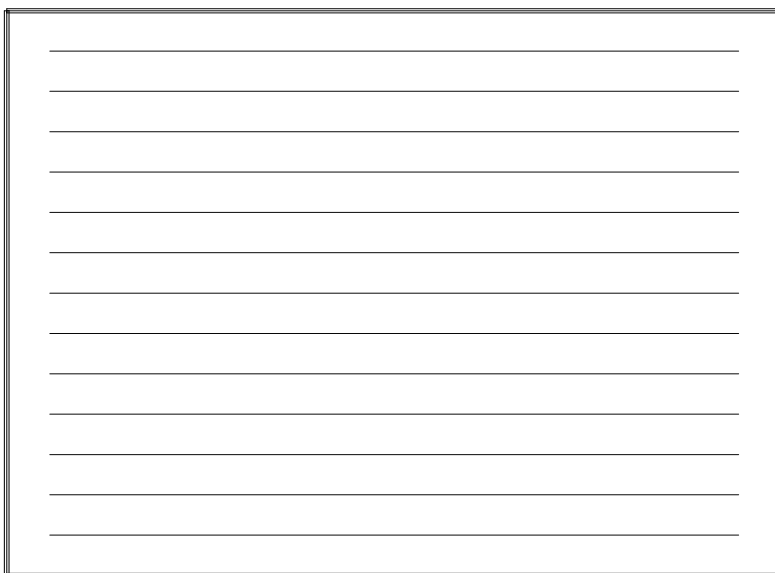
12.1 Princip televizního přenosu

Každý obraz můžeme zjednodušit tak, že jej rozložíme na jednotlivé body, z nichž každý je charakterizován

- polohou
- jasnem
- barvou (u barevného systému).

Takový rozklad obrazu do bodů se používá i u klasické fotografie nebo tisku. Ve fotografii jsou jednotlivé body představovány zrnky citlivé emulze na filmu, v novinách je můžeme vidět lupou.

Jas každého bodu můžeme vyjádřit např. velikostí napětí. Přeneseme-li všechna příslušná napětí z vysílače do přijímače, můžeme v přijímači rekonstruovat původní obraz. Nelze ale propojit vysílač s přijímačem tolika vodiči nebo kanály, kolik je obrazových bodů. Proto se informace o jasu jednotlivých bodů přenášejí postupně a ke spojení pak stačí jeden vodič nebo kanál.



Obrázek 109: Vytvoření televizního obrazu z řádků

Kamera i obrazovka pracují na podobném principu. Paprsek v kameře postupně snímá jednotlivé body obrazu a současně paprsek v obrazovce tytéž body zobrazuje. Body jsou snímány i zobrazovány zleva doprava po vodorovných řádcích. Řádky jsou kladeny shora dolů. To znamená, že jako první se zobrazuje levý horní, jako poslední pravý dolní roh obrazu. Díky setrvačnosti lidského oka a dosvitu obrazovky vnímáme obraz jako stabilní, přestože se ve skutečnosti skládá z jednotlivých blikajících bodů.

Jeden přeběh paprsku po obrazovce, při kterém se vykreslí všechny řádky obrazu, nazýváme snímek. V Evropě se jeden snímek skládá ze 625 řádků. Snímkový kmitočet musí být tak rychlý, aby oko nestačilo postřehnout, že obraz se skládá z jednotlivých snímků.

12.1.1 Potřebná šířka pásma

V následujícím výkladu použijeme jako příklad televizní normu pro standardní rozlišení SD (Standard Definition) s formátem obrazu 4 : 3.

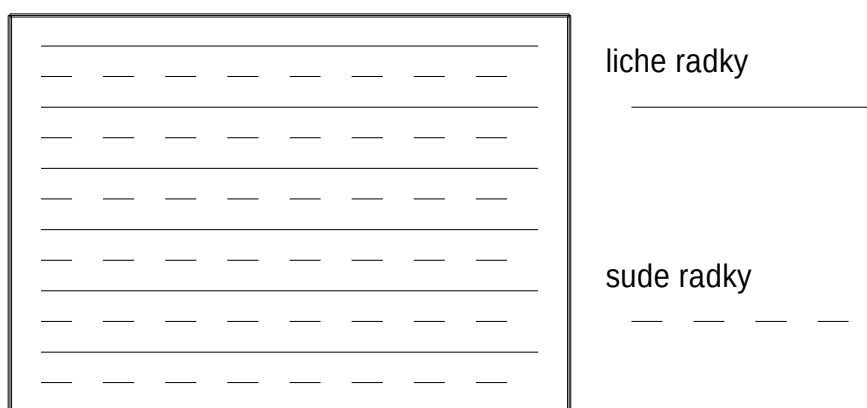
Jeden přeběh paprsku po obrazovce, při kterém se vykreslí všechny řádky obrazu, nazýváme snímek. Jeden snímek se skládá ze 625 řádků. Snímkový kmitočet musí být tak rychlý, aby oko

nestačilo postřehnout, že obraz se skládá z jednotlivých snímků. Tomu by odpovídal snímkový kmitočet asi 50 Hz.

Na jeden řádek klasické obrazovky formátu 4 : 3 se vejde 833 bodů. Na celé obrazovce je tedy $625 \times 833 = 520833$ bodů. Každý z těchto bodů by bylo nutno 50x za sekundu obnovit, aby obraz neblikal. Za sekundu by tedy bylo nutno zobrazit asi 26 milionů bodů. Nejhorší případ, nejnáročnější na přenos vysokého kmitočtu, je pravidelné střídání bílých a černých bodů. Perioda signálu je v tom případě dána dvojicí bílý - černý bod. Těchto dvojic se na obrazovku vejde polovina, tj. asi 13 milionů. Za sekundu by tedy bylo nutno přenést 13 milionů period a nejvyšší přenášený kmitočet by byl 13 MHz. Potřebná šířka pásma by byla příliš velká a do televizních pásem by se vešlo málo kanálů.

12.1.2 Prokládané řádkování

Proto je nutno zvolit kompromis. Kmitočtem 50 Hz se nepřenášejí snímky, ale tzv. pulsínky. V jednom pulsínku se vykreslí liché řádky, v dalším sudé řádky. Řádky lichého a sudého pulsínku se na obrazovce střídají, jsou vzájemně proloženy. Proto se tento způsob zobrazení nazývá prokládané řádkování.

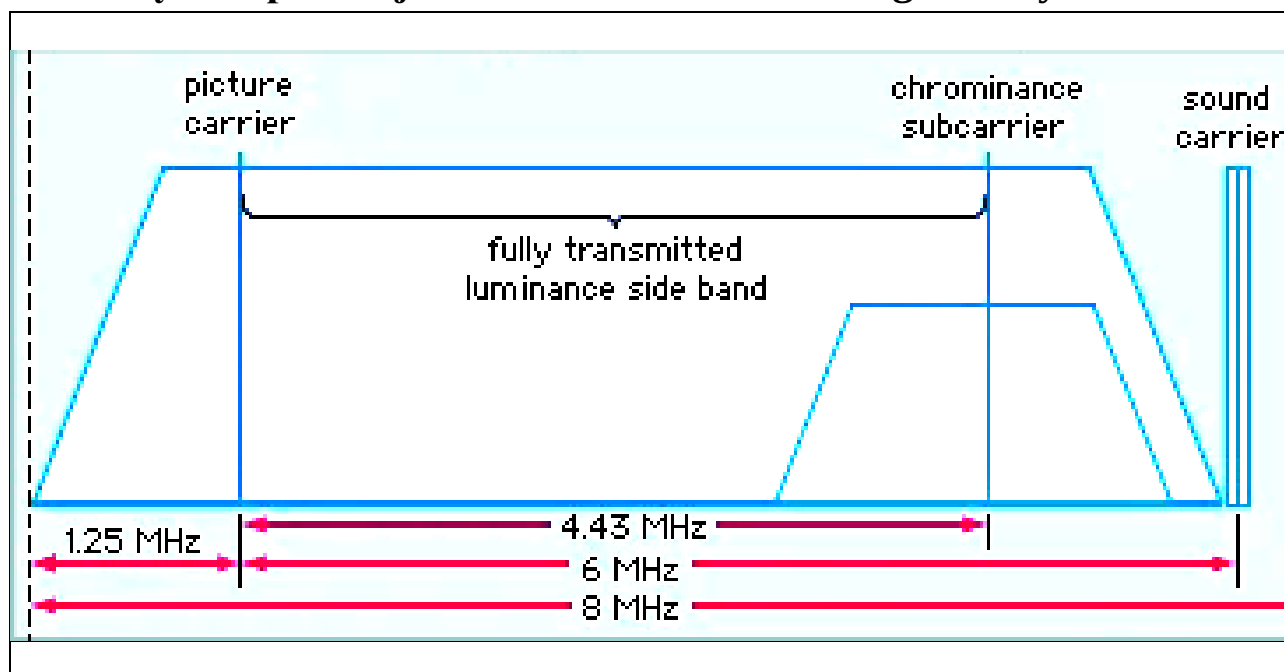


Obrázek 110: Prokládané řádkování

Snímky se sice vykreslují kmitočtem 25 Hz, ale oko se nechá ošálit kmitočtem 50 Hz, kterým se vykreslují pulsínky. Podobně ve filmu je jen 24 obrázků za sekundu, ale každý obrázek se promítá dvakrát a výsledný kmitočet změn je 48 Hz.

Sousední řádky obvykle mají podobný jas, a proto se liché a sudé řádky vzájemně podporují při vytváření dojmu jednolité plochy.

12.1.3 Využití pásma jednoho TV kanálu v analogovém systému



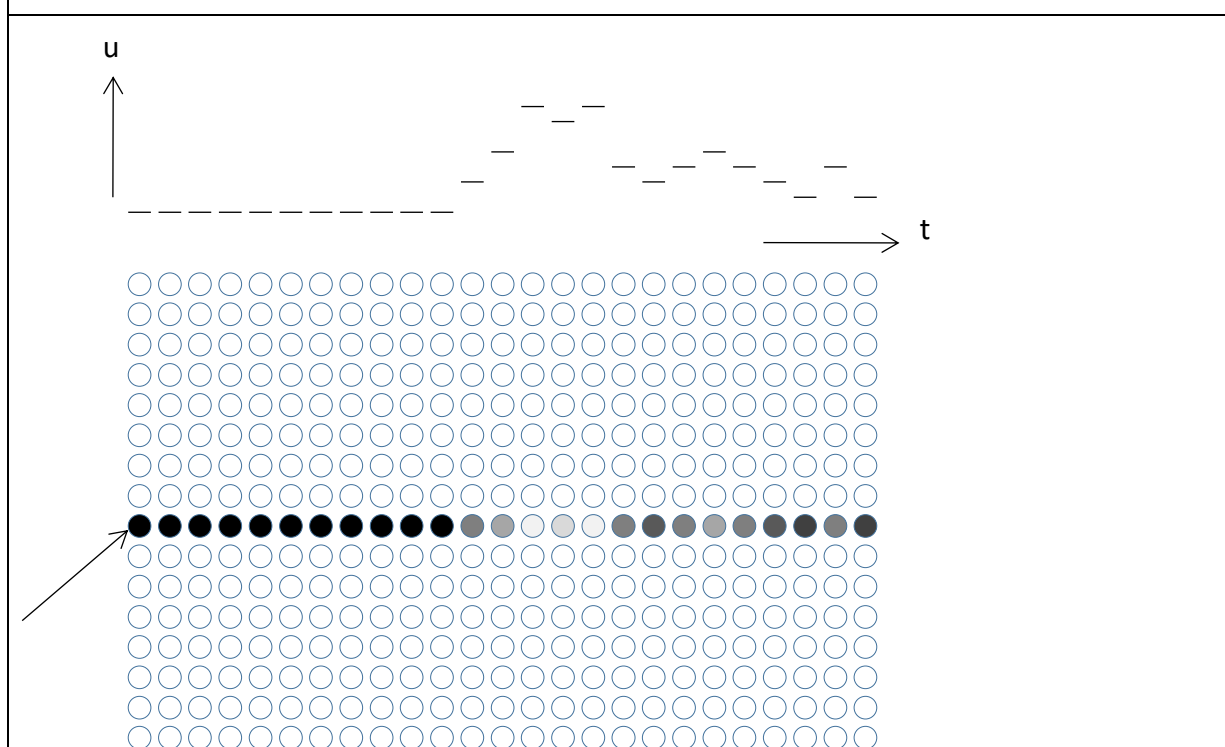
12.2 Kamera

V kameře se přenášený obraz promítne na snímač, který se skládá z mnoha bodů citlivých na světlo. Body snímače jsou uspořádány do řádků. Je-li bod osvětlen, je na jeho výstupu napětí, a to tím větší, čím silnější je osvětlení.

Při snímání obrazu se obcházejí jednotlivé body snímače zleva doprava a shora dolů. Při tom se snímá napětí na výstupu každého bodu a posílá se k přijímači – po drátě nebo bezdrátově.



Obrázek 111: Snímání jednoho řádku obrazu v kameře



Obrázek 112: Zobrazení jednoho řádku obrazu v obrazovce

Obrázek 111 ukazuje snímání jednoho řádku obrazu v kameře (snímaný řádek je označen šipkou). Jednotlivé body snímače generují napětí úměrné tomu, jak jsou osvětlené. Černé body nedávají žádné napětí, bílé body dávají velké napětí. Průběh napětí na výstupu snímače během jednoho řádku je v horní části obrázku.

12.3 Přijímač

V přijímači je obrazovka, ve které se elektronový paprsek pohybuje po stínítku stejně, jako se snímají body v kameře. Jestliže v kameře je právě snímán bod č. 258 na řádku č. 154, tak se současně v přijímači na stínítku obrazovky zobrazuje bod č. 258 na řádku č. 154. Jaké napětí se zjistilo na

výstupu bodu č. 258 v kameře, takovým napětím se rozsvítí bod č. 258 v přijímači. A pokračuje se na body č. 259, 260, 261, atd. až do konce řádku č. 154. Pak se přejde na bod č. 1 v řádku č. 155. Až se dojde na konec posledního (tj. nejspodnějšího) řádku, začíná se znovu vlevo nahoře bodem č. 1 na řádku č. 1.

Obrázek 112 ukazuje zobrazení jednoho řádku na obrazovce. Přijímač dostává z kamery (drátově nebo bezdrátově) napětí, odpovídající jasu jednotlivých bodů. Přejde-li velké napětí, bod svítí bíle, přijde-li malé napětí, bod je černý.

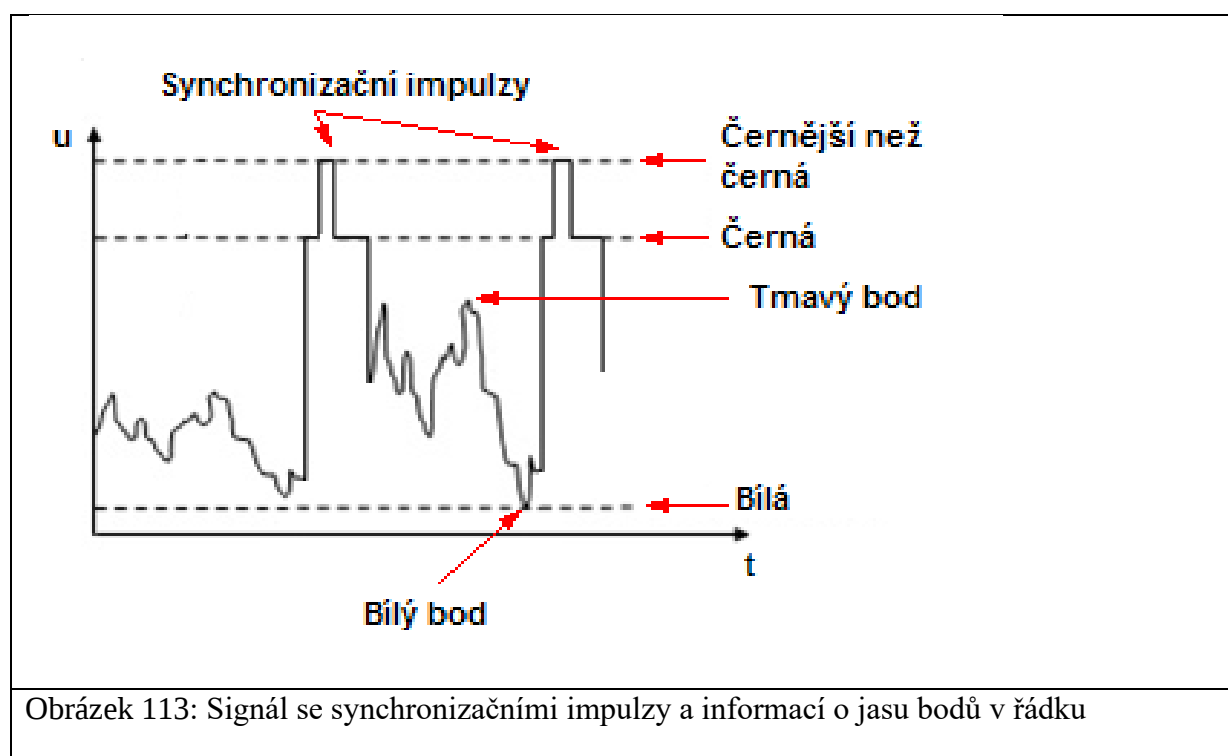
12.4 Videosignál

Při televizním přenosu musíme dostat z kamery do přijímače informace o jasu bodů obrazu, ale také o poloze jednotlivých bodů na obrazovce.

Není nutné vysílat ke každému bodu jeho souřadnice. Stačí vkládat do signálu značky, označující začátek snímku (tj. první bod vlevo nahoře) a začátek každého řádku (tj. první bod zleva). Tyto značky v signálu se jmenují synchronizační impulzy – snímkové a řádkové.

Obrázek 113 ukazuje signál odpovídající dvěma řádkům na obrazovce.

Obrázek začíná signálem jednoho řádku, následuje řádkový synchronizační impuls označující začátek dalšího řádku, další řádek, další synchronizační impuls. Signál dalšího řádku už na obrázku není.



Máme-li přenášet popsany televizní signál (videosignál) např. mezi videopřehrávačem a televizorem, propojíme je kabelem, ve kterém bude jeden živý vodič, po kterém půjde tento signál.

Máme-li takový signál přenášet bezdrátově, namodulujeme jej na nosný vysokofrekvenční signál, vyšleme anténou, přijmeme anténou, demodulujeme – a máme původní videosignál, vhodný k ovládání paprsku na obrazovce.

Modulace, vysílání, příjem, demodulace přitom probíhají stejně jako např. v rozhlasovém přenosu. Rozdíl je jen v přenášených kmitočtech: Videosignál obsahuje mnohem vyšší kmitočty než zvukový signál, proto televizní kanály potřebují mnohem větší šířku kmitočtového pásma (tj. více prostoru v éteru) než rozhlasové.

12.5 Digitální televize

12.5.1 Princip digitální televize

a) Vzorkování

Obrazový a zvukový signál se vzorkují. Jasy jednotlivých barev každého bodu obrazu se převádějí na čísla, podobně se vzorkuje i zvukový signál.

b) Komprese

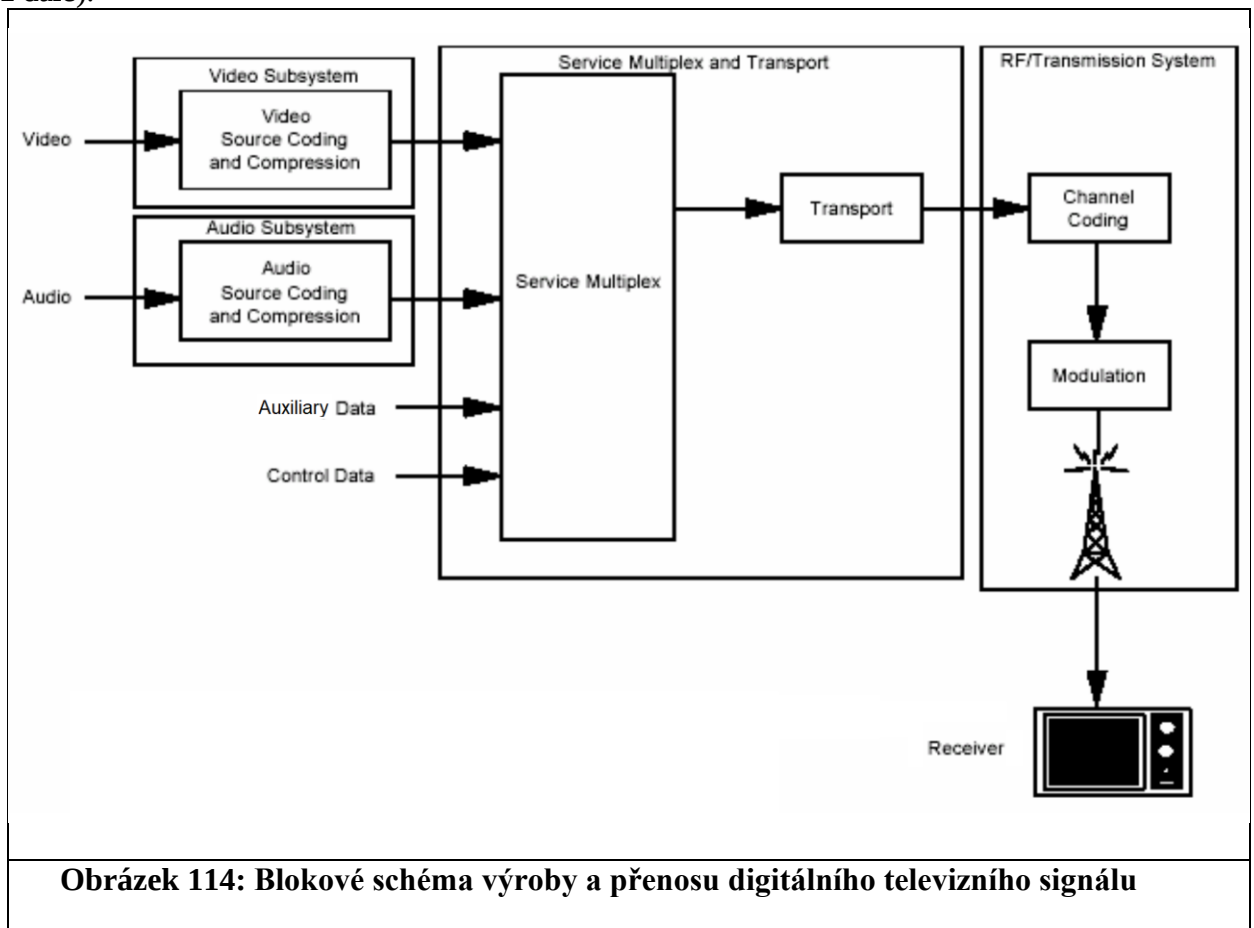
Datový tok se komprimuje (stlačuje, zipuje) tak, aby se zmenšily nároky na přenosovou rychlost. Výsledná rychlost datového toku je pak asi 50x menší než původní.

Při kompresi se využívá toho, že

- je možno vynechávat informace, které by divák stejně nepostřehнул
- jednotlivé snímky se od sebe příliš neliší, proto je výhodné přenášet jen informace o změnách

c) Digitální multiplex

Čísla obrazu, zvuku a datových informací se smíchají – multiplexují dohromady do společného datového toku. Při tom se využívá norma MPEG-2, která se používá i pro kompresi datového toku (viz dále).



12.5.2 Druhy digitálních TV systémů

Standard DVB¹ je určen pro **digitální přenos a vysílání signálů obrazu, zvuku a dat.**

- DVB-S družicové (satelitní) vysílání
- DVB-C kabelový přenos
- DVB-T pozemní (terestriální) vysílání

¹ DVB = Digital Video Broadcasting

Všechna tato média používají společné principy a vlastnosti:

- komprese obrazových a zvukových dat podle standardu MPEG-2
- společný datový tok pro video, audio, data
- formát informací o právě vysílaném pořadu
- ochrana proti chybám přenosu

a) Standard DVB-S

Přenos při družicovém vysílání má tyto vlastnosti:

- a) velký útlum signálu způsobený obrovskou vzdáleností mezi vysílačem na družici a přijímačem na zemském povrchu
- b) nízký vyzářený výkon
- c) nepatrné rušení – jen od předmětů v přímé cestě signálu (stromy, sněžení)
- d) zanedbatelné odrazy
- e) velká šířka pásma přenosového kanálu – 27 MHz

ad a)

Vzdálenost mezi geostacionární družicí a zemským povrchem je asi 36 000 km.

ad b)

Na oběžné dráze je k dispozici jen malý výkon, který dodávají sluneční baterie.

ad c)

Mezi přijímací anténou a družicí musí být přímá viditelnost.

ad d)

Anténa má tvar paraboly, proto téměř nepřijímá z jiného než hlavního směru. Proto prakticky nepřijímá žádné odrazy.

ad e)

Šířka pásma jednoho kanálu při družicovém přenosu (27 MHz) je podstatně větší než šířka pásma pozemského kanálu (8 MHz).

Díky velké šířce pásma a nepatrnému rušení lze v jednom kanálu přenášet několik TV programů, a k tomu několik stereofonních rozhlasových programů v kvalitě Hi-Fi.

b) Standard DVB-C

Přenos při kabelovém vysílání má tyto vlastnosti:

- nepatrný útlum signálu
- dostatečný vysílací výkon
- nepatrné rušení
- zanedbatelné odrazy (při zachování pravidel správné instalace)
- šířka pásma přenosového kanálu 8 MHz – stejná jako u pozemního vysílání

Díky nepatrnému rušení není nutné vkládat do signálu přidavné informace, zabezpečující přenos proti chybám. Proto při stejné šířce pásma jako u pozemského přenosu je možné přenést více „užitečných“ informací, tj. např. více programů v jednom kanálu.

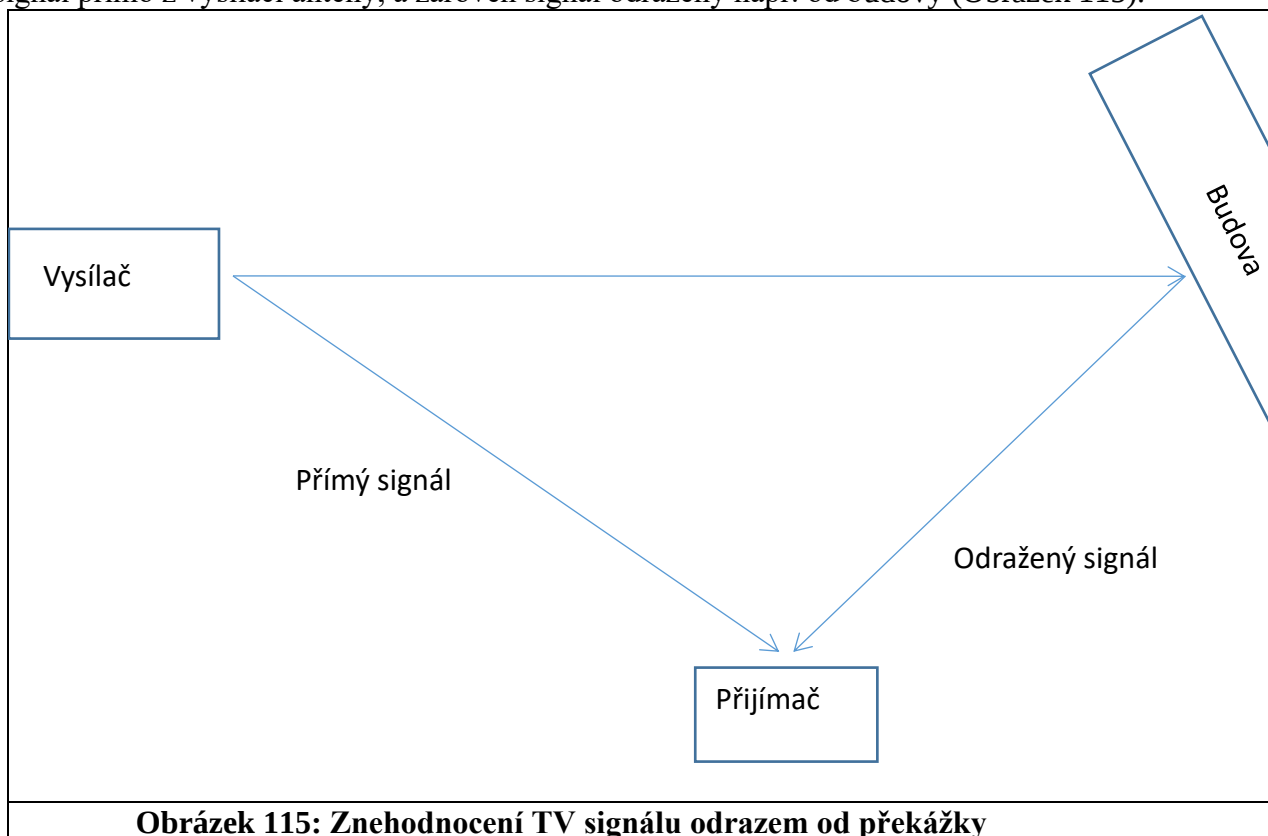
c) Standard DVB-T

Přenos při pozemním vysílání má tyto vlastnosti:

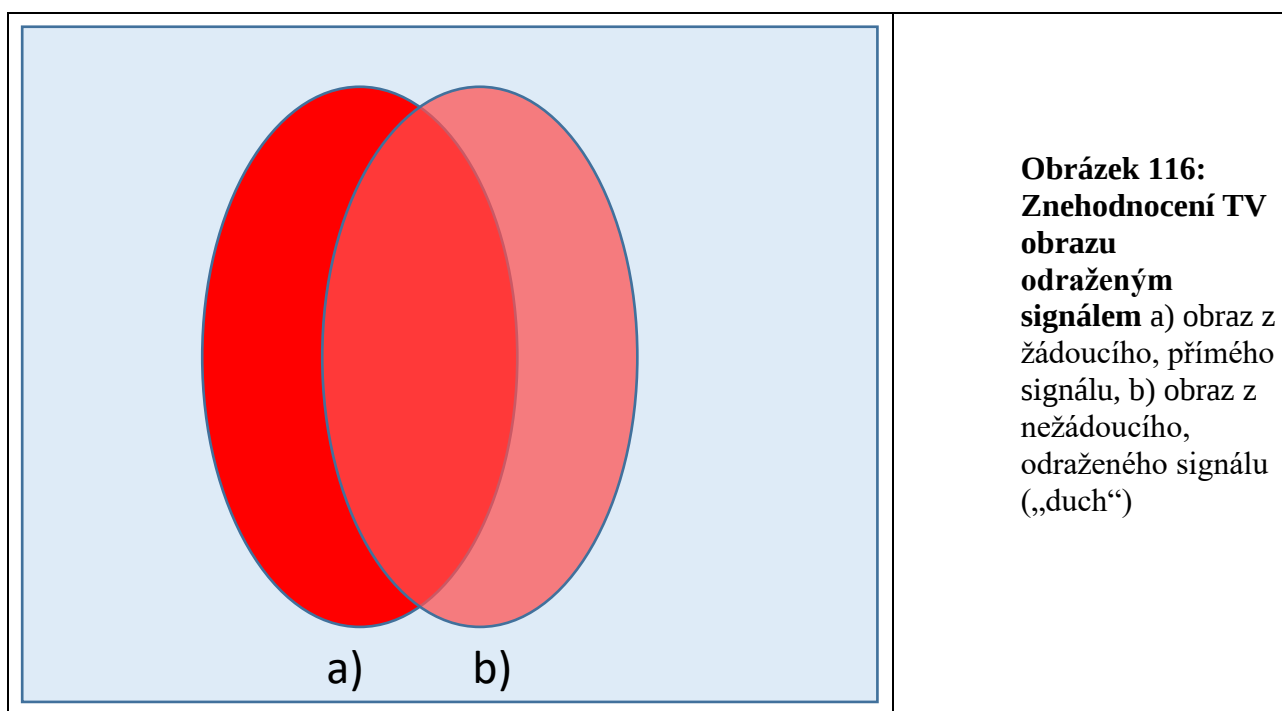
- velký útlum signálu mezi vysílačem a přijímačem
- velký výkon vysílače kompenzuje útlum na trase
- velké rušení od průmyslových a atmosférických zdrojů
- velký vliv odrazů
- šířka pásma přenosového kanálu 8 MHz

d) Modulace DVB-T

Při analogovém pozemním přenosu nelze připustit, aby se na přijímací anténu dostal signál o stejném kmitočtu, ale z různých zdrojů. K tomu dojde např., když se na přijímací anténu dostane signál přímo z vysílací antény, a zároveň signál odražený např. od budovy (Obrázek 115).



Přímý signál se šíří kratší cestou, proto dorazí k přijímači jako první. Jeho informace (obraz) se vykreslí na obrazovku. Odražený signál se šíří delší cestou, proto dorazí k přijímači později. Obraz, odpovídající odraženému signálu, se na obrazovce vykreslí později, tj. více vpravo (Obrázek 116).



Stejný problém nastane, když přijímač bude přijímat signál stejného kmitočtu ze dvou různých vysílačů.

Uvedené problémy lze u analogového přenosu řešit pouze vyloučením odrazů a tím, že na určitém kmitočtu bude v dané oblasti vysílat jen jeden vysílač. Z toho vyplývá, že chceme-li pomoci více vysílačů pokrýt oblast signálem nějakého TV programu (např. ČT1), musíme zajistit, aby každý z vysílačů v té oblasti vysílal na jiném kmitočtu. Pro dobré pokrytí oblasti je totiž nutné, aby se plochy pokryté jednotlivými vysílači překrývaly. V jednom místě se tedy mohou setkat signály ze dvou i více vysílačů – a tyto signály nesmějí mít stejné kmitočty.

Takovým způsobem u analogového přenosu brzy spotřebujeme všechny kmitočty, které jsou k dispozici (a není jich zase tak moc).

U přenosu DVB-T se mohou v jednom místě setkat signály se stejným kmitočtem, pocházející z různých zdrojů, např. signály ze dvou různých vysílačů, nebo přímý a odražený signál z jednoho vysílače.

Proč je analogový přenos tak citlivý, a digitální není?

U analogového přenosu se přenášejí informace o okamžité hodnotě jasu jednotlivých bodů tak, jak jdou body za sebou na obrazovce. Systém musí být schopen rozlišit časy odpovídající rozteči sousedních bodů. Když dostane stejnou informaci dvakrát (např. ze signálu přímého a odraženého), snadno ji přeneše a hloupě použije na obrazovce. Výsledkem je potom „duch“ (**Obrázek 116**).

Systému tedy vadí, když dostane dvakrát tutéž informaci v časech, které dokáže rozlišit. Kdyby tutéž informaci dostal tak rychle po sobě, že by rozdílné časy nedokázal rozlišit, neškodilo by mu to. Neboli duch by na obrazovce splýval s původním obrazem.

Jaké časy je systém schopen rozlišit? Přibližně to zjistíme, když vypočítáme převrácenou hodnotu šířky pásma, které se pro přenos používá. U klasického TV přenosu je šířka pásma přibližně 6 MHz. Rozlišitelný čas tedy je

$$t_A = \frac{1}{6\,000\,000} \text{ s} = \frac{1}{6} \mu\text{s}$$

Tato hodnota se podobá „časové“ vzdálenosti dvou sousedních bodů na obrazovce. Kdyby se tedy signály dvou vysílačů lišily o méně než $1/6 \mu\text{s}$, nebyly by od sebe rozlišeny, tj. neškodilo by, že jsou dva.

U digitálního systému DVB-T se používá složitá modulace OFDM¹, která byla podrobněji popsána v kapitole o digitálním rádiu.

Celé přenášené pásmo 6 MHz se rozdělí na několik tisíc pomocných „nosných“ kmitočtů. Každý z těchto kmitočtů je modulovaný. Protože je těchto kmitočtů mnoho, každý z nich přenáší jen úzké kmitočtové pásmo, široké např. 1 kHz. Časové rozlišení takového přenosu je mnohem horší, než jsme výše spočítali pro analogový přenos s šířkou pásma 6 MHz. Pro šířku pásma 1 kHz by časové rozlišení činilo přibližně

$$t_D = \frac{1}{1\,000} \text{ s} = 1 \text{ ms}$$

U analogového přenosu by signály dvou vysílačů na stejném kmitočtu musely být současné na $1/6 \mu\text{s}$, což nelze zajistit. Aby se dva vysílače vysílající na stejném kmitočtu a přijímané v jednom místě nerušily, nesměla by se jejich vzdálenost lišit o více než 50 m.

U digitálního přenosu mohou být signály „nesoučasné“ až o jednu milisekundu. To by při rychlosti šíření elektromagnetických vln 300 000 km/s umožňovalo, že dva vysílače vysílající na stejném kmitočtu a přijímané v jednom místě by se nerušily, ani kdyby se jejich vzdálenost lišila až o 300 km.

Při této modulaci výsledek přenosu (např. obraz) není k dispozici okamžitě, ale jeho rekonstrukce nějakou dobu trvá. Což ale nevadí, protože na rekonstrukci jednoho snímku máme k dispozici celých 40 ms, tedy dost času.

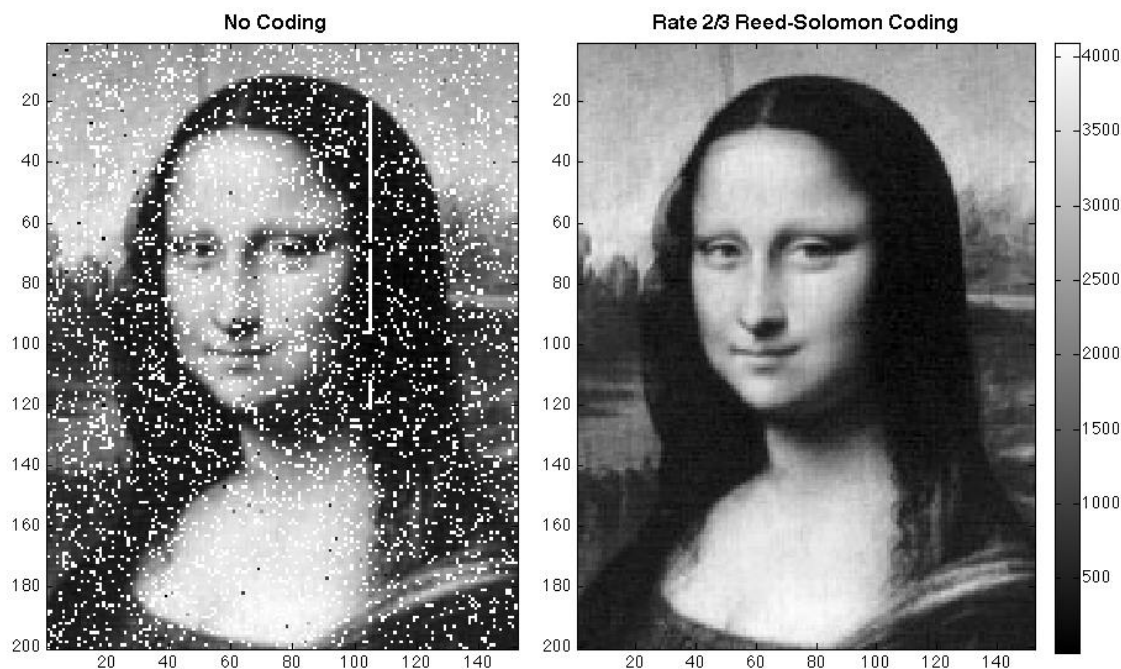
Můžeme si také představit televizní obrazovku rozdělenou na několik tisíc čtverečků, a o každý čtvereček se stará jeden z těch pomocných nosných kmitočtů. Protože má na starost jen malý čtvereček, může jej tvořit pomalu, nemusí být rychlý. A když není rychlý, vůbec není schopen rozpoznat, že dostává z antény jeden signál přímý, a za chvíli tentýž odražený.

¹ OFDM = Orthogonal frequency-division multiplexing

Z uvedeného vyplývá, že k pokrytí oblasti více vysílači **u analogového vysílání každý vysílač musí mít jiný kmitočet, u digitálního vysílání může více vysílačů vysílat na stejném kmitočtu.** Tím se ušetří kmitočty, které se mohou použít pro šíření jiných programů.

Analogový systém má „ponětí“ jen o hodnotě jasu v daném okamžiku. Nemá šanci zjistit, je-li tato hodnota správná, nebo je-li výsledkem rušení, v každém případě musí tuto hodnotu okamžitě dávat na obrazovku.

Digitální systém si s obrázkem pohraje, rekonstrukce obrázku mu chvíli trvá. Díky tomu má nakonec „ponětí“ o obrázku jako celku. Má informaci o tom, u kterých bodů nastala porucha, a může tyto body opravit – např. jejich porovnáním se sousedními body.



Obrázek 117: Zobrazení zarušeného signálu v analogovém (vlevo) a v digitálním systému (vpravo)

12.5.3 Přehled norem DVB

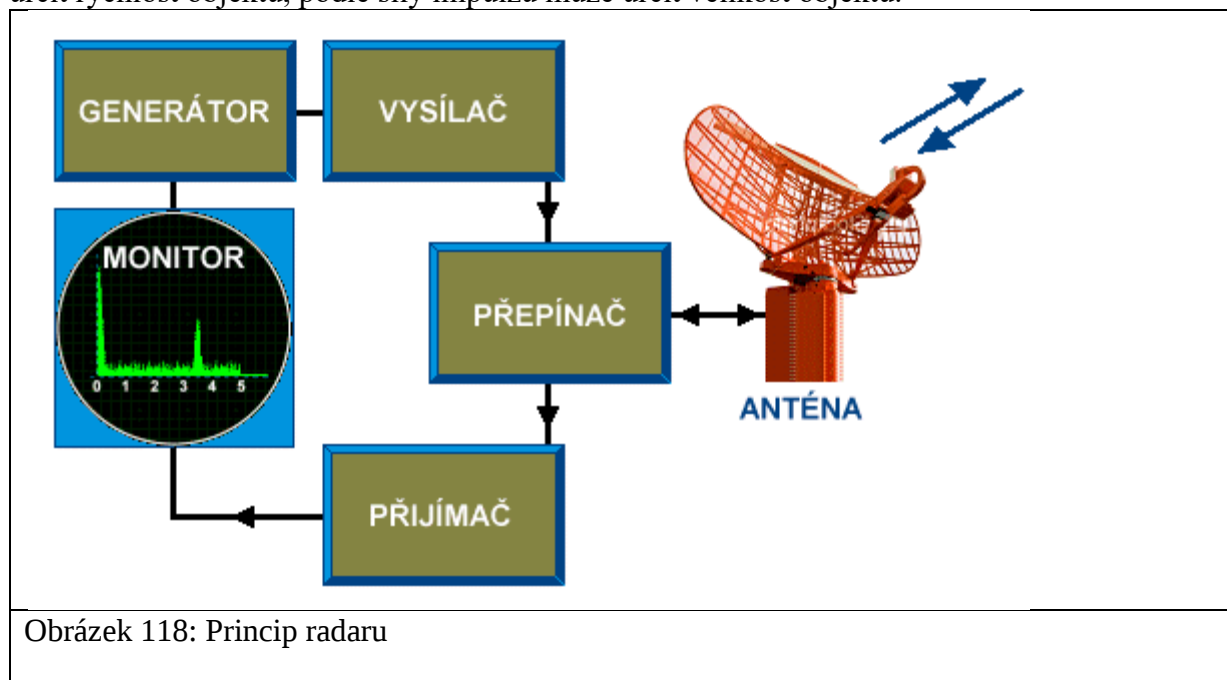
Norma	Rušení, odrazy	Výkon	Šířka pásma / kanál
DVB-S	Zanedbatelné	Malý	27 MHz
DVB-C	Zanedbatelné	Dostatečný	8 MHz
DVB-T	Velké	Velký	8 MHz

13. Radar

Radar je zařízení, které pomocí elektromagnetických vln umožňuje detekovat vzdálené objekty, např. letadla, lodě, automobily, a určovat jejich parametry, např. směr, vzdálenost, rychlost, velikost.

13.1 Princip

Radar pomocí antény vyšle krátký impulz elektromagnetického vlnění směrem k objektu. Po vyslání impulzu přepne anténu z vysílače na přijímač a čeká na signál, který se odrazil od objektu. Podle času návratu impulzu může určit vzdálenost objektu, podle kmitočtu vráceného impulzu může určit rychlost objektu, podle síly impulzu může určit velikost objektu.



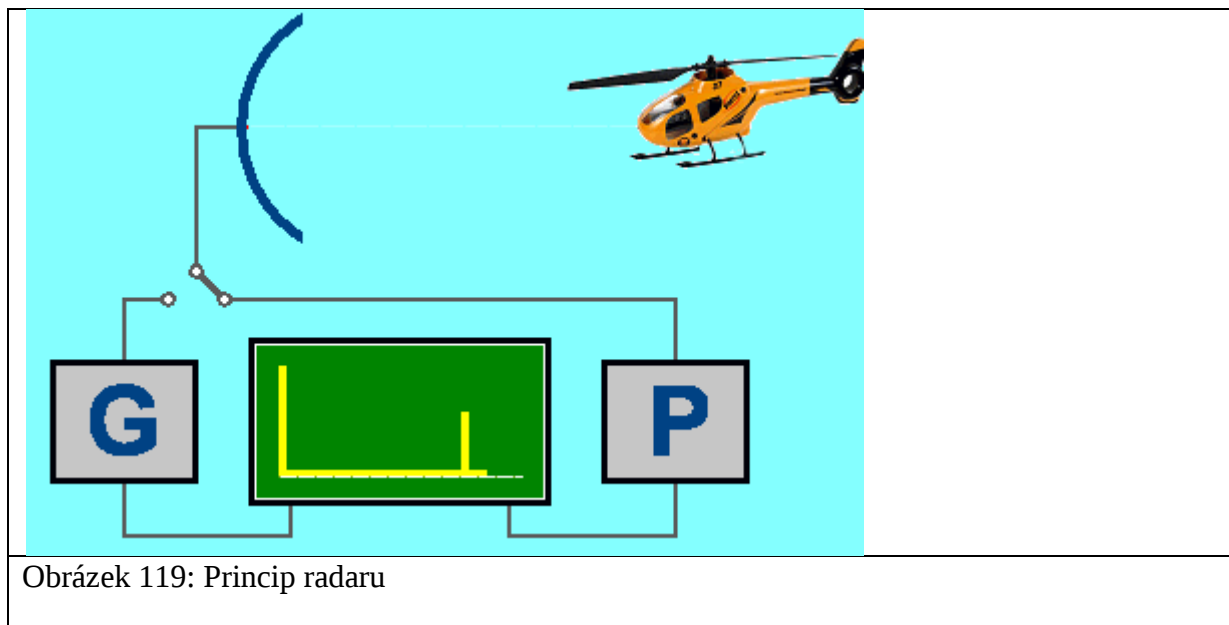
Obrázek 118: Princip radaru

Obrázek 118 ukazuje blokové schéma radaru.

Jako zobrazovací zařízení (monitor) je použit osciloskop, jehož časová základna se spouští při vyslání impulzu z generátoru. Na vertikální zesilovač je přivedeno napětí z generátoru i z přijímače. Paprsek se tedy vychýlí nahoru nejdříve na začátku, při vyslání impulzu do antény, potom po zachycení vráceného impulzu.

Přepínač připojuje anténu na začátku na vysílač, pak ji přepne na přijímač. Většinu doby je radar v režimu příjmu.

Obrázek 119 znázorňuje stejný princip.



13.2 Teorie

13.3 Rozdělení

13.4 Aplikace

13.5 Vzorce

Zdroj: http://www.acr.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k23.htm