

1. Aplikace analogové elektroniky

V této kapitole si vysvětlíme některé aplikace elektroniky, se kterými se denně setkáváme. Je to rozhlas a televize, v jejichž základech leží metoda přenosu informace na dálku pomocí tzv. modulace.

Modulací míníme metodu zakódování požadované informace do elektromagnetické vlny o frekvenci vyšší než je obsažena v přenášené informaci.

Proč se nedá vzduchem na dálku pomocí antény přenášet např. zvuková informace? Je to proto, že k tomu, aby se elektromagnetická energie z antény účinně vyzařovala je třeba, aby rozměr antény byl srovnatelný s vlnovou délkou.

Abychom pochopili, proč tomu tak je, představme si jednoduchou smyčku vodiče, tzv. magnetický dipól. Průřez a materiál vodiče budeme volit tak, aby stejnosměrný odpor smyčky byl zcela zanedbatelný, avšak indukčnost smyčky bude nenulová. připojíme-li nyní smyčku na zdroj střídavého proudu vhodným způsobem, např. tak, že ji v jednom místě rozřízneme a na vzniklé dva konce připojíme výstup našeho zdroje. Pro nízké kmitočty, pro které bude odpovídající vlnová délka mnohem větší, než rozměry smyčky, bude na koncích smyčky napětí odpovídající našim představám o obvodu s indukčností, $U_L = j\omega L \cdot I_L$. Používám, jak je v řešení střídavých obvodů obvyklé, označení proudů a napětí symbolickými amplitudami, fázory. Napětí tedy předbíhá proud o $\pi/2$ a výkon ztracený na smyčce bude nulový. Bude-li však kmitočet proudu, kterým smyčku budíme tak vysoký, že proud bude podél smyčky měnit svoji fázi (tj. vlnová délka bude srovnatelná s rozměry smyčky), bude v určitém místě smyčky napětí s proudem ve fázi a to bude z hlediska budicího zdroje znamenat, že bude muset dodávat do smyčky reálný výkon, bude se tedy zdát, že původně nulový stejnosměrný odpor smyčky se zvětšil a je nenulový. Tomuto odporu se říká radiální odpor a reálný elektrický výkon na něm ztracený smyčka vyzařuje do prostoru okolo sebe. (Obdobnou úvahu bychom mohli provést s tzv. elektrickým dipólem tj. dvěma vodiči, které mají vůči sobě určitou počáteční kapacitu.) **Smyčce nebo vodiči, který vyzařuje elektromagnetickou energii říkáme anténa. Obvyklý rozměr antény je polovina nebo čtvrtina vlnové délky, tyto antény se pak nazývají rezonanční.** Pro nízké frekvence, tzv. dlouhé vlny (frekvence okolo 100 kHz, odpovídající vlnová délka je 3 km), se délka antény nemůže rovnat ani čtvrtině vlnové délky, radiace je proto neefektivní, nicméně je možné radiaci dosáhnout a proto některé rozhlasové vysílače ještě na dlouhých vlnách vysílají.

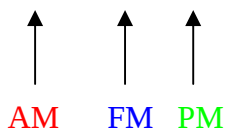
Anténa vyzařuje energii buď rovnoměrně do všech směrů (např. prutová anténa kolmá k povrchu země), v tom případě intenzita elektrického a magnetického pole ubývá se čtvercem vzdálenosti, nebo preferuje určitý směr, ve kterém pak intenzita elektrického a magnetického pole ubývá mnohem pomaleji, typickým příkladem jsou parabolické antény pro kmitočty v řádu jednotek GHz.

*Abychom tedy mohli **informaci** mohli přenést bezdrátově na dálku, musíme ji **zakódovat** do elektromagnetické vlny o dostatečně vysoké frekvenci, která se anténou vyzařuje snadno. Metodou, jak požadovanou informaci do vlny zakódovat, jsou různé druhy modulace. Vysvětlíme si zde tři základní analogové modulace, tzv. amplitudovou (Amplitude Modulation, AM) , kmitočtovou (frekvenční, Frequency Modulation, FM) a fázovou modulaci (Phase Modulation)*

1.1. Amplitudová modulace

Jedním z nejčastěji užívaných druhů modulace je **amplitudová modulace**. Nosná vlna je do prostoru vyzařována anténou, napájenou vysokofrekvenčním proudem. Na intenzitě tohoto proudu je závislá i velikost vyzařovaného výkonu. Představme si průběh proudu v anténě jako

$$i_n = I_n \sin(\omega_n t + \varphi) = I_n \sin(2\pi f_n t + \varphi) \quad 1.1$$



kde I_n je maximální hodnota amplitudy proudu nosné vlny
 ω_n úhlový kmitočet nosné vlny
 φ úhel posunu, který svírá vektor nosné vlny s časovou přímkou v čase , kde $t=0$ v okamžiku pozorování.

Podobně lze vyjádřit okamžitou hodnotu modulačního-nízkofrekvenčního proudu I_m

$$i_m = I_m \sin \omega_m t = I_m \sin 2\pi f_m t \quad 1.2$$

kde I_m je maximální hodnota amplitudy základní harmonické modulačního proudu

ω_m je úhlový kmitočet modulačního proudu $\omega = 2\pi f$

Při pohledu na základní rovnici nemodulované nosné vlny vyplývá, že okamžitou hodnotu vysokofrekvenčního proudu nosné vlny lze ovlivnit třemi způsoby a podle těchto způsobů můžeme i pojmenovat druh modulace.

- dochází-li vlivem proudu modulačního signálu k ovlivnění amplitudy nosné vlny vzniká modulace amplitudová **AM**
- působí-li modulační signál na kmitočet nosné vlny vzniká modulace kmitočtová **FM**
- dochází-li v rytmu modulačního signálu k posouvání vektoru nosné vlny, vzhledem ke konstantní rychlosti jeho otáčení bez modulace ke změně úhlu posunu φ , vznikne modulace fázová **PM**

V praxi se nadále používají impulsní modulace, které opět mohou být realizovány různými metodami, o nich se zmíníme až později.

Při amplitudové modulaci měníme v rytmu přenášené informace amplitudu této nosné vlny.

Říkáme, že **amplitudu** modulačního signálu(chcete-li hlasitost , dynamiku) tzv. kódujeme ve **změně amplitudy signálu nosné vlny** a **kmitočet modulačního signálu** je kódován **v počtu amplitudových změn za sekundu**.

Předpokládejme nejprve, že přenášíme jedinou modulační frekvenci ω_m – nosná je modulována jen základní harmonickou určitého vysílaného signálu.. Amplituda vysokofrekvenčního proudu nosné vlny musí být nezáporné číslo, proto změnu amplitudy proudu nosné vlny I_n v rytmu kmitočtu ω_m můžeme zapsat takto:

$$i = (I_n + I_m \sin \omega_m t) \sin \omega_n t \quad 1.3$$

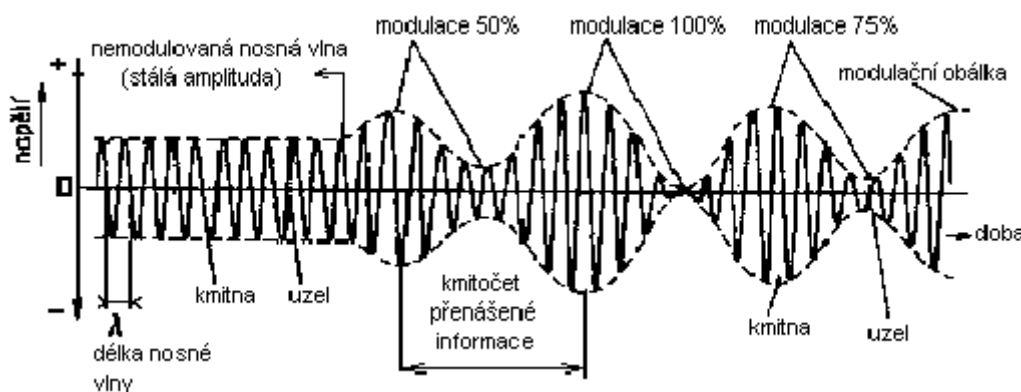
kde m_a , tzv. hloubka modulace, je číslo mezi 0 a 1, tedy $0 < m_a < 1$. Často se hloubka modulace udává v procentech,

$$m_a = \frac{I_m}{I_n} \quad m_a [\%] = m_a \cdot 100. \quad 1.4$$

Výsledný amplitudově modulovaný proud v anténě bude pak mít po dosazení za I_m z modulačního indexu tvar

$$i = (I_n + m_a I_n \sin \omega_m t) \cdot \sin \omega_n t = I_n (\sin \omega_n t + m_a \sin \omega_n t \cdot \sin \omega_m t) \quad 1.5$$

tj. například tvar podle části obrázku 1.1.



obr. 1.1. časový průběh amplitudově modulované nosné vlny s různými hodnotami hloubky modulace

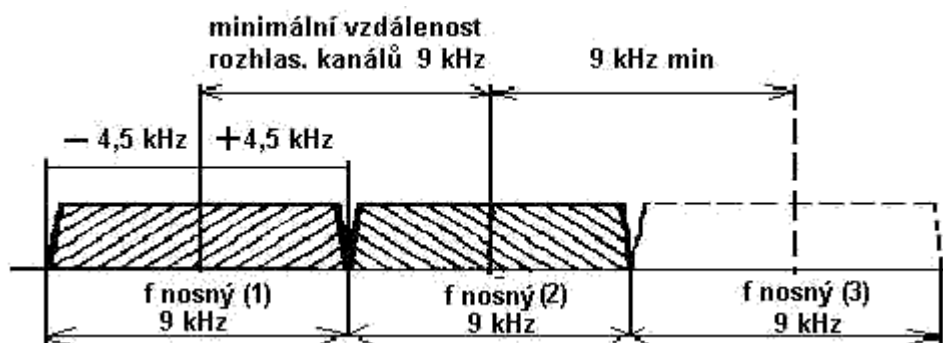
Součin dvou funkcí sin v druhém členu rovnice můžeme rozvést

$$\sin \omega_n t \cdot \sin \omega_m t = \frac{1}{2} \cos(\omega_n - \omega_m) t - \frac{1}{2} \cos(\omega_n + \omega_m) t \quad 1.6$$

po dosazení do vztahu pro okamžitou hodnotu modulované nosné vlny dostaneme konečný výraz, který obsahuje tři základní složky.

$$i = I_n \left[\sin \omega_n t + \frac{m_a}{2} \cos(\omega_n - \omega_m) t - \frac{m_a}{2} \cos(\omega_n + \omega_m) t \right] \quad 1.7$$

první část rovnice představuje nemodulovanou nosnou vlnu-základní složku proudu nosné vlny o úhlovém kmitočtu ω_n a dvě složky dané součtem a rozdílem kmitočtů nosné vlny a kmitočtu modulačního signálu ($\omega_n \pm \omega_m$), tvořící tzv. postranní kmitočty. Pokud budeme nosnou vlnu modulovat hudebním tónem řady nástrojů, nebo hlasovým signálem s širokým kmitočtovým spektrem dostaneme dvě postranní pásma, která budou obsahovat všechny kmitočty modulačního signálu, které jsou podle normy v signálu obsaženy. Pro amplitudovou modulaci norma předepisuje základní šířku pásma 9 kHz, potom každé postranní pásmo může obsahovat modulační kmitočty v maximálním spektru 30Hz až 4,5 kHz, viz obr.1.2 Laděné obvody vysílačů jsou však navrženy tak, že umožní přenést pásmo $\pm 10\text{kHz}$.



obr.1.2 Kmitočtový průběh několika sousedních kanálů

Vznikly tedy dva nové kmitočty, $\omega_n + \omega_m$ a $\omega_n - \omega_m$, které nazýváme postranními kmitočty. Vidíme, že postranní kmitočty leží symetricky k frekvenci nosné vlny a zatímco sama nosná vlna má svoji původní amplitudu I_n (tj. amplitudu, kterou by měla bez modulace, tj. při $m_a=0$), amplituda signálů postranních kmitočtů je úměrná hloubce modulace m_a ; je rovna $m_a \cdot I_n / 2$. Nejvyšší amplituda postranních kmitočtů bude tedy pro $m_a=1$ a bude rovna $I_n / 2$. Frekvenční pásmo, které jsme "obsadili" modulací, je rovno $2 \cdot \omega_m$. Pokud nebudeme nosnou vlnu modulovat jediným kmitočtem, ale signálem, jehož frekvenční spektrum leží v intervalu ($\omega_{\min}, \omega_{\max}$), pak frekvenční pásmo, potřebné pro vysílání vlny modulované amplitudově tímto signálem bude od $\omega_n - \omega_{\max}$ do $\omega_n + \omega_{\max}$, jeho šířka tedy bude $2 \cdot \omega_{\max}$. Pro zvukový signál na středních vlnách, který je filtry "ořezán" na šířku od cca 100 Hz do cca 4,5 kHz, bude šířka frekvenčního kanálu potřebná pro jeden vysílač 9 kHz, pro obrazový televizní signál, který má šířku pásma 6,5 MHz, by potřebná šířka pásma byla 13 MHz.

Zajímavé je se podívat, jak je při amplitudové modulaci rozdělen vysílaný výkon do jednotlivých frekvenčních komponent. Vzhledem k tomu, že výkon je úměrný i^2 , bude v případě 100% amplitudové modulace ($m_a=1$) cosinusovým signálem výkon obou postranních kmitočtů jen polovina výkonu nosné (jeden postranní kmitočet má amplitudu výkonu úměrnou $I_n^2 / 4$, dva $I_n^2 / 2$ a nosná má amplitudu výkonu úměrnou I_n^2 se stejným koeficientem úměrnosti). tento poměr je nicméně závislý na tvaru signálu, kterým modulujeme, například pro 100% modulaci obdélníkovým signálem bychom dospěli k poměru mezi výkonem postranních pásem a výkonem nosné 1:1. Protože nosná vlna není amplitudovou modulací ovlivněna, nenese také žádnou informaci o modulačním signálu, jinými slovy, **všechna zakódovaná informace je obsažena v postranních pásmech**. Je proto možné navrhnout takové přenosové systémy s amplitudovou modulací, které vysílání nosné vlny buď částečně, nebo

úplně potlačují. Zvýší se tím energetická účinnost vysílače, neboť se bude vysílat převážně (nebo jenom) signál, který obsahuje požadovanou informaci. Vznikají tak modulační techniky

DSB AM- signál obsahuje dvě postranní pásma se stejným informačním obsahem,

SSB AM- signál obsahuje jedno postranní pásmo,

VSB AM –signál obsahuje jedno celé postranní pásmo a druhé je částečně potlačené
televizní modulace obrazové informace

ISB AM – signál obsahuje dvě postranní pásma s jiným informačním obsahem

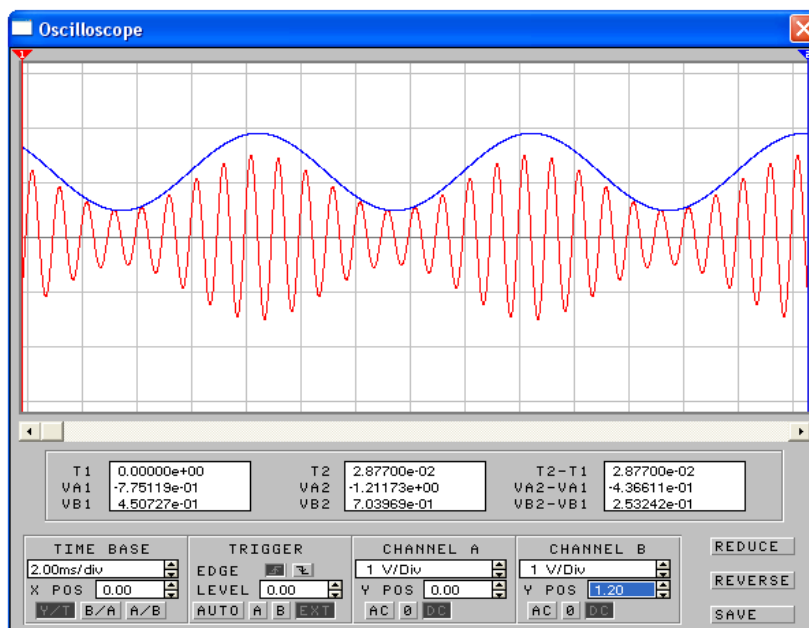
Specifickým druhem AM je dále modulace

QAM kvadrurní modulace používaná pro přenos barvonosných složek v normě PAL, kdy jedna informace o barvě je přenášena na sínové složce nosné vlny a druhá barevná informace na kosínové složce nosné vlny.

K dekodování informace je však nosná vlna zapotřebí (signál o frekvenci nosné vlny), ten se ale může vytvořit generátorem v přijímači, který je, například vzorky signálu nosné, které se pravidelně vysílačem vysílají, s nosnou vlnou synchronizován. Obecně se dá říci, že takovýto systém přenosu vyžaduje komplikovanější obvody přijímače a proto se k němu přistupuje jen ve vybraných případech. Jako příklad amplitudové modulace s potlačenou nosnou si můžeme uvést modulaci dvou rozdílových barevných složek obrazu na barvonosný kmitočet a modulaci rozdílového stereofonního signálu na pomocnou nosnou při stereofonním vysílání v pásmu VKV.

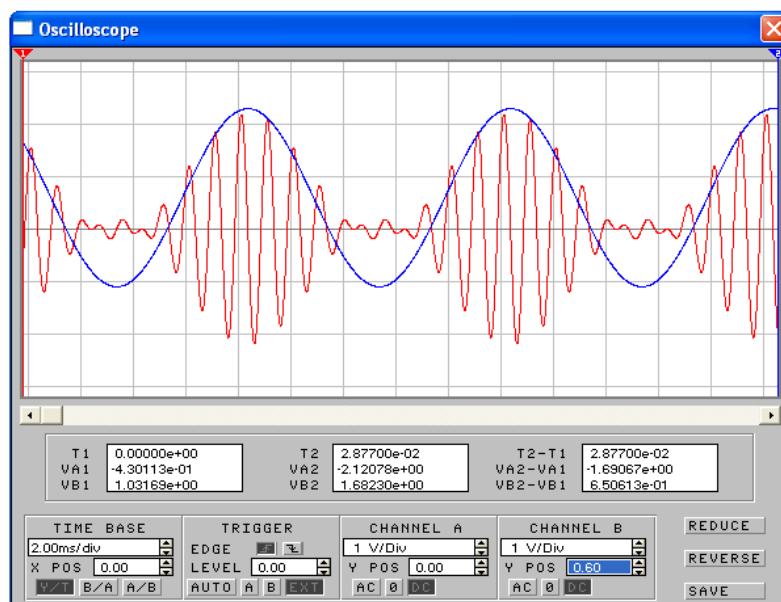
Vysílaný výkon a potřebnou šířku pásma je možné ještě redukovat dalším způsobem. Je možné ukázat, že když amplitudově modulovanému signálu "odřízneme" jedno postranní pásmo zachováme přenášenou informaci, jen zmenšíme hloubku modulace (u modulace jedním sinusovým signálem na 1/2). "Odříznutí" jednoho postranního pásma je možné kombinovat s částečným potlačením nosné vlny a dosáhnout tak efektivního využití výkonu vysílače. Jako příklad přenosu signálu amplitudovou modulací s částečně potlačeným jedním (spodním) postranním pásmem a částečně potlačenou nosnou je možné uvést televizní přenos obrazu (původní potřebná šířka pásma 13 MHz uvedená výše se redukuje odříznutím části spodního postranního pásma na 8 MHz na jeden televizní kanál; zvuk se přenáší kmitočtovou modulací, jak bude uvedeno dále).

Pro názornost si můžeme namodelovat průběh amplitudově modulované nosné vlny v programu Electronics Workbench



obr. 1.3 Časový průběh amplitudově modulované nosné vlny pro $m_a = 0,5$

Na obrázku jsou zobrazeny dva časové průběhy. Červený průběh s vyšším kmitočtem představuje nosnou vlnu, modrý průběh s nižším kmitočtem průběh modulačního signálu. Na dalším obrázku si ukážeme stav, kdy amplituda modulačního signálu bude vyšší, než amplituda nosné vlny. potom modulační index $m_a > 1$

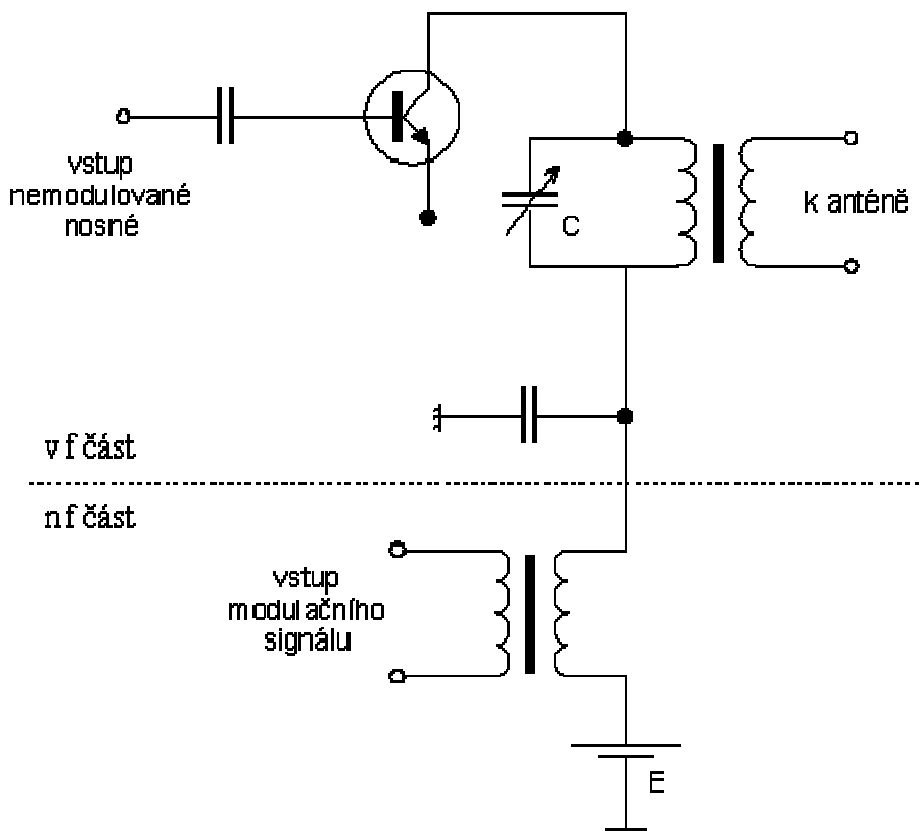


obr. 1.4 Časový průběh amplitudově modulované nosné vlny pro $m_a = 1,2$

Časový průběh na obr. 1.4 představuje stav, který u amplitudové modulace nesmí nastat , neboť v důsledku přemodulování dochází k přerušení nosné vlny a tím ke zkreslení přenášené informace.. Z tohoto důvodu se u AM používá maximální index hloubky modulace $m_a = 0,8$

1.1.2 Metody amplitudové modulace

Po vysvětlení principu amplitudové modulace, vysvětleme si nyní jakým způsobem můžeme prakticky dosáhnout toho, abychom vytvořili amplitudově modulovaný signál. Z principu amplitudové modulace plyne, že amplitudově modulovaný signál vytvoříme vynásobením signálu reprezentujícího amplitudu proměnnou v rytmu přenášené informace a signálu nosné vlny. Toto vynásobení je možné provést přímo v analogových obvodech k tomu určených, tzv. násobičkách (modulátorech). Takovou násobičkou může být tranzistorový zesilovač, jehož zesílení učiníme úměrné velikosti napájecího napětí, viz obrázek 1.5



obr. 1.5 Příklad zapojení modulátoru AM na vysoké napěťové úrovni

Na obr.1.5 je znázorněn tranzistorový zesilovač ve třídě C, to jest s takovým nastavením pracovního bodu, aby proud tranzistorem tek l po dobu kratší, než polovina periody. Zesilovač pracuje do rezonančního obvodu LC, který kmitá samostatně na svém rezonančním kmitočtu a proudové impulsy od tranzistoru jen kompenzují ztráty vzniklé v rezonančním obvodu nenulovým odporem cívky a svodem kondenzátoru. Je to systém velmi obdobný mechanickému kyvadlu, které kývá se svou vlastní frekvencí, a abychom udrželi konstantní amplitudu oscilací, tedy kompenzovali ztráty třením, "aktivujeme" každou periodu malým mechanickým impulsem kyvadlo, např. při rozběhu z jedné krajní polohy. Bude-li tento "impuls" proveden větší silou, rozkmitáme kyvadlo na větší amplitudu. Podobným způsobem se chová obvod na obrázku 1.5 Signál na vstupu tranzistoru (vf. vstup) otevírá tranzistor jen po krátký úsek periody a otevřený tranzistor pak převádí proudový "impuls" do oscilačního obvodu, aby tak kompenzoval ztráty v tomto oscilačním obvodu. Zvýšíme-li napájecí napětí tranzistoru, zvýšíme tím i proud tranzistorem po dobu jeho otevření a následně i amplitudu

kmitů rezonančního obvodu. Tento proces je v určitých mezích napájecího napětí lineární, tj. amplituda kmitů oscilačního obvodu je úměrná napájecímu napětí. Na obrázku je znázorněno, jak je modulační napětí pomocí transformátoru přivedeno do série s napájecím napětím. Označíme-li zesílení zesilovače A, pak můžeme v oblasti, kde závislost zesílení na napájecím napětí E je lineární, napsat $A = \text{konst.} \cdot E$. Výstupní napětí tohoto stupně, tj. amplituda napětí na oscilačním obvodu, je tedy jednak úměrná vstupnímu napětí nosné vlny, jednak napájecímu napětí, na které se sériově přičítá modulační napětí:

$$U_{\text{výst}} = \text{konst.} \cdot U_{\text{vst}} \cdot E \quad 1.8$$

Dosadíme-li za E součet s modulačním napětím, tedy

$$E = E_0 \cdot (1 + m_a \cdot \cos(\omega_m t)) \quad 1.9$$

(kde E_0 je původní napájecí napětí stupně, kdy modulační napětí je rovno nule) a za U_{vst} napětí nosné vlny,

$$U_{\text{vst}} = \text{konst.} \cdot \cos(\omega_n t) \quad 1.10$$

vidíme, že výstupní napětí pak bude dáno jako:

$$U_{\text{výst}} = \text{konst.} \cdot \cos(\omega_n t) \cdot (1 + m_a \cdot \cos(\omega_m t)), \quad 1.11$$

tedy amplitudově modulovanou nosnou vlnu tak, jak jsme chtěli. Tomuto typu modulátoru se říká *kolektorový modulátor* (původně s elektronkami to byl anodový modulátor) a reprezentuje nám přímo násobičku dvou signálů.

Násobení signálů můžeme provést i nepřímo, na nelineární impedanci. Představme si nelineární prvek, tj. prvek s nelineární voltampérovou charakteristikou, například *diodu s přechodem PN*. Voltampérová charakteristika této diody je teoreticky exponenciální, pro malé signály je však možné exponenciální charakteristiku rozvinout do Taylorovy řady a zanedbáním vyšších členů aproximovat teoretickou charakteristiku parabolou, tedy křivkou, jejíž analytické vyjádření je

$$i = a_0 + a_1 v + a_2 v^2, \quad 1.12$$

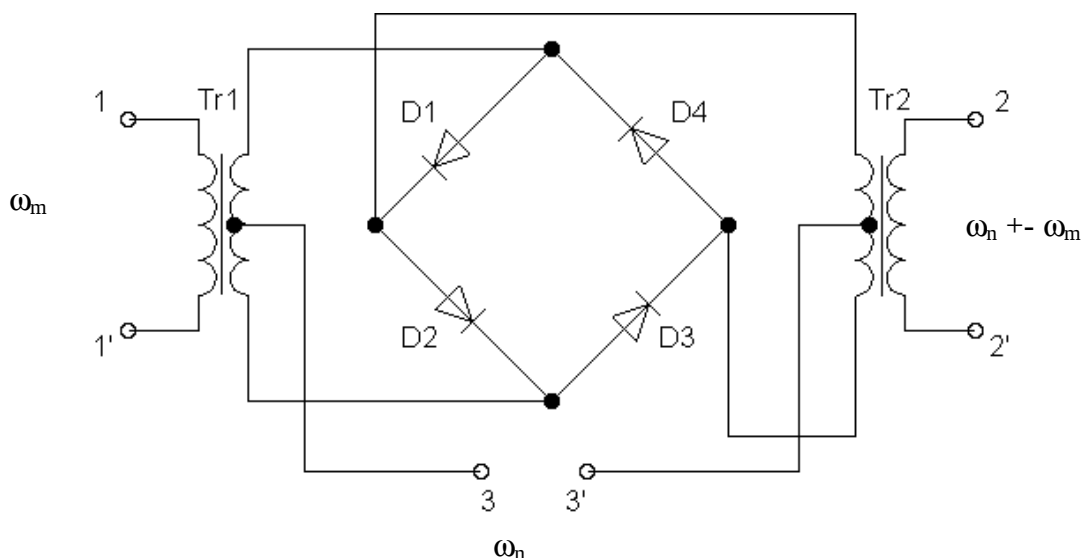
kde i je proud diodou a v napětí na diodě. Předpokládejme dále, že na diodu připojíme napětí, které dostaneme prostým součtem napětí nosné vlny a modulačního napětí,

$$v = A_n \cdot \cos(\omega_n t) + A_m \cdot \cos(\omega_m t). \quad 1.13$$

Předpokládáme-li, jak je obvyklé, že $\omega_n \gg \omega_m$, můžeme pomocí vhodných filtrů odfiltrovat z tohoto signálu všechny frekvence kromě pásma mezi $\omega_n - \omega_m$ a $\omega_n + \omega_m$.

Vytvořili jsme tedy také amplitudově modulovaný signál. Modulátory založené na tomto principu využívají obvykle nelineární vstupní charakteristiky tranzistoru, nebo nelineární charakteristiku přechodu PN-polovodičové diody. Tyto modulátory jsou zapojeny jako mřížkové modulátory, nebo *vyvážené, balanční, kruhové modulátory*. Vzhledem k tomu, že jsou nutné dodatečné filtry a že nelinearita vstupní charakteristiky může být vyjádřena i členy

vyššího než druhého řádu (což se projeví v dodatečném zkreslení amplitudově modulovaného signálu), využívají se tyto, tzv. mřížkové modulátory mnohem méně často než kolektorové (anodové).

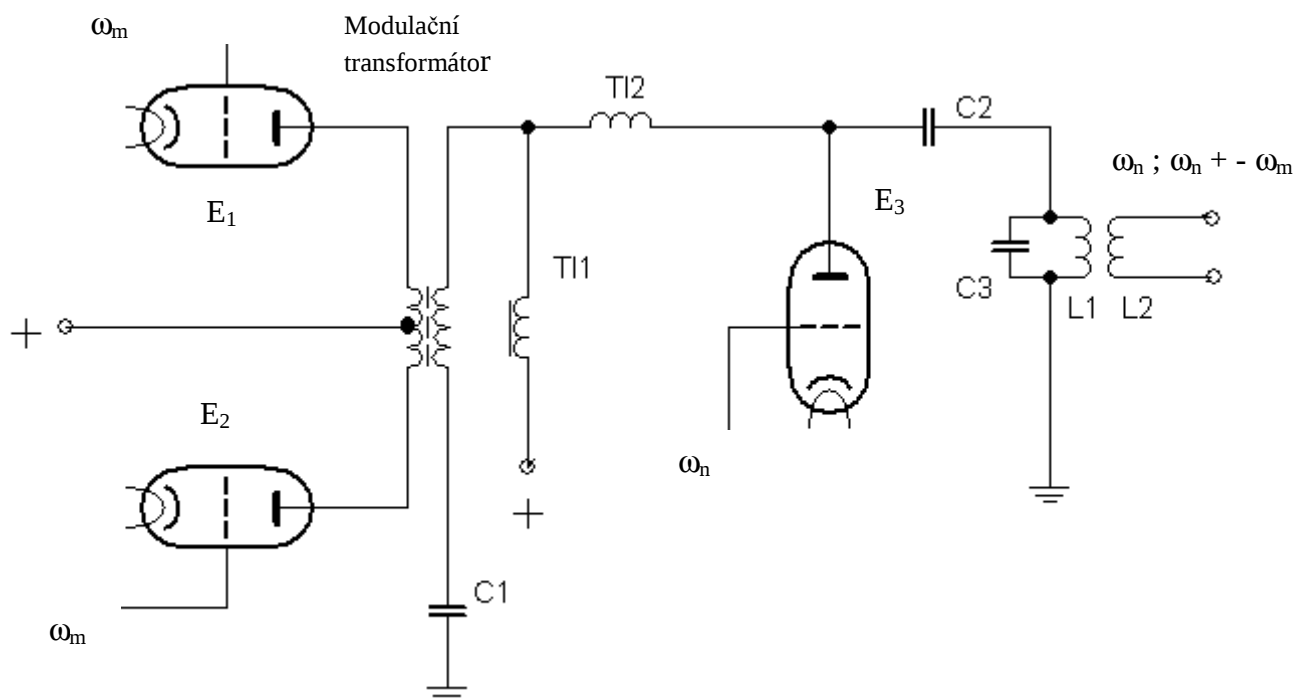


obr.1.6 Kruhový modulátor

Napětí nosného kmitočtu ω_n je připojeno na středy vinutí modulačních transformátorů, modulační signál s kmitočtem ω_m na primární vinutí Tr_1 . Na sekundárním vinutí Tr_2 dostáváme amplitudově modulovaný signál obsahující obě postranní pásma s potlačenou nosnou.

Na svorky 1-1' je přiveden signál s kmitočtem modulačního signálu, na svorky 3-3' signál nosné vlny. Modulátor je tvořen čtveřicí diod $D_1 - D_4$ a dvěma transformátory Tr_1 a Tr_2 . V okamžiku, kdy na svorce 3 je kladné napětí, protéká proud nosného kmitočtu na střed sekundární části Tr_1 , kde se za předpokladu symetrického vinutí a souměrnosti parametrů diod D_1 a D_3 uzavírá přes sekundární vinutí transformátoru Tr_2 na střed tohoto vinutí a na svorku 3'. Protože dělené vinutí Tr_2 má zcela shodné parametry, jsou oba proudy, které polovinami vinutí protékají shodné, ale opačného smyslu tedy se jejich magnetické účinky ruší a na svorkách 2-2' se neobjeví žádný signál nosné vlny. Podobný jev nastane při opačné polaritě signálu nosné vlny, nyní jsou aktivovány diody D_4 a D_2 se stejným účinkem v transformátoru Tr_2 . Pro správnou funkci modulátoru je nutné, aby při jednotkovém přenosu obou transformátorů, byla hodnota napětí nosného kmitočtu minimálně pětinasobkem hodnoty napětí modulačního kmitočtu. Pokud bude tato podmínka splněna, pak proud modulačního kmitočtu ze svorek Tr_1 protéká přes vodivé diody nehlédě na polaritu modulačního signálu, protože vodivost diod je dána především úrovní signálu nosné vlny. Tedy příklad: je-li svorka 3 kladná a současně je kladná svorka 1, pak modulační proud protéká v obvodu – D_1 - primární vinutí Tr_2 – D_3 - spodní konec sekundáru Tr_1 .

Na obr.1.7 je znázorněn anodový modulátor pracující vysoké napěťové úrovni s modulačním transformátorem bez syčení jádra.



obr. 1.7 Zapojení pro anodovou modulaci – modulátor Heisingova typu bez syčení jádra modulačního transformátoru

V klidovém režimu, bez přítomnosti modulačního signálu, protékají primárním vinutím modulačního transformátoru klidové proudy výkonového nf. stupně pracujícího ve třídě B. Oba proudy I_{aE1} a I_{aE2} mají stejnou hodnotu ale působí v primárním vinutí proti sobě, proto se v sekundárním vinutí netransformuje žádné napětí. Na anodu E_3 která je zapojena jako výkonový vysokofrekvenční zesilovač s rezonanční zátěží, je připojeno anodové napětí přes tlumivku Tl 1 a Tl 2. Elektronkou protéká vf.proud o kmitočtu ω_n , který vytvoří kmitavé napětí v rezonančním obvodu zátěže. Pro maximální účinnost pracuje E_3 ve třídě C, (nedochází k přenosu celého harmonického průběhu), ale rezonanční zátěž obnoví původní tvar harmonického signálu. Po připojení modulačního napětí na dvojčinný koncový stupeň E_1 , E_2 vznikne na sekundární straně modulačního transformátoru napětí s kmitočtem modulačního signálu ω_m , jehož okamžitá hodnota se přičítá, nebo odečítá od napájecího anodového napětí výkonového stupně E_3 . Při kladné půlvlně modulačního signálu na horní svorce sekundárním vinutí MT se celkové anodové napětí E_3 zvýší, zvýší se anodový proud a zvýší se úroveň kmitavého napětí v rezonanční zátěži. Při záporné půlvlně je tomu naopak. V obvodu rezonanční zátěže tak vznikne amplitudově modulovaný signál obsahující jak signál nosné vlny ω_n , tak i obě postranní pásma $\omega_n + \omega_m$ a $\omega_n - \omega_m$. Základní podmínkou je však velký výkon koncového nf. zesilovače, tento musí být $\frac{1}{2}$ výkonu koncového vf. stupně. Tlumivka Tl 2 omezuje přenos signálu nosné vlny do zdrojových obvodů.

Shrnutí: AM se používá pro rozhlasové vysílání v pásmu DV,SV,KV a pro modulaci obrazové informace při televizním přenosu. Podstatnou nevýhodou AM je značná citlivost na amplitudové poruchy a malá šířka pásma. Tato šířka je dána normou a umožňuje omezený přenos akustických signálů v pásmu AM rozhlasu na rozsah 30Hz až 4,5 kHz (10 kHz pro tzv.blízký příjem). Současně je vysílání AM v základních pásmech energeticky nevýhodné, protože $\frac{1}{2}$ výkonu vysílače je obsažena v nemodulované nosné a další $\frac{1}{4}$ je v postranním pásmu, které se nevyužívá.

1.2. Frekvenční modulace

Vedle amplitudové modulace, užívané pro vysílání rozhlasu v pásmu dlouhých, střední a krátkých vln a pro přenos obrazového signálu televize, se v komerčním vysílání rozhlasu používá ještě tzv. **frekvenční modulace**. Při tomto systému modulace se informace, kterou chceme přenášet, **kóduje** nikoliv do amplitudy, ale **do okamžitého kmitočtu nosné vlny**.

Při frekvenční modulaci měníme okamžitý kmitočet nosné vlny ω_n úměrně modulačnímu signálu ω_m

Pro kmitočtovou modulaci a její kmitočet platí

$$\omega = \omega_0 + m\Delta f \sin \omega_m t \quad 1.2.1$$

kde ω_0 je střední kmitočet , m poměrná amplituda signálu (hloubka modulace 0- 1), Δf největší dovolená odchylka kmitočtu, tzv. maximální kmitočtový zdvih, frekvenční odchylka (deviace).

Je tedy zřejmé, že kmitočet nosné tj. rozdíl vlny se tak bude měnit od $\omega_n - \Delta\Omega$ do $\omega_n + \Delta\Omega$. **Veličinu $\Delta\Omega$ mezi maximálním a minimálním kmitočtem nosné vlny, nazýváme frekvenčním zdvihem (frequency swing), polovinu této hodnoty frekvenční odchylkou (frequency deviation).** Je zřejmé (a hned si to ukážeme), že čím bude větší frekvenční zdvih, tím se bude průběh nosné vlny více odchylovat od harmonického průběhu a tím více komponent Fourierova rozvoje bude třeba k jeho dostatečně přesnému popsání. Maximální frekvenční zdvih je tedy veličina, kterou je třeba administrativně předepsat, abychom mohli každému vysílači na frekvenční modulaci (FM) přidělit konstantní kmitočtový interval (kanál). **Například pro rozhlasové vysílání na FM je předepsaná maximální frekvenční odchylka $\Delta f \pm 75\text{kHz}$, tedy frekvenční zdvih $\Delta\Omega$ 150 kHz, pro vysílání zvukového doprovodu k televiznímu vysílání je předepsaná maximální frekvenční odchylka $\Delta f \pm 25\text{kHz}$.** U občanských radiostanic, které pracují rovněž s frekvenční modulací, je tak velká frekvenční odchylka zbytečná (pracujeme pouze se signálem řeči, který lze bez újmy na srozumitelnosti frekvenčně omezit shora kmitočtem 3kHz) a je tedy stanovena na $\pm 5\text{kHz}$ (tzv. úzkopásmová FM). Je třeba si uvědomit, že u frekvenční modulace se převádí okamžitá amplituda modulačního napětí $u_m(t)$ na okamžitý kmitočet nosné vlny ω_n . Proto hlasitější průběh zvukového signálu (a tedy signálu s větší amplitudou) vyvolá větší frekvenční odchylku okamžitého kmitočtu nosné od její původní hodnoty ω_n , než signál tišší. Hovoříme-li u frekvenční modulace o "hloubce modulace" v procentech, nebo přesněji o procentech modulace, míníme tím poměr skutečné frekvenční odchylky u posuzovaného vysílače ku maximální předepsané frekvenční odchylce (v procentech, tedy krát 100).

Právě provedenou frekvenční analýzou frekvenčně modulované nosné vlny jsme zjistili, že šířka pásma potřebná pro přenos informace při FM je vždy stejná nebo větší, než šířka pásma potřebná pro přenos informace při AM. Proč se tedy vůbec frekvenční modulace používá? Odpověď zní: pomocí FM je možné při stejném výkonu vysílače získat v přijímači lepší odstup signálu od šumu než pomocí AM.

Stanovení potřebné šířky pásma B_{FM} rádiového kanálu pro přenos FM může být založeno na různých hlediscích. Bereme v úvahu šířku pásma, v němž jsou přenášeny postranní složky s amplitudou větší než 1% amplitudy nosné vlny, dalším kritériem může být přípustné nelineární zkreslení apod. V praxi se většinou potřebná šířka pásma při modulaci jedním

harmonickým signálem o kmitočtu f_m a o amplitudě U_m , nejčastěji určuje pomocí *Carsonova vztahu*

$$B_{FM} \approx 2(f_m + \Delta f) = 2f_m + 2\Delta f \quad 1.2.2$$

kde f_m představuje maximální hodnotu modulačního signálu pro Mono provoz 15kHz
pro Stereo provoz 53 kHz

$\Delta f = k_{FM} U_m$ je kmitočtová deviace signálu FM

Dále je potřeba vysvětlit pojem šumu, neboli rušivého signálu. Každý zdroj signálu, např. zesilovač zvukového signálu z mikrofonu, si můžeme představit jako dva seriově spojené generátory napětí (a seriově k nim zapojený vnitřní odpor zdroje). Jeden generátor generuje užitečný signál, druhý neužitečný signál, kterému říkáme šum. Jak se do užitečného signálu šum dostane? Jsou v principu dvě cesty a podle toho rozdělujeme šum na vnější a vnitřní. Vnější šum je ten, který se dostane do signálu z vnějších zdrojů rušení - například indukci z blízkého rozvodu elektrické sítě, vlivem pole blízkého vysílače, z jiskření kolektorových motorů nebo od zapalování spalovacích motorů apod. Všechny tyto zdroje rušivých signálů se skládají a výsledkem je rušivý signál, šum, kterému říkáme vnější proto, že jej můžeme v principu odstranit tím, že odstraníme vnější zdroje rušení (nebo se přestěhujeme daleko od nich). Kromě toho existují však zdroje šumu, které jsou pro vodiče a polovodiče inherentní a které proto odstranit nelze. Jsou způsobeny tepelným pohybem nosičů náboje v kovu nebo v polovodiči. Význačnými druhy vnitřního šumu je tzv. tepelný, nebo bílý šum, charakteristický pro kovy, jehož frekvenční charakteristika sahá s konstantní amplitudou od nuly do nekonečna a tzv. $1/f$ šum, charakteristický pro polovodiče, který byl pojmenován podle tvaru své frekvenční charakteristiky. Šumové napětí je pak dáno výrazem

$$U_s = \sqrt{4k\Theta BR} \quad 1.2.3$$

kde k je Boltzmanova konstanta $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

Θ je absolutní teplota K

B šířka pásma přenášeného signálu

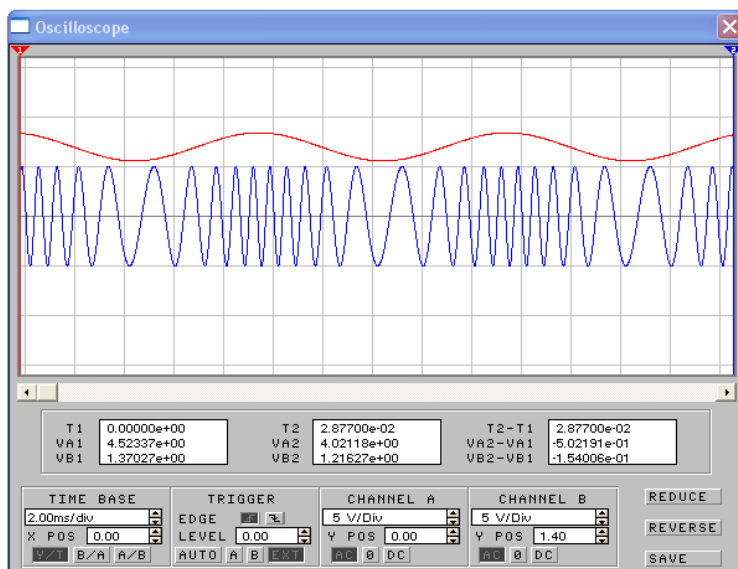
R ekvivalentní šumový odpor

Dáme-li do poměru výkon signálu a sumární výkon šumů, které jsou v signálu obsaženy, dostaneme bezrozměrné číslo, tzv. poměr signál-šum (udává-li se v dB říkáme mu odstup signálu od šumu) označujeme poměr S/N .

V případě porovnávání druhů modulace z hlediska odstup signálu od šumu je zřejmé, že zde půjde o šumy vnější, tedy šumy, které se do signálu dostanou při přenosu od vysílače k přijímači. Představme si nejprve systém AM s rušivým signálem. Abychom zvýšili poměr signál-šum, tedy výkon detekovaného signálu, máme možnost buď zvýšit výkon vysílače, nebo hloubku modulace. Vzhledem k tomu, že hloubka modulace m_a je číslo mezi 0 a 1, nemůžeme zvýšit hloubku modulace na víc než 100% (v případě přenosu s jedním postranním pásmem na víc než 50%) a tak jedinou možností je zvýšení výkonu vysílače, který je ale též limitován. V systémech FM je možné zvýšení **indexu kmitočtové modulace** $\beta = \Delta f / f_m$ a tím zvýšení výkonu detekovaného signálu. Navíc velká většina rušivých signálů se projeví na přenášené modulované nosné jako změna její amplitudy, která v systémech FM není vůbec jako rušivý signál detekována. Je ovšem zřejmé, že je-li kmitočtové pásmo přenosu FM stejně široké jako AM, nedosáhneme prakticky žádné výhody když použijeme frekvenční modulaci. Z tohoto důvodu se pro přenos televizního obrazového signálu v pozemských podmínkách používá amplitudová modulace a z téhož důvodu se frekvenční modulace využívá

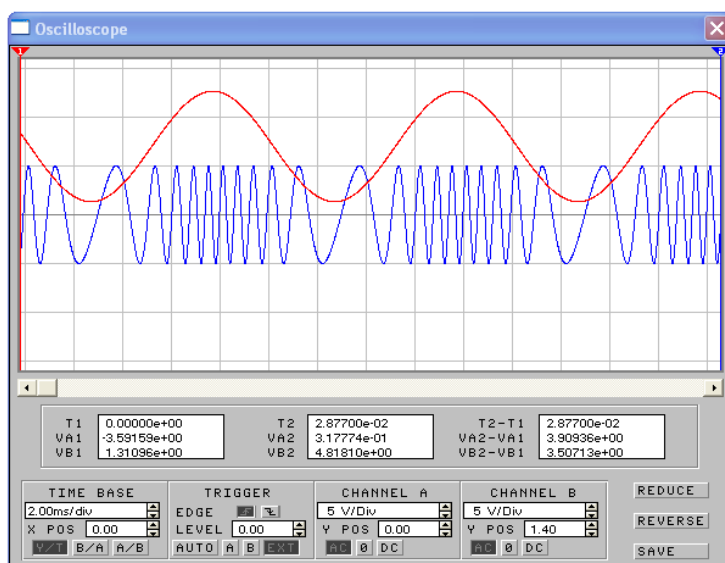
v rozhlasovém přenosu jen na velmi krátkých vlnách, tj. v pásmu okolo 100 MHz (kmitočet nosné).

V další části textu jsou zobrazeny průběhy kmitočtově modulované nosné vlny při různých úrovních indexu kmitočtové modulace a při různých hodnotách úrovně modulačního napětí.



obr. 1.8 Časový průběh kmitočtově modulované nosné vlny pro jeden modulační kmitočet $M=5$

Na obr. 1.8 je znázorněn průběh kmitočtově modulované nosné vlny pro modulační kmitočet $f_m = 100$ Hz. Na obr. je názorně vidět, že kladná složka modulačního signálu $U_m = 1$ V zvyšuje kmitočet nosné vlny a záporná složka naopak kmitočet nosné snižuje. Na obr. 1.9 si ještě ukážeme vliv zvýšení amplitudy, chcete-li hlasitosti modulačního signálu na časový průběh modulovaného signálu. Pro index kmitočtové modulace $\beta = 5$, je kmitočtová deviace $\Delta f = 5 \cdot 100$ Hz = 500 Hz



obr.1.9 Časový průběh kmitočtově modulované nosné vlny pro jeden modulační kmitočet $M=7$

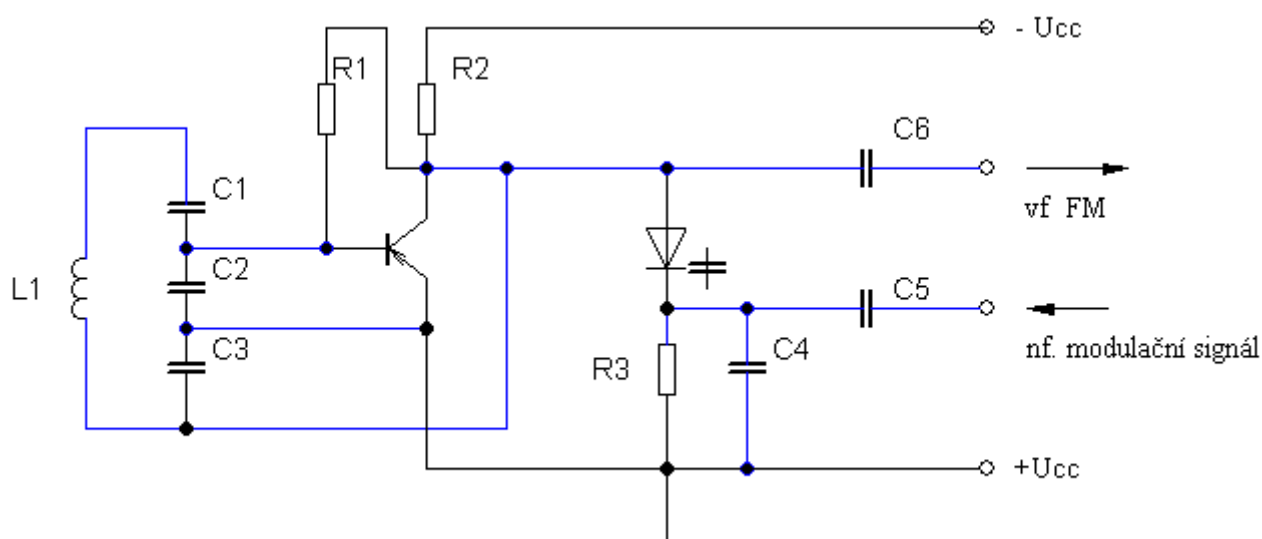
Pro index kmitočtové modulace $\beta = 7$, je kmitočtová deviace $\Delta f = 7 \cdot 100 \text{ Hz} = 700 \text{ Hz}$

1.2.1 Metody frekvenční modulace

V tomto odstavci si popíšeme jen nejjednodušší principy, jak získat kmitočtově modulovaný signál. Prvním z těchto principů je využití kapacitní diody, varikapu, v rezonančním obvodu generátoru nosného kmitočtu. Generátory s rezonančním obvodem LC, tzv. LC generátory, obsahují zpravidla jeden rezonanční obvod LC, který určuje kmitočet generátoru (generátor je vlastně speciální zesilovač s tzv. kladnou zpětnou vazbou, který se stará o to, aby kmity na oscilačním rezonančním obvodu měly stále stejnou amplitudu; nahrazuje tedy vhodným způsobem ze zdroje stejnosměrného napětí ztráty v oscilačním rezonančním obvodu, způsobené ohmickým odporem cívky a svodem kondenzátoru). Kmitočet generátoru f_0 je pak určen Thomsonovým vztahem

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad 1.2.4$$

Použijeme-li v rezonančním obvodu namísto kondenzátoru s pevnou hodnotou kapacity varikap, můžeme pomocí vnějšího napětí měnit kapacitu varikapu a tím i frekvenci, kterou generátor generuje. Závislost frekvence generátoru na tomto vnějším (modulačním) napětí sice není lineární, ale pokud jsou změny frekvence takto vyvolané malé ve srovnání s rezonančním kmitočtem oscilačního obvodu (to je většinou splněno, neboť kmitočet nosné je v řádu desítek MHz a maximální frekvenční zdvih je 100 kHz), můžeme závislost kmitočtu rezonančního obvodu na modulačním napětí aproximovat s dostatečnou přesností lineární závislostí.



obr.1. 10 Zapojení modulátoru pro kmitočtovou modulaci

Na obr.1.10 je zapojení kmitočtového modulátoru s Colpitzovým oscilátorem. Rozmítání kmitočtu oscilátoru zajišťuje kapacitní dioda-varikap, polarizovaná ve zpětném směru stejnosměrným napětím, které je přivedeno přes rezistory R_2 a R_3 . Okamžitá hodnota kapacity varikapu se mění v závislosti na úrovni modulačního signálu, který je přiveden děličem C_5 , R_3 na jeho katodu. Vysokofrekvenčně je rezistor R_3 blokován kondenzátorem C_4 , takže je varikap připojen paralelně ke kondenzátoru C_3 a může tak rezonanční obvod $LC_1C_2C_3$ rozladovat. Výstupní vysokofrekvenční signál je tedy kmitočtově modulován nízkofrekvenčním signálem.

Další možností, jak provést frekvenční modulaci, je využít generátoru, který je přímo konstruován tak, aby se mu generovaná frekvence dala měnit pomocí napětí přivedeného zvnějšku. Takovým generátorům říkáme VCO, napětím řízené generátory (voltage controlled oscillator). Frekvence (nemodulovaná) takových generátorů nemusí přímo ležet v oblasti, kde je třeba (tedy např. pro rozhlasové vysílání FM v řádu desítek MHz), důležité je, aby frekvence generátoru byla vyšší, než je požadovaná frekvenční odchylka a aby závislost kmitočtu generátoru na vnějším napětí byla lineární i pro relativně velké změny kmitočtu vzhledem k frekvenci generátoru bez modulace. Takto modulovaný kmitočet pak můžeme "posunout" do frekvenčního pásma, které požadujeme pomocí tzv. heterodynní techniky. Při této technice násobíme signál z VCO se signálem z generátoru konstantního kmitočtu, čímž dostáváme součtový a rozdílový kmitočet, z čehož si v tomto případě vybíráme součtový. Předpokládejme, že kmitočet VCO je ω_{VCO} a je modulován s kmitočtovou odchylkou $\Delta\omega$, tj. kmitočet VCO se pohybuje při modulaci v rozmezí $\omega_{VCO} \pm \Delta\omega$. Násobíme-li tento signál se signálem o kmitočtu ω_{vf} , dostaneme kmitočty

$$\omega_{vf} - (\omega_{VCO} \pm \Delta\omega) \text{ a } \omega_{vf} + (\omega_{VCO} \pm \Delta\omega), \quad 1.2.5$$

metoda opět vychází z trigonometrické identity

$$\cos(x) \cdot \cos(y) = (1/2)[\cos(x+y) + \cos(x-y)]. \quad 1.2.6$$

Kmitočet v rozmezí $\omega_{vf} - (\omega_{VCO} \pm \Delta\omega)$ odstraníme filtrem. Když volíme $\omega_{vf} + \omega_{VCO} = \omega_N$, dostáváme pak kmitočtově modulovanou nosnou o základním kmitočtu ω_N , jejíž kmitočet se mění v rozmezí $\omega_N \pm \Delta\omega$.

Shrnutí: výhody kmitočtové modulace ve srovnání s modulací amplitudovou

- možnost vyloučení amplitudových poruch použitím oboustranného omezovače amplitudy(amplituda nepřenáší žádnou část informace
- jednodušší modulátor a tím i vysílač
- vysílač FM signálu je výkonově dobře využit. Při správné velikosti indexu M (kolem $M=5$) klesá výkon nosného kmitočtu téměř k nule a skoro všechna vysílaná energie je v postranních pásmech užitečných pro přenos informace
- menší vzájemné rušení dvou vysílačů pracujících na stejném nosném kmitočtu, nebo na kmitočtech blízkých

lepší odstup užitečného signálu od hluku a šumu. Optimálního odstup signálu od rušení lze při přenosu FM dosáhnout optimálním využitím kmitočtového zdvihu $\Delta\Omega$. Proto se na straně

vysílače uměle zvyšují amplitudy modulačního signálu v oblasti vyšších kmitočtů (preemfáze). Na straně přijímače se za demodulátorem provede opačná korekce (deemfáze). Časová konstanta $\tau = 50 \mu s$, kmitočet $3,2 \text{ kHz}$. $f = 1 / 2\pi\tau$

1.3 Fázová modulace

Při fázové modulaci zůstává amplituda nosné vlny konstantní stejně jako u kmitočtové modulace. V důsledku změny kmitočtu ω_m a amplitudy modulačního signálu U_m se mění fáze nosné vlny. Fázový úhel φ nosné vlny se působením modulačního signálu mění podle vztahu

$$\varphi = \Delta\varphi \sin \omega t \quad 1.3.1$$

kde $\Delta\varphi$ je fázový zdvih, který je úměrný hlasitosti, amplitudě U_m modulačního signálu a na kmitočtu modulačního signálu ω_m nezávisí. Na kmitočtu tohoto signálu závisí rychlost změny fáze. Na rozdíl od kmitočtové modulace, nepřenáší fázová modulace nespojitý, stejnosměrný signál, protože temeno obdélníkového impulsu nevykazuje změnu amplitudy- napětí stejnosměrného signálu je konstantní.