

## Násobiče kmitočtů

Umožňují násobit základní kmitočet oscilátorů celistvým násobkem. V zapojení se využívá pracovní třída C, která díky vysokému zkreslení zajišťuje celé spektrum harmonických kmitočtů. V následujícím zesilovači stačí vybrat vhodný násobek kmitočtu

OBRÁZEK

Obvyklý násobící poměr jednoho stupně je  $n = 2 - 5$ .

Použití: násobiče rozšiřují frekvenční rozsah oscilátorů, krystal lze vyrobit pouze 10 – 50 MHz

## Modulace a modulátory

### Základní pojmy

modulovaný signál – je signál, který je vysokofrekvenční, který je ovlivněn modulačním signálem

modulační signál – je signál, který chceme přenášet a jedná se obvykle o nízkofrekvenční signál

nosný signál – je vysokofrekvenční signál určitého kmitočtu, který se šíří prostorem, ale neobsahuje informaci

modulace – proces, při kterém modulační signál ovlivňuje nosný signál a vzniká zařízení, které se jmenuje modulátor

modulátor

Podle principu rozdělujeme modulaci na:

- 1) analogovou
- 2) impulsovou
- 3) digitální

### Analogová modulace

Obecný elektrický harmonický signál lze popsat pomocí rovnice  $u(t) = U \max \cdot \sin \omega t$  lze ovlivnit pouze tři parametry a dle toho se modulace jmenuje:

#### a) amplitudová modulace (AM)

Mění amplitudu (velikost) nosné vlny v závislosti na změnách okamžité hodnoty modulačního signálu (20 Hz – 20kHz)

Průběh signálu (doplnit obrázek)

Základní parametry amplitudové modulace:

- činitel (index) AM  $ma = \frac{A_{nf}}{A_{vf}}$
- hloubka modulace  $m = ma \cdot 100 = \frac{A_{nf}}{A_{vf}} \cdot 100 = m$  - nesmí nikdy překročit 100%, neboť narůstá enormně zkreslení

Amplitudově modulovaný signál obsahuje nosnou a dvě postranní pásma

Z kmitočtového spektra AM signálu je patrné, že amplituda nosné je minimálně dvakrát tak velká, než amplituda postranních pásem. Tato velikost záleží na hloubce modulace  $m$ . Užitečnou informaci nám však přenáší pouze postranní pásma. Šířku pásma, kterou zabírá AM značíme  $B$  je  $B = 2 \pi f_{nf} \max$ .

Výhody:

- zabírá velmi malé pásmo
- je nejjednodušší pro realizaci
- snadno se demoduluje

Nevýhody:

- malá energetická účinnost
- velká náchylnost k rušení atmosférickými poruchami

Omezení nevýhod AM:

- potlačit nebo zcela odstranit nosnou (DSB) – komplikuje se nám demodulace
- potlačit jedno postranní pásmo (SSB)
- částečně potlačit jedno postranní pásmo
- kvadraturní potlačení (QAM) – využívá dvě nosné na stejném kmitočtu fázově posunuté

## Modulátory AM:

Ovlivňují amplitudu nosné podle okamžité hodnoty modulačního signálu, kdy fáze ani kmitočet nosné se nemění

### A) diodové modulátory

- symetrický

Modulátor obsahuje dva symetrické transformátory a diody jako spínače. Modulátor je velmi jednoduchý, ale na výstupu je celé spektrum různých signálů, proto musí být zařazen filtr.

- kruhový

Podmínkou kvalitní funkce je, aby měly součástky shodné parametry. Pak neprochází modulační signál na výstup a výstupní filtr může být mnohem jednodušší. Výhodou kruhových modulátorů je to, že mohou sloužit zároveň i jako demodulátory AM s potlačenou nosnou, když místo nosné přivádíme obnovenou nosnou.

### B) tranzistorové modulátory

- kolektorový

Modulátor je v podstatě úzkopásmový vysokofrekvenční zesilovač v zapojení SE, kdy napájení je provedeno přes transformátor TR, který je napájen modulačním signálem. Tím se indukované napětí na sekundáru přičítá nebo odčítá k napětí  $U_{cc}$  a dochází k AM. Lze takto dosáhnout hloubku modulace do padesáti procent.

### C) s operačním zesilovačem

Jedná se opět o vysokofrekvenční zesilovač nosné, jehož zesílení je nastaveno na *jedna* a modulačním signálem se mění zesílení celého OZ na vývodu *pět*. Tím lze dosáhnout vysoké linearity až do  $m = 100\%$

## b) kmitočtová modulace (FM)

Je analogová modulace, kdy se mění kmitočet nosné v závislosti na modulačním signálu. Amplituda a fáze se nemění. Čím větší je změna

modulačního signálu, tím je větší změna nosného kmitočtu. Této souvislosti říkáme kmitočtový zdvih  $\Delta f$ . Poměr  $\Delta f$  ku kmitočtu nosné  $\frac{\Delta f}{f_0} = m$  dosahuje hodnot 5 až 7. Obvyklý kmitočtový zdvih 75KHz (mono) a 250KHz (stereo).

#### Výhody:

- minimální možnost rušení
- vyšší energetická účinnost než AM

#### Nevýhody:

- mnohem větší šířka pásma, než u AM
- složitá modulace i demodulace signálu
- větší zkreslení

#### Modulátory FM

Pro modulaci se využívá vlastnost rezonančního obvodu, kdy jeden prvek L nebo C je proměnný v závislosti na modulačním signálu. Mnohem jednodušší je změna kapacity kondenzátoru pomocí diody varicap.

Základem je tříbodový LC oscilátor, v jehož rezonančním obvodu je zapojena ještě kapacitní dioda. Nejvhodnějším typem je Colpittzův oscilátor.

Kapacitní dioda přes pracovní odpor R1 mění svojí kapacitu dle okamžité hodnoty regulačního napětí. V případě, že není žádná modulace, je hodnota kapacity varicapů, pak bude změna kmitočtů v závislosti na čase

$$f(t) = f_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Delta C}{C_D}\right) \cdot \cos 2\pi f \cdot t}}$$

Hodnota kmitočtů odpovídá FM za předpokladu, že  $C_D \gg \Delta C$ . Protože průběh závislosti kapacity diody na napětí je nelineární, je nelineární i FM pro velký kmitočtový zdvih  $\Delta f$ . Proto se tato jednoduchá modulace FM využívá pouze pro úzkopásmovou FM. Požadujeme-li širokopásmovou FM (rozhlasové vysílání) s co nejmenším zkreslením, musíme použít jeden ze dvou následujících postupů

1) Zvolíme nosnou mnohem nižší, než požadovanou, provedeme úzkopásmovou FM a následně vynásobíme v násobiči na požadovaný kmitočet, čímž se nám vynásobí i  $\Delta f$

2) Použijeme PM, která je velmi nestabilní a na prvním rezonančním obvodu se sama změní na FM. Vytvořit PM je velice jednoduché

c) fázová modulace (PM)

Informace se přenáší změnou fáze nosné. Čím větší je modulační signál, tím větší je fázový zdvih  $\Delta\varphi$ . Amplituda nosné zůstává beze změny. Dochází k plynulé změně fáze, při nulovém modulačním signálu je fáze nulová.

Výhoda:

- snadná realizace
- dosahuje se vysokého fázového zdvihu
- nemění se stabilita nosné

Modulátory PM

Modulace se provádí opět změnou rezonančního obvodu, ale u úzkopásmového VF zesilovače.

Stabilní sinusový kmitočet nosné  $F_0$  z krystalového oscilátoru je veden na oddělovací stupeň, aby PM zpětně neovlivňovala oscilátor. Používáme jednoduchý VF úzkopásmový zesilovač s jednoduchým laděným obvodem. Ve výstupním laděném obvodu LC je zapojena kapacitní dioda, která pomocí modulačního signálu  $U_{NF}$  mění kapacitu diody  $D$ . Protože je kmitočet konstantní, dochází změnou rezonančního kmitočtu pouze ke změně fáze nosné  $F_0$

### **Krystalem řízené oscilátory**

Mají mnohem větší kmitočtovou stabilitu, než oscilátory LC. Místo rezonančního obvodu je použit piezoelektrický rezonátor, který je vytvořen z krystalické látky a obecně se mu říká *krystal*. U této látky se využívá *piezoelektrický jev*.

**Piezoelektrický jev** – namáháme-li mechanicky (tlakem nebo tahem) krystalickou látku, objeví se na jejím povrchu elektrický náboj, který je možno snímat přiloženými elektrodami. Tento jev je také inverzní. Inverznímu jevu říkáme *elektrostrikce*. Nejobvyklejším tvarem je křemenný výbrus.

V elektrickém schématu prezentují elektrické veličiny mechanické vlastnosti:

R – ztráty v krystalu

L – krystalovou hmotu

C – pružnost krystalu  
C<sub>0</sub> – kapacita elektrod

Výsledná impedance je frekvenčně závislá. Krystalový výbrus vykazuje dvě rezonance a to:

- f<sub>s</sub> – sériová
- f<sub>p</sub> – paralelní

Oba tyto kmitočty jsou velmi blízko sebe

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{CC_0}{C+C_0}L}}$$

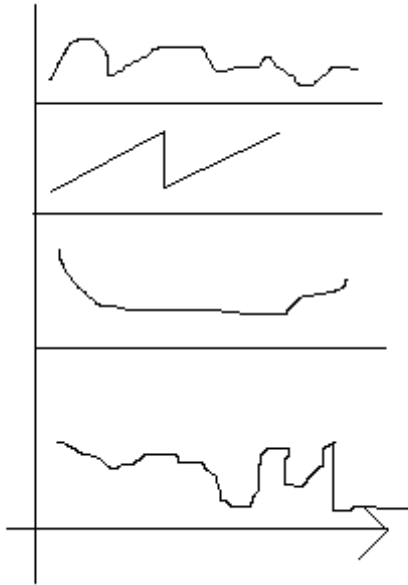
Kmitočet krystalu je konstantní a neměnný. Vyrábí se běžně v rozsahu kmitočtů 100Hz – 10MHz

a) modifikovaný třibodový oscilátor

Kmitočet rezonátoru leží mezi kmitočty f<sub>s</sub> a f<sub>p</sub> a jeho hodnota závisí na poměru kapacit C<sub>1</sub> a C<sub>2</sub>. Stabilita je lepší než 10<sup>-5</sup> a amplituda napětí na krystalu nesmí překročit dovolenou mez, aby nedošlo k mechanickému poškození krystalu. Velikost toho napětí se nastavuje trimrem R<sub>e2</sub>. Požadujeme-li vyšší stabilitu kmitočtu, má největší vliv na změnu okolní teplota. Proto umísťujeme krystal nebo celý oscilátor do temperované komůrky, kde se udržuje přesná teplota mezi 40 – 60°C. Oscilátory se vyrábí do 50MHz

### **Diskrétní (impulsová) modulace**

Vznikla původně ve snaze o vícenásobné využití jednoho vedení, neboť pro přenos signál není nezbytný jeho kontinuální průběh.



Princip přenosu využívá multiplexoru. Pro kmitočet vzorkování (po jakém čase odebíráme vzorky) musí splňovat nerovnosti  $f_{vz} > 2f_{max}$  nebo přesněji

$$f_{vz} = \frac{2f_{max}}{a}$$

$$a < \frac{f_{max}}{f_{max} - f_{min}}$$

Rozlišujeme tyto druhy diskrétní modulační:

- a) pulsně amplitudová modulační

$$f_{vz} > 2f_{max}$$

- b) pulsně šířková modulační

Změnou modulačního signálu se mění pouze šířka impulsu, amplituda ani poloha se nemění. Amplituda a šířka impulsu je konstantní, mění se pouze jeho poloha.

- c) pulsně polohová modulační

Čím je větší hodnota modulačního napětí, tím je větší posun impulsu od pomyslného středu

- d) frekvenčně impulsová modulační

Mění se pouze frekvence

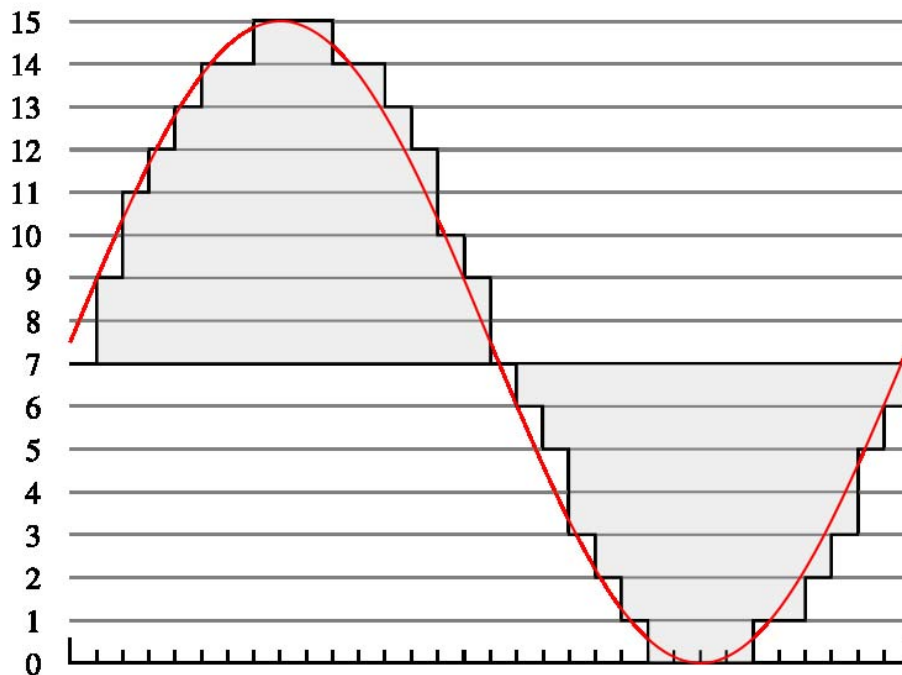
## Digitální modulace

Patří mezi impulsní modulace, obvykle PAM, kdy výstupní signál je ale binární. Tato modulace obsahuje tři základní kroky:

- 1) vzorkování
- 2) kvantování – při dělení určité hladiny
- 3) kódování – převedení na dvojkovou soustavu

### Pulsně kódová modulace

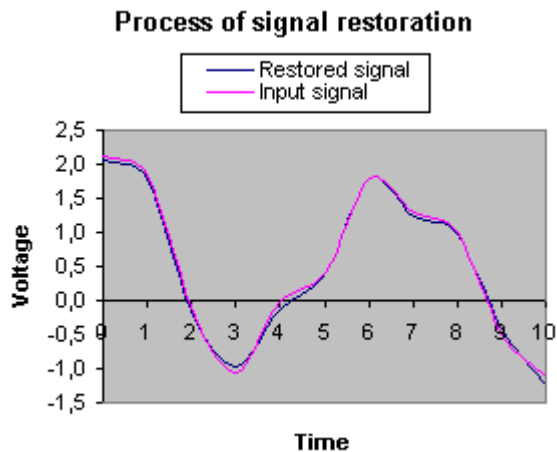
vytvoření signálu PCM



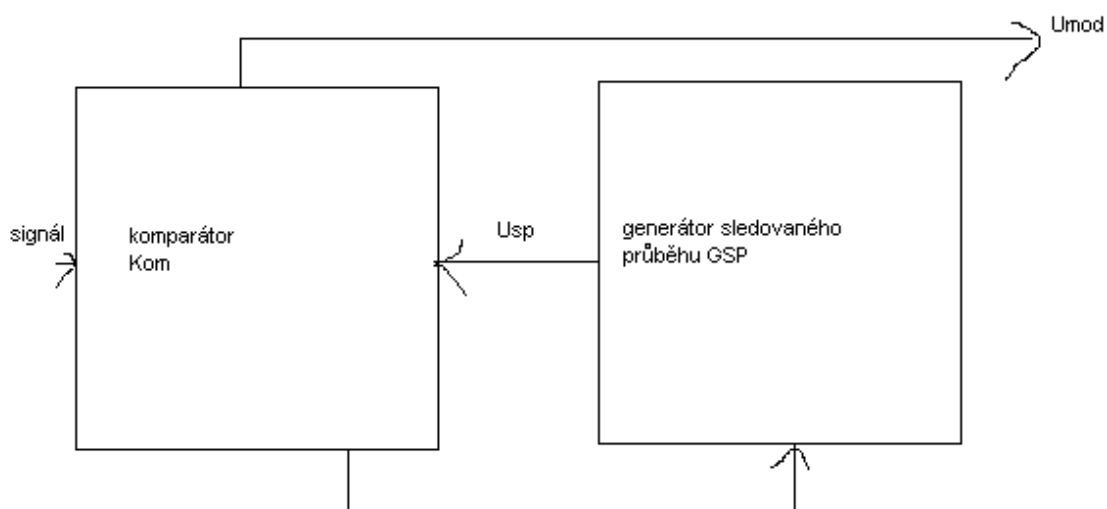


Analogový modulační signál se vždy po přesně daném časovém intervalu přiřadí na odpovídající kvantizační hladinu. V každé hladině je určeno jedno binární číslo. Obvyklý počet kvantizačních hladin odpovídá osmimístnému kódování  $2^8$  (256 hladin).

### Modulace delta



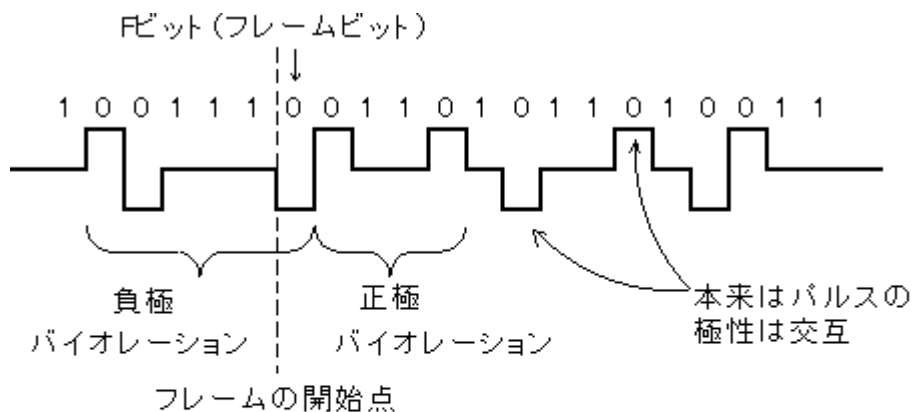
Je to modulace, jejíž výstupní signál je vždy o jeden stupeň zvýšen, má-li modulační signál rostoucí a je označen jedničkou. Při poklesu modulačního signálu je signál snížen a je označen nulou. Modulaci delta vytváříme pomocí komparátoru a generátoru sledovaného průběhu.



Na výstupu komparátoru dostaneme výsledný modulovaný signál odpovídající v každém časovém intervalu buď logické nule nebo jedničky

### Adaptivní modulace delta

Na rozdíl od modulace delta, kde je velikost jednotlivých stupňů konstantní se u adaptivní modulace delta mění velikost stupně v závislosti na průběhu modulovaného signálu. Nejjednodušší princip adaptivní kvantizace je v tom, že každý další stupeň je násobkem předchozího



本来は、正極パルスと負極パルスは交互に現れるが、フレームの最初のFビットの前後では、極性を同一とし(バイオレーション)、フレームの始まりを識別する。

バイオレーションにより、フレーム同期を行う。

### Diferenčně pulsně kódová modulace

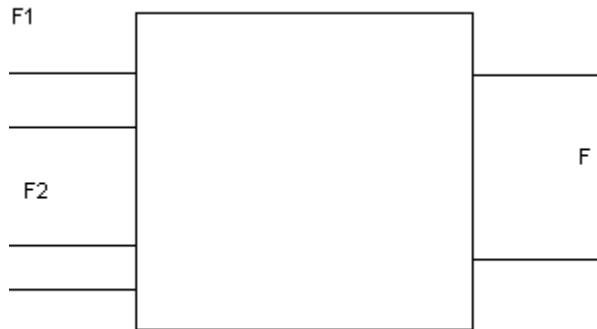
Byla vytvořena abychom ušetřili datový tok, který je u PCM velmi velký. Obvykle zabírá datový tok větší šířku pásma, než vlastní analogový signál. Nejlepší úspora datového toku se dosáhne ze znalostí modulačního signálu. U akustických signálů je vždy velká návaznost předchozího a následného vzorku. Proto se s výhodou využívá místo digitalizace velikosti vzorku digitalizace rozdílu následujícího vzorku. Tím se dosáhne značné úspory přenášených pásem. Modulace je ale zcela nevhodná pro obrazový signál, kde se často využívají triková zařízení. Signál je značně nespojitý a tím vzniká velké zkreslení (rozmazané barvy a problémy s rychlými pohyblivými vlivy). Modulace DPCM je v podstatě *n-bitová modulace delta*.

### Adaptivní diferenčně pulsně kódová modulace

Je základem modulace u mobilních telefonů. Kvantování je zde přizpůsobeno velkým změnám kódovaného signálu. Kvantování se také přizpůsobuje krátkým změnám hustoty rozdělení okamžitých hodnot signálu. Vzorkuje se zde rozdíl sousedních

amplitud, ale ne jejich velikost. Vzniklé rozdílové vzorky mění svojí amplitudu v efektivně řízených zesilovačích, až tento signál je kvantizován. Tím se odstraní částečně nedostatky předchozích modulací

### Směšovače



Je to proces, kdy ze dvou vf signálů přivedených na vstup směšovače, získáme na výstupu nový signál F, který je buď součtem nebo rozdílem vstupních signálů. Všechny parametry obou vstupních signálů se nemění. Je to podobný proces jako modulace, pouze u modulace jsou kmitočty řádově rozdílné, u směšování podobné. U modulace se mění jeden parametr nosné, u směšování žádný.

Využití: v přenosové technice jako konvertor dolů, konvertor nahoru, v tónových generátorech a v elektronických měřicích přístrojích.

### Rozdělení směšovačů

Dle směšovacího prvku

- diodové
- s unipolárními směšovači
- s bipolárními směšovači
- I/O

Dle fyzikálního principu

- aditivní
- multiplikativní
- samokmitající

Dle symetrie

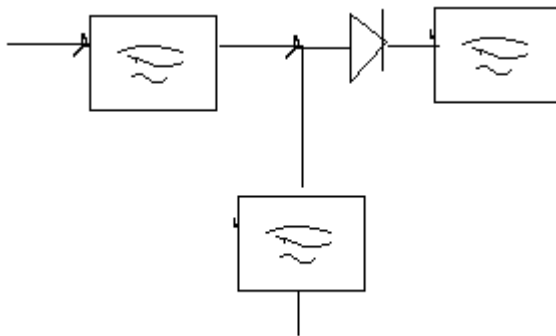
- asymetrické

- vyvážené
- dvojitě vyvážené

#### a) diodové směšovače

Používají pro směšování neline. VA charakteristika diody. Jsou to ty nejjednodušší směšovače.

##### 1) asymetrický



Jedná se o nejméně kvalitní typ směšovače, protože dochází k ovlivňování vstupních signálů. Pásmové propusti částečně toto ovlivňování omezí. Pásmová propust na výstupu vybírá součet nebo rozdíl.

##### 2) vyvážený

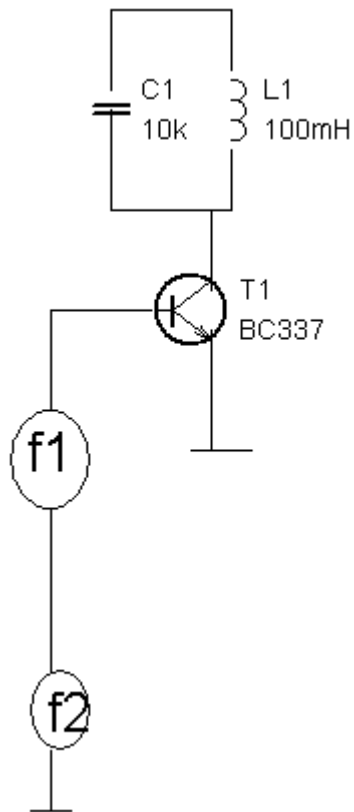
Používá se relativně málo, neboť pro zamezení ovlivňování F1 je potřeba velmi precizního provedení transformátoru TR

##### 3) dvojitý vyvážený

Jedná se o nejkvalitnější diodový směšovač, který se používá v mnoha širokopásmových aplikacích. Jeho schéma je shodné s diodovým kruhovým modulátorem.

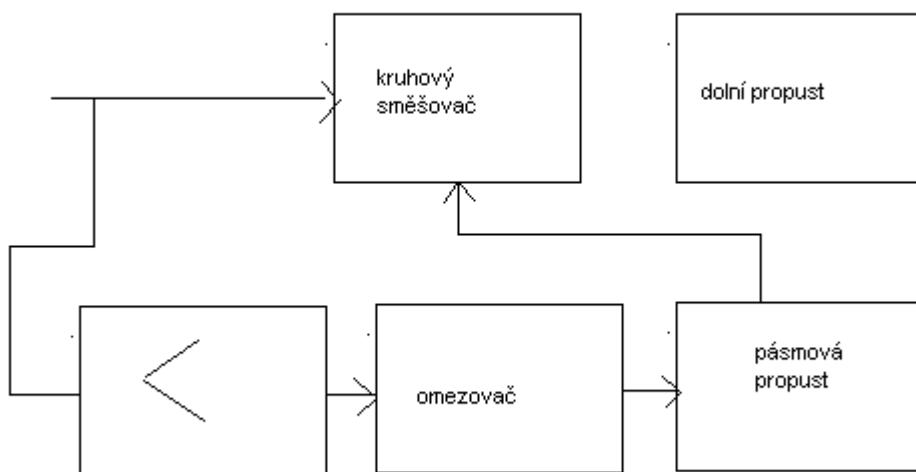
#### b) Aditivní směšovače

Se nejčastěji používají u bipol. tranzistorů, kdy oba signály jsou sériově nebo paralelně zapojeny



Výhodou je velké zesílení a nevýhodou velké ovlivňování  $f1$  a  $f2$ . Protože dochází ke směšování na nelin. Prvku, který není ideální vzniká kromě základního kmitočtu ještě ke vzniku řady násobků, které nazýváme harmonické, pro jejichž vznik platí

### Synchronní detektor



Celý detektor se vyrábí jako integrovaný obvod přímo v dané aplikaci

## Kolektorový detektor

Využívají pro detekci nelineární charakteristiku tranzistoru, jehož pracovní bod je nastaven ve třídě B. Na rozdíl od diodového detektoru obsahuje ještě zesilovací prvek.

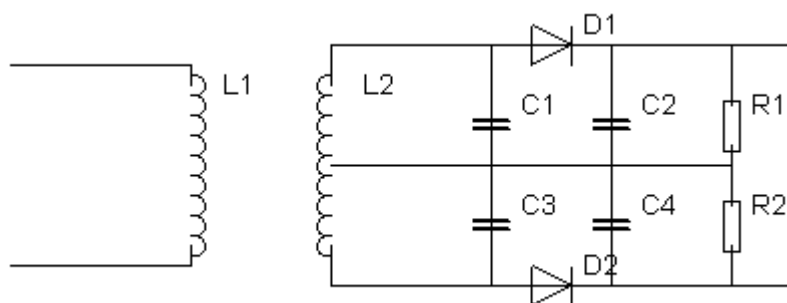
Rezonanční obvod LC je laděný na nosnou modulovaného signálu. Pomocí R1C1 je nastaven pracovní bod do oblasti zániku kolektorového proudu. Pracovní odpor tvoří rezistor R2. Dochází tím k usměrnění modulovaného signálu, neboť tranzistor zesiluje pouze kladnou půlvlnu. C2 odstraňuje zbylou nosnou a C3 zbylou stejnosměrnou složku

## Demodulátory FM

Nejjednodušší způsob demodulace FM je převést jí na AM a tu známým způsobem nedomodulovat. Obvody, které využívají tento princip se nazývají **diskriminátory**

### 1) amplitudový diskriminátor

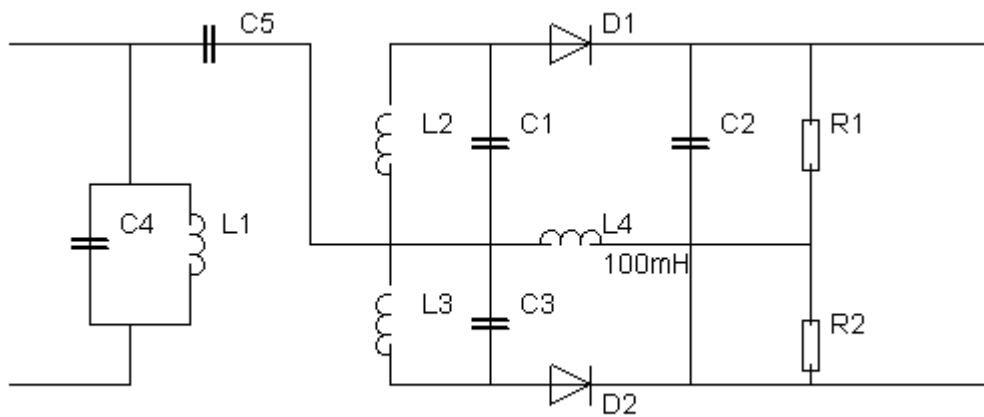
Využívá vlastnosti rezonančního obvodu LC, kdy změna kmitočtu na něj přiváděného vyvolá změnu napětí.



Pro převod FM > AM dva rezonanční obvody, které jsou laděny o kmitočtový zdvih nad a pod nosnou  $f_{fm}$  tím dosáhneme převodu pro nižší i vyšší kmitočty. Součtem obou signálů vznikne tzv. S křivka. Výsledný signál po diodové detekci je nízkofrekvenční. Výhodou je jednoduché zapojení, nevýhodou je nutnost přesně naladit tři různé kmitočty, které se navíc časem nesmí měnit. Další nevýhodou je nutnost stejného činitele jakosti pro všechny obvody.

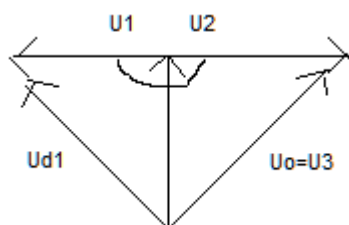
### 2) fázový diskriminátor

Přeměňuje FM na PM a teprve poté na AM. Zapojení se mírně komplikuje, ale všechny obvody ladíme na nosnou.

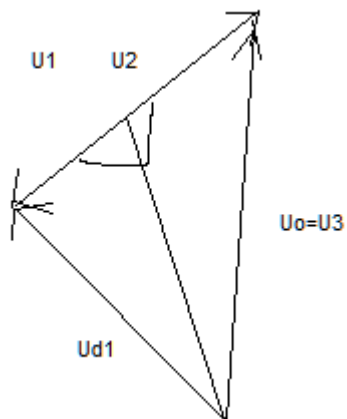


Podle modulaného signálu nastává fázový posun mezi jednotlivými napětími.

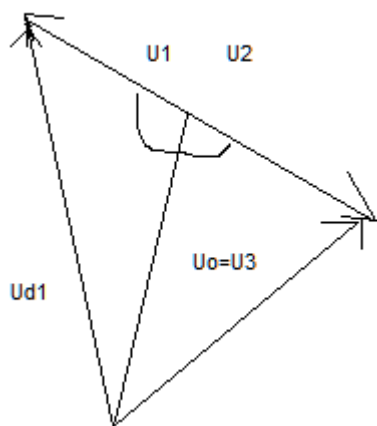
a)  $F_{mf} = f_o$



b)  $F_{mf} > f_o$



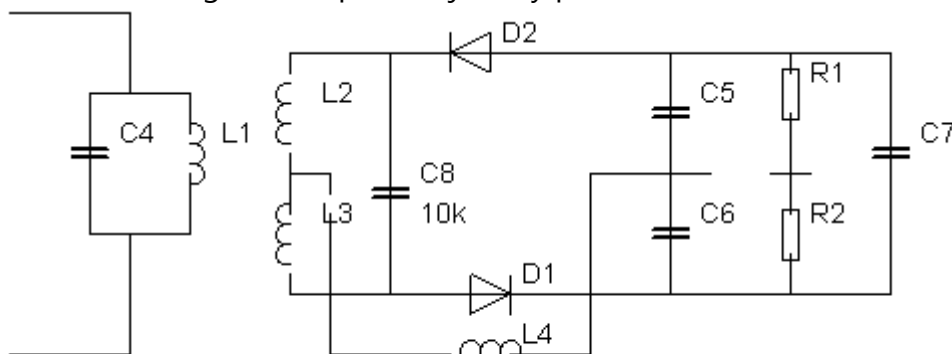
c)  $F_{mf} < f_o$



Vinutí L3 transformuje vstupní napětí  $U_o$  ve stejné hodnotě a fázi jako  $U_3$ . Tím se dosáhne toho, že na sériově zapojených rezistorech se objeví rozdíl napětí  $U_{d1}$  a  $U_{d2}$ . Pokud na diskriminátor přichází jen nosná, bude na výstupu nulový signál. Při jakékoliv změně vstupního kmitočtu dosáhne nenulové hodnoty

### 3) poměrový diskriminátor

Je na rozdíl od předchozích typů nezávislý na změně amplitudy frekvenčně modulovaného signálu. Nepotřebuje tedy pro svou funkci omezovač amplitudy



### 4) koincidenční (kvadrurní) diskriminátor

Modulovaný signál je v omezovači mnohonásobně zesílen a ořezán tak, že na jeho výstupu dostaneme v podstatě obdélníkový signál. Tím je zajištěno to, že demodulátor neovlivňuje žádná parazitní AM modulační rušení. Tento obdélníkový signál je veden do fázového komparátoru a zároveň ve formě PM signálu do posouvače fáze, který je nastaven tak, že fázový zdvih posouvá o  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ). Vzniklý obdélníkový signál fázově posunut se přivádí na druhý vstup fázového komparátoru. Výstupem komparátoru je šířková modulační, jejíž střední hodnota odpovídá přesně modulačnímu signálu. Pronikání všech



nežádoucích harmonických zabraňuje dolní propust. Je to nejčastější typ FM modulátorů

#### 5) fázový závěs PLL

Slouží pro demodulaci všech modulovaných signálů, k násobení či dělení kmitočtu, k pásmové filtraci a řadě jiných aplikací. Systém obsahuje fázový detektor, oscilátor řízený napětím a dolní propust. Základem fázového závěsu je volně kmitající oscilátor řízený napětím, jehož kmitočet přibližně odpovídá nosné. Systém se vlivem fázového detektoru snaží věrně kopírovat vstupní FM signál. Ve smyčce se objevuje korekční napětí  $U_k$ , které řídí oscilátor VCO a v případě synchronismu je přímo roven modulačnímu signálu ( $U_k = U_{mf}$ ). Dolní propust ve smyčce zabraňuje synchronizaci VCO na vyšší harmonickou.