

Frekvenciamoduláció (FM)

Frekvencia moduláció esetén a vivő hullám pillanatnyi frekvenciája a moduláló jel pillanatnyi amplitúdójával arányos.

Az frekvenciamoduláció előállítása

A frekvenciamoduláció a szögmodulációk csoportjához tartozik. Frekvenciamodulációnál egy nagyfrekvenciás vivő frekvenciáját és ezzel együtt a szögét változtatják a kisfrekvenciás jel ütemében. Eközben az amplitúdó változatlan marad. Ezt az

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

1. Egyenlet

alapján úgy érik el, hogy a generátor frekvencia meghatározó rezgőkörének inductivitását vagy kapacitását a jel-rezgés ütemében változtatják. Legegyszerűbb a rezgőkör kapacitását vezérelni egy kondenzátormikrofon vagy kapacitásdióda segítségével. A kapacitásdióda kapacitása a rávezetett jelfeszültség függvényében változik, a kondenzátor mikrofoné pedig közvetlenül a hangrezgés hatására.

Moduláló- és FM-rezgés

A moduláló rezgés amplitúdójának és frekvenciájának az FM-rezgésre gyakorolt hatását egy kísérlettel lehet legjobban kimutatni.

$$u = U_v \cdot \cos \left[\omega_v t + \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \cdot \sin(\omega_m t) \right]$$

2. Egyenlet

Kísérlet:

moduláljunk egy frekvenciamodulálható generátort szinuszos jellel.

- a) Állandó jelfrekvencia mellett növeljük a jelamplitúdót.
- b) Állandó jelamplitúdó mellett növeljük a jelfrekvenciát.

Figyeljük az **oszcilloszkópábrát!** Ismételjük meg a kísérletet négyszög alakú moduláló feszültséggel!

Megfigyelés:

Ha az oszcilloszkópon sok nagyfrekvenciás periódust rajzoltatunk fel (lassú időeltérítés, a moduláló feszültséggel végzett indítás), akkor sűrűsödési és ritkulási szakaszokat veszünk észre, amelyek egymást váltogatják. A sűrűsödési szakaszokon igen sok nagyfrekvenciás rezgés zsúfolódik össze, a ritkulási szakaszokon pedig viszonylag kevés (1. ábra; 2. ábra). Két sűrűsödési vagy két ritkulási szakasz közötti távolság állandó és megfelel az információs feszültség T_m periódusidejének.

a) kísérlet:

Minél nagyobb a jelamplitúdó, annál jobban összezsúfolódnak a sűrűsödési szakaszokon a nagyfrekvenciás hullámok és így annál kevesebb rezgés marad a ritkulási szakaszokon. A vivő f_v

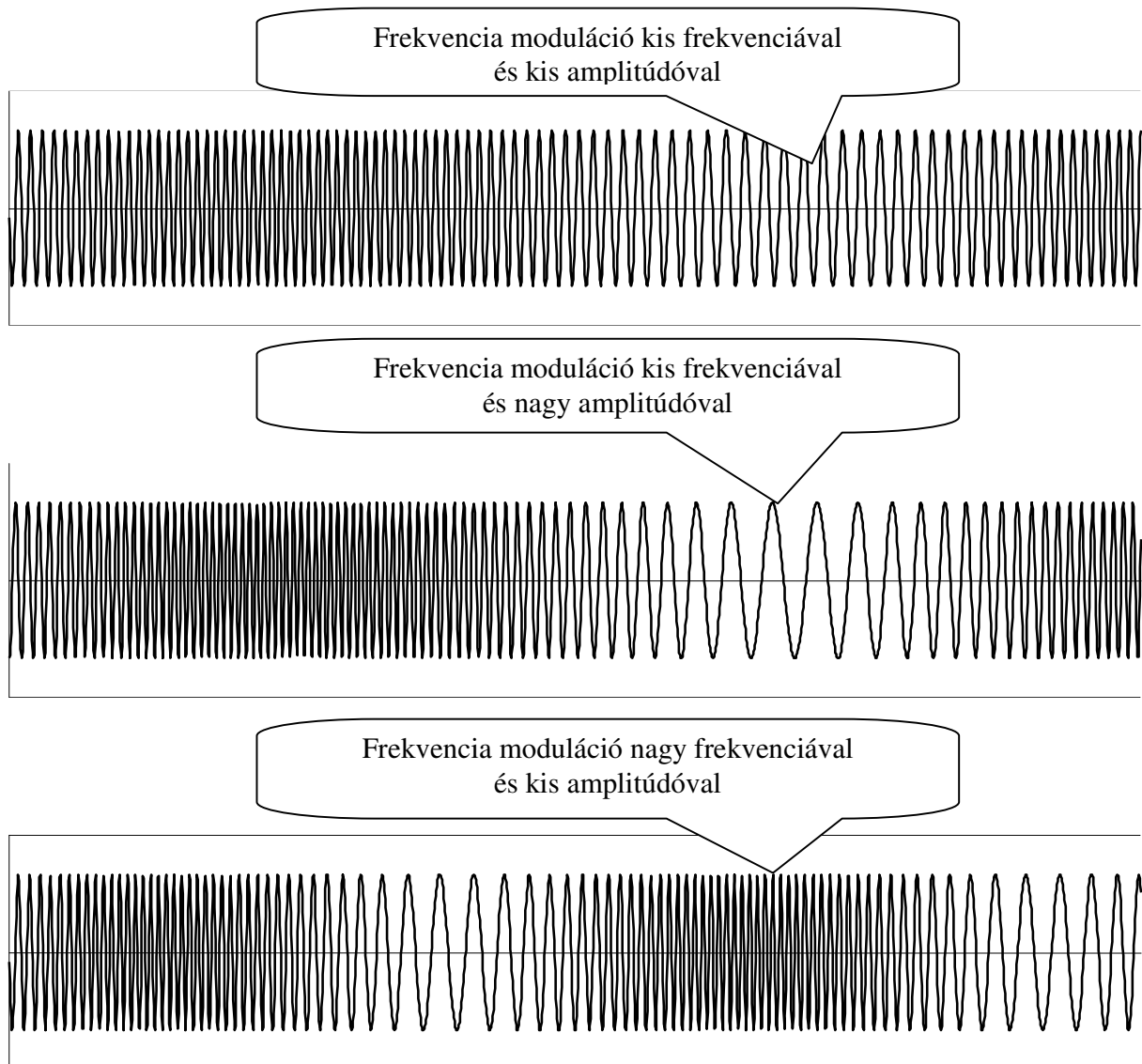
frekvenciája csak a moduláló rezgés nullátmeneteinél lép fel rövid időre, mint az a 2. ábra látható.

b) kísérlet:

Minél nagyobb az f_m moduláló frekvencia, annál jobban közelednek egymáshoz a sűrűsödési és ritkulási szakaszok. Mivel két sűrűsödési vagy ritkulási szakasz távolsága megegyezik a moduláló rezgés T_m periódusidejével, az FM-rezgés időfüggvényéből könnyen meghatározható az információs rezgés frekvenciája:

$$f_m = \frac{1}{T_m}$$

3. Egyenlet

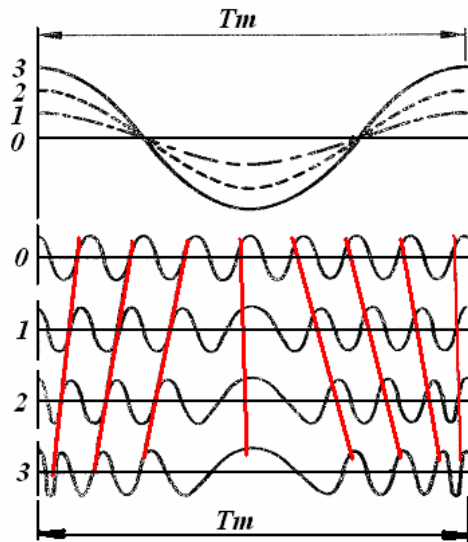


1. ábra A moduláló rezgés amplitúdójának és frekvenciájának hatása az FM-rezgésre

A moduláló feszültség pozitív amplitúdójának idején f_2 nagyfrekvencia, a negatív amplitúdó idején f_1 kisfrekvencia jön létre. Az átmenet f_1 -ről f_2 -re és fordítva, olyan hirtelen történik, hogy f_v egyáltalán nem látható az oszcilloszkóp ábrán.

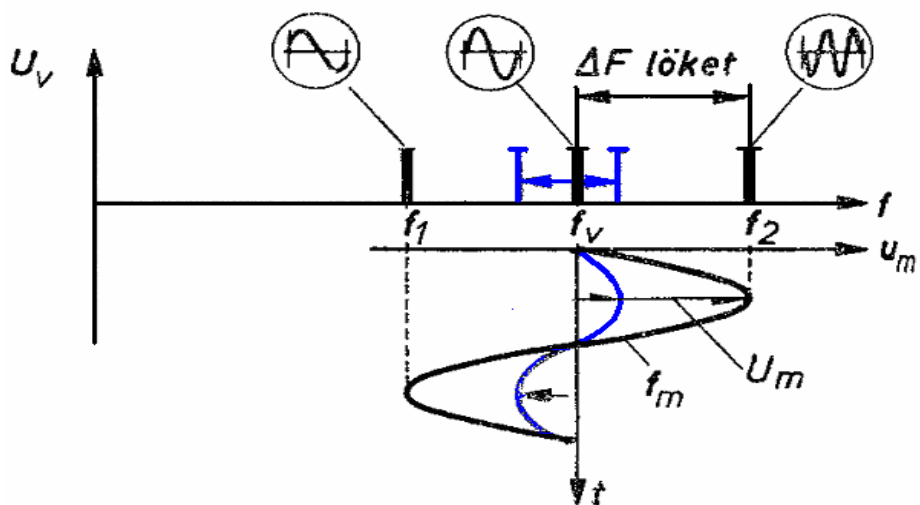
Pillanatnyi frekvencia: A feszültség csak négyszög alakú moduláló rezgés esetén marad hosszabb ideig egy értéken.

Minden más görbealagnál eltérőek a feszültség pillanatértékei. Különösen igaz ez természetesen a szinusz alaknál. Mivel a moduláló feszültség sohasem marad hosszabb ideig egy értéken, azért az FM rezgésen belül sem tud soha kialakulni valamely frekvenciának a teljes periódusa. A frekvencia minden pillanatban más és más. Ezért pillanatnyi **frekvenciáról** beszélünk. Ha a pillanatnyilag létrejövő frekvenciának nincs teljes periódusa, akkor már nem is lehet a pillanatnyi frekvenciát az $f = 1/T$ képlet alapján, a T periódusidő segítségével meghatározni. Jobb híján, a rezgésnek a nullátmenetnél mutatott meredekségéből lehet a pillanatnyi frekvenciára következtetni.



2. ábra Az AF-amplitúdó hatása FM-nél

Frekvencialöket: A moduláló feszültség révén az eredetileg modulálatlan f_v vivőfrekvencia megváltozik úgy, hogy a moduláló frekvencia ütemében és a moduláló feszültséggel egyenes arányban ingadozik egy f_2 maximum és egy f_1 minimum között. Az f_v -től a nagyobb vagy kisebb frekvenciáig terjedő kitérést frekvencialöketnek nevezik (3. ábra).



3. ábra A frekvenciamoduláció sematikus ábrázolása (nem spektrumábra, mivel f_1, f_v, f_2 csak pillantértékek)

A frekvencialöket arányos a moduláló feszültség amplitúdójával.

Beszéd- vagy zenei modulációnál tehát igaz, hogy:

A frekvencialöket arányos a hangerővel.

A maximális kitérést a moduláló feszültség csúcsértékével analóg módon ΔF csúcslöketnek nevezik. Az f_1 , ill. f_2 sarokfrekvenciák egzaktul meghatározhatók, ha az FM generátort nem váltófeszültséggel, hanem a moduláló feszültség csúcsértékével egyező nagyságú egyenfeszültséggel vezéreljük. Ekkor ΔF könnyen meghatározható:

$$\Delta F = \frac{1}{2}(f_2 - f_1) \quad \text{4. Egyenlet}$$

Hasonlóképpen arányos a megfelelő effektív löket, a moduláló feszültség effektív értékével. Tehát szinuszos jelalak esetén az effektív löket $\sqrt{2}$ -ször kisebb, mint a csúcslöket.

A kísérlet azt mutatta, hogy a nagy és kis frekvenciák annál nagyobb gyakorisággal lépnek fel sűrűsödési és ritkulási helyek formájában, minél nagyobb az f_m moduláló frekvencia. Beszéd- és zenei modulációnál ezért:

A hangmagasság meghatározza a maximális és minimális pillanatnyi frekvencia váltakozási gyakoriságát.

Modulációs mélység: Az AM $m = \Delta U_v / U_v$ modulációs mélységéhez hasonlóan FM-nél is lehet definiálni egy modulációs mélységet, éspedig az $m = \Delta F / f_v \cdot t$. Eltekintve attól, hogy ez a relatív vivőváltozás mértéke, a

$$\eta = \frac{\Delta\Omega}{\omega_m} = \frac{2\pi \cdot \Delta F}{2\pi \cdot f_m} \quad \text{5. Egyenlet}$$

A később tárgyalt modulációs index-szel ellentétben semmilyen gyakorlati jelentőséggel nem rendelkezik. Semmi esetre sem szabad a kettőt összetéveszteni.

Modulációs index

Egy FM-rezgés fázismenetének ismerete azért fontos, mert először is a zavarok befolyását mindig a fázislöketre és nem a frekvencialöketre kell vonatkoztatni, másodsor pedig az FM átviteli sáv szélessége elsősorban nem a frekvencia-, hanem a fázislöketektől függ.

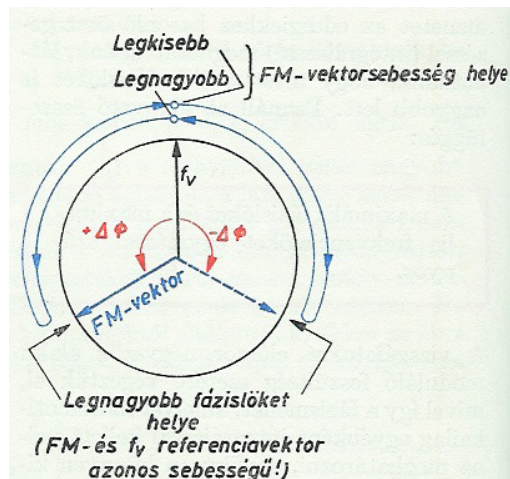
Az előző pontban kimutattuk, hogy a fázislöket egyenesen arányos a frekvencialökettel, és fordítva arányos a moduláló frekvenciával. Ebből adódik a $\Delta\Phi$ maximális fázislöketre a $\Delta F/f_m$ viszony. Ezt modulációs indexnek is nevezik, és η -val jelölik:

$$\eta = \frac{\Delta F}{f_m} \quad \text{6. Egyenlet}$$

Ez hasonló jelentőségű, mint AM-nél a modulációs mélység, ugyanis az FM intenzitásának mértékét mutatja.

A modulációs index és a maximális fázislöket ugyanazt jelenti.

Frekvenciaviszonyként felfogva, η egysége 1, fázislöketként felfogva radián.



4. ábra FM-vektor

A frekvencia, fázisszög és fázislöket, ill. modulációs index közötti összefüggést szemléltessük még vektorok segítségével is. Hasonlítsuk össze egy modulált rezgés vektorát egy modulálatlanéval. A modulálatlan vektor (4. ábra) állandó ω_v szögsebességgel forog, így fázisszöge egyenletesen növekszik. Az FM rezgés vektora (az ábrán kék) változó frekvenciája miatt gyorsabban vagy lassabban fut, mint a modulálatlan vektor. Amikor frekvenciája nagyobb az f_v vivőfrekvenciánál, akkor megelőzi a modulálatlan vektort, és amikor kisebb a frekvenciája

tv-nél, akkor lemarad mögötte. A modulálatlan vektortól való maximális távolság a maximális fázislököt. Előzésnél ez pozitív, lemaradásnál pedig negatív.

A frekvencia az előzés pillanatában a legnagyobb, ill. a lemaradás pillanatában a legkisebb, és a legnagyobb pozitív vagy negatív fáziseltérés pillanatában a két vektor azonos frekvenciájú. Ez ismét azt bizonyítja, hogy a legnagyobb frekvencialököt és a legnagyobb fázislököt nem egyidejűleg lép fel.

Világítsuk meg ezt két olyan jármű példájával, amelyek közül az egyik -a modulálatlan vektornak megfelelően- állandó sebességgel halad, miközben a másik hol gyorsítva, hol fékezve, ritmikusan megelőzi vagy maga elé engedi az állandó sebességgel haladót. A legnagyobb sebesség a gyorsuló fázisban, a legkisebb a fékező fázisban lép fel, de mindkettő olyankor, amikor a két jármű együtt halad. Akkor egyforma a két jármű sebessége, amikor az előzési vagy lemaradási távolság a legnagyobb közöttük.

Az, hogy az előzés és a megelőztetés folyamata sűrűbben váltakozzék (ami az FM-rezgésnél nagyobb f_m moduláló frekvenciát jelent), az eddigivel azonos előzési sebesség mellett csak úgy lehetséges, ha az állandó sebességgel haladó járműhöz képesti előzési, ill. késési távolság csökken.

Az FM-rezgésre vonatkoztatva ez azt jelenti, hogy állandó frekvencialököt (állandó maximális és minimális pillanatnyi frekvencia) mellett a nagyobb moduláló frekvenciának kisebb fázislököt kell eredményeznie. Kimondhatjuk, hogy minél nagyobb az f_m moduláló frekvencia, annál kevesebb idő áll a modulált NF-rezgés rendelkezésére, tehát az útnak, vagyis a fázislökötnek kisebbnek kell lennie.

Ellentétben az AM-mel, amelynek modulációs mélysége maximálisan 1 lehet, az FM modulációs indexe tetszőlegesen nagy lehet. Ez döntő előny az AM-mel szemben. Beszéd- és zenei modulációnál igaz a dinamikára vonatkozóan:

FM-nél a dinamika tartomány majdnem tetszőlegesen nagy lehet
--

Korlátozást csak a sávszélesség igény okoz, és az, hogy az alsó sárfrekvenciának nem szabad átlapolnia a legnagyobb moduláló frekvenciát.

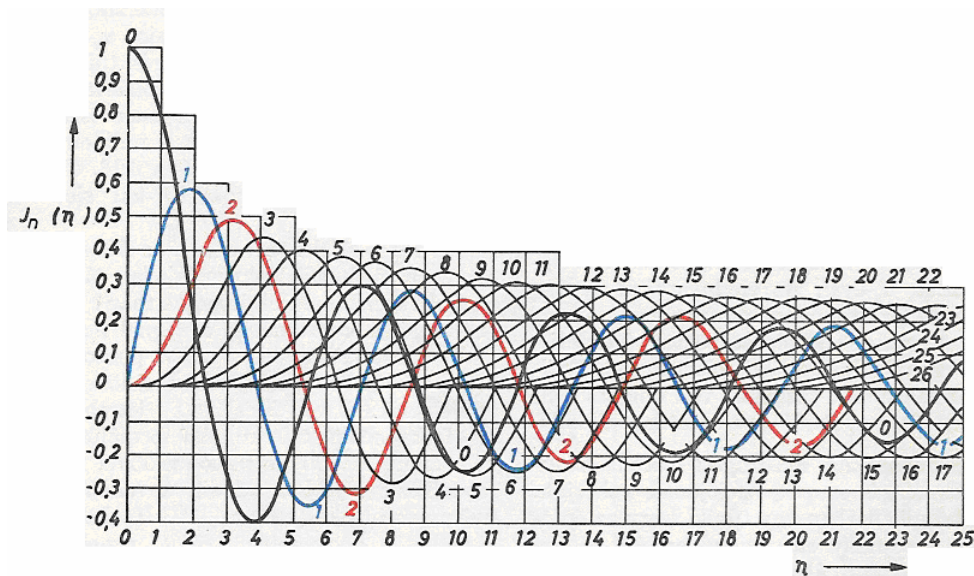
Az FM spektruma

Kísérlet:

Mérjük ki egy FM-jel spektrumát a modulációs index függvényében. Ehhez szükséges egy frekvencia modulálható generátor és egy spektrumanalizátor, vagy legalább szelektív szintmérő a spektrumvonalak megkereséséhez. A szelektív szintmérő sávszélességének kisebbnek kell lennie a moduláló frekvenciánál.

Megfigyelés:

Megfigyelés: Kis moduláló feszültségamplitúdónál a modulációs index kicsi. Ilyenkor a vivőt és két oldalhullámot találunk. A két oldalhullám amplitúdója eleinte jóval kisebb a vivő-amplitúdónál. A két oldalhullám frekvenciatávolsága a vivőtől nem azonos a lökettel -hiszen akkor a frekvencia távolságnak a növekvő moduláló feszültségnél növekednie kellene-, hanem a moduláló frekvenciának felel meg. Tehát a vivőn még $f_v + f_m$ és $f_v - f_m$ keletkezik. Maga az f_m moduláló frekvencia nincs benne a termék spektrumában.



5. ábra Bessel függvények

A tiszta amplitúdóspektrum (az itt nem mért fázisspektrum nem) láthatólag nagyon hasonlít az AM-hez, de csak kis lökethél ($\eta \sim 0,5$ -nél). Növelve a moduláló feszültséget és ezzel a modulációs indexet, az oldalhullám amplitúdók nagyobbak lesznek, akár csak AM-nél; ugyanakkor azonban az AM-mel ellentétben a vivőamplitúdó csökken.

Az FM-spektrumnak még egy sajátosságát állapíthatjuk meg e kísérletnél, a modulációs indexet növelve: a vivőtől jobbra és balra $2f_m$ távolságban újabb oldalhullámok jelentkeznek. Még tovább növelve a modulációs indexet, a vivőtől f_m távolságra levő első két oldalhullám a modulálatlan vivőamplitúdó kb. 60%-át kitevő maximális értékig növekszik ($\eta=1,8$); a következő oldalhullámok ($2f_m$ távolságra) ugyancsak növekednek, miközben a vivő folyamatosan csökken és ($\eta=2,4$ -nél) egészen eltűnik, hogy $\eta>2,4$ -nél ismét növekedni kezdjen. Ezenkívül további oldalhullámok keletkeznek a vivőtől jobbra és balra $3f_m$ $4f_m$ stb. távolságban. $\eta=2,4$ -nél az $f_v \pm 3f_m$ oldalhullámok amplitúdója kerekén 20%-a a modulálatlan vivőének, az $f_v \pm 4f_m$ hullámoké nem egészen 10%.

Következtetés:

Egy szinuszos FM-jel spektruma nagyon erősen függ a modulációs indextől, különösen nagy modulációs indexnél, teljes ellentétben az AM-spektrummal.

1. $\eta < 0,5$: vivő és $f_v \pm f_m$ frekvenciájú két oldalhullám létezik, hasonlóan az AM-spektrumhoz. A két oldalhullám fázishelyzete azonban más, mint AM-nél.
2. $\eta > 0,5$: növekvő modulációs indexnél $\pm 2f_m$ $\pm 3f_m \dots \pm nf_m$ távolságban új oldalhullámok lépnek fel. Ezeket magasabb rendű oldalhullámoknak nevezik.
3. A spektrálvonalak távolsága megegyezik a moduláló frekvenciával (nem a lökethél kettel!).
4. A spektrum szélessége a sok oldalhullám következtében növekvő modulációs indexnél tetszőlegesen nagygyá válhat.
5. A vivő amplitúdója nem marad állandó, mint AM-nél, hanem növekvő modulációs index mellett ingadozva csökken, miközben változó távolságonként, diszkrét helyeken egészen

eltűnik. Negatív vivőamplitúdó, ill. oldalhullám-amplitúdó a 6.12. ábrán a vivő, ill. a megfelelő oldalhullám 180°-os elfordulását jelenti.

6. Az oldalhullám-amplitúdók (ellentétben az AM-mel) nagyobbak lehetnek a vivőnél. Magasabb rendű oldalhullámok adott esetben nagyobbak lehetnek az alacsonyabb rendűeknél.
7. Hangsúlyozni kell itt (minden tévedés kizárása érdekében), hogy az $f_1 = f_v - \Delta F$ és $f_2 = f_v + \Delta F$ löketfrekvencia nincs képviselve a spektrumban, még akkor sem, ha, ΔF véletlenül egész számú többszöröse az f_m moduláló frekvenciának. Ez érthetővé válik, ha meggondoljuk, hogy a löketfrekvenciák szinuszos modulációnál csak egy pillanatig vannak jelen, tehát a szelektív szintmérő rezgőkörét meg sem tudják lökni.

Az FM-rezgés spektruma a vivő fölött és alatt nagyszámú oldalhullámot tartalmaz, melyeknek a vivőtől való távolsága a moduláló frekvencia egész számú többszöröse, és ezeknek az amplitúdója, akárcsak a vivőé, a modulációs indextől függ.

Sávszélesség FM-nél

Az előzőekben kimutattuk, hogy amplitúdóhiba és fázishiba léphet fel, ha a magasabb rendű oldalhullámokat nem vesszük figyelembe. Ez az eset következhet be a gyakorlatban, ha az átviteli sávszélesség túl kicsi.

Az amplitúdóhiba nem kritikus, mivel a vevőben végzett amplitúdó határolással könnyen eltávolítható. A vele összefüggő fázishiba azonban az nagyfrekvenciás tartományban úgy nyilvánul meg, mint járulékos zavaró frekvencia moduláció, a demoduláció után pedig mint az alacsony frekvenciás jel nemlineáris torzulása, vagyis mint megnövekedett torzítási tényező. Hogy ezt kis értéken tarthassuk, szigorúan véve valamennyi spektrumösszetevőt amplitúdó- és fázishelyesen át kellene vinni. Ez gyakorlatilag lehetetlen. A következő gyakorlati képlet szerinti véges sávszélességgel számolnak:

$$B \approx 2(\Delta F + f_m) \qquad \text{7. Egyenlet}$$

Az így számított sávszélesség alkalmazásakor azokat a spektrumösszetevőket, amelyeknek amplitúdója kisebb a maximális amplitúdó kb. 10...13%-ánál (a modulációs indextől függően), már nem viszik át. Az irodalomban ugyancsak fellelhető $B \approx 2(\Delta F + 2f_m)$ képlet alkalmazásakor csak azokat a spektrumösszetevőket hanyagolják el, amelyek kisebbek, mint az itt megadott százalékos mennyiségnél.: kb. a fele. Hangsúlyozni kell, hogy az a kézenfekvő feltevés, miszerint a sávszélesség csak a frekvencialöket által határolt tartományra terjed ki, semmiképp sem helyes. Igaz a következő tétel:

A szükséges sávszélesség frekvencia moduláció esetén nagyobb mint a kétszeres a frekvencialöketnek.

Matematikai összefüggések FM-nél

A frekvenciamoduláció valójában a vivő nullátmeneteinek és ezzel a fázisszögnek a változtatását jelenti. Ezért az FM-et szögmodulációként kell értelmezni. Mint azt tudjuk konstans ω_v körfrekvenciánál a szög lineárisan növekszik:

$$\varphi = \omega_v t$$

8. Egyenlet

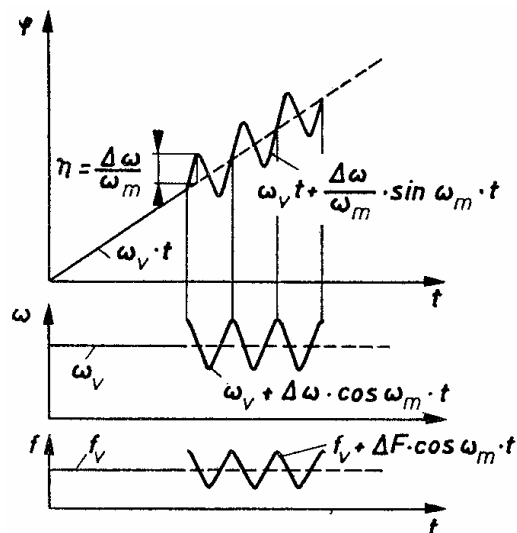
Koszinuszosan hullámalak esetén vezérlik, akkor a frekvencia, ill. körfrekvencia (6. ábra):

$$f_v + \Delta F \cos(2\pi f_m t)$$

ill.

$$\omega_v + \Delta\Omega \cos(\omega_m t)$$

9. Egyenlet



6. ábra Frekvencia és fáziskülönbség

Ekkor a szög szinuszosan változik (a körfrekvencia idő szerinti integrálja):

$$\varphi = \int [\omega_v + \Delta\Omega \cos(\omega_m t)] dt$$

10. Egyenlet

fejezi ki), ahol e szögváltozás amplitúdója ismert módon fordítva arányos a moduláló frekvenciával, ill. körfrekvenciával:

$$\varphi = \omega_v t + \frac{\Delta\Omega}{\omega_m} \sin(\omega_m t)$$

11. Egyenlet

Ezzel megkapjuk a frekvenciamodulált jel időfüggvényét, majd összehasonlítással felírjuk az amplitúdómodulált jelet is.

$$FM : u = U_v \cos\left(\omega_v t + \frac{\Delta\Omega}{\omega_m} \sin(\omega_m t)\right)$$

12. Egyenlet

$$AM : u = (U_v + \Delta U \sin(\omega_m t)) \cos(\omega_v t)$$

A modulációs index összefüggését helyettesítve kapjuk

$$u = U_v \cos(\omega_v t + \eta \sin(\omega_m t)) \quad \text{13. Egyenlet}$$

Tehát trigonometrikus összefüggések felhasználásával kapjuk

$$u = U_v [\cos(\omega_v t) \cdot \cos(\eta \sin(\omega_m t)) - \sin(\omega_v t) \cdot \sin(\eta \sin(\omega_m t))] \quad \text{14. Egyenlet}$$

Ebben a kifejezésben egy szinuszfüggvény koszinusza, ill. szinusza szerepel. Egyszerű megoldásérdekében, a kifejezést kiértékeljük $\eta \ll 1$ esetre. Ekkor ugyanis $\cos(\eta \sin(\omega_m t)) \approx 1$ és $\sin(\eta \sin(\omega_m t)) \approx \eta \sin(\omega_m t)$ helyettesíthető

$\eta \ll 1$ modulációs index esetén

$$u = U_v \left[\cos(\omega_v t) + \eta \frac{1}{2} \cos(\omega_v + \omega_m)t - \eta \frac{1}{2} \cos(\omega_v - \omega_m)t \right] \quad \text{15. Egyenlet}$$

Ez a kifejezés azt mondja, hogy az frekvenciamodulált jel ($\eta \ll 1$ esetén) három koszinuszjelből tevődik össze a következő frekvenciákkal: vivő (ω_v) vivő és információ összeg frekvenciája ($\omega_v + \omega_m$) és különbségi frekvenciája ($\omega_v - \omega_m$).

Tetszőleges modulációs index esetén

Ilyenkor nem lehet az FM-rezgés időfüggvényét egyszerű matematikai módszerekkel kiértékelni. A kiértékelés Bessel-függvényekhez vezet (lásd Az FM spektruma). A feszültség ω_m függvényében, vagyis a spektráeloszlás a következőképpen írható le:

$$u(\omega_m) = U_v \begin{cases} J_0(\eta) \cos(\omega_v t) \\ - J_1(\eta) \sin(\omega_v \pm \omega_m)t \\ - J_2(\eta) \cos(\omega_v \pm 2\omega_m)t \\ + J_3(\eta) \sin(\omega_v \pm 3\omega_m)t \\ + \dots \end{cases} \quad \text{16. Egyenlet}$$

Itt a $J_0(\eta)$, $J_1(\eta)$, $J_2(\eta)$, ... $J_n(\eta)$, amplitúdókat Bessel-függvények fejezik ki.

Az FM demodulálása

A demoduláció alapelve elhangolt rezgőkörös, ellenütemű és fázisdiszkriminátor, valamint aránydetektor esetén:

- a frekvencia- (ill. fázis-) moduláció átalakítása amplitúdómodulációvá és
- az amplitúdómoduláció egyenirányítása.

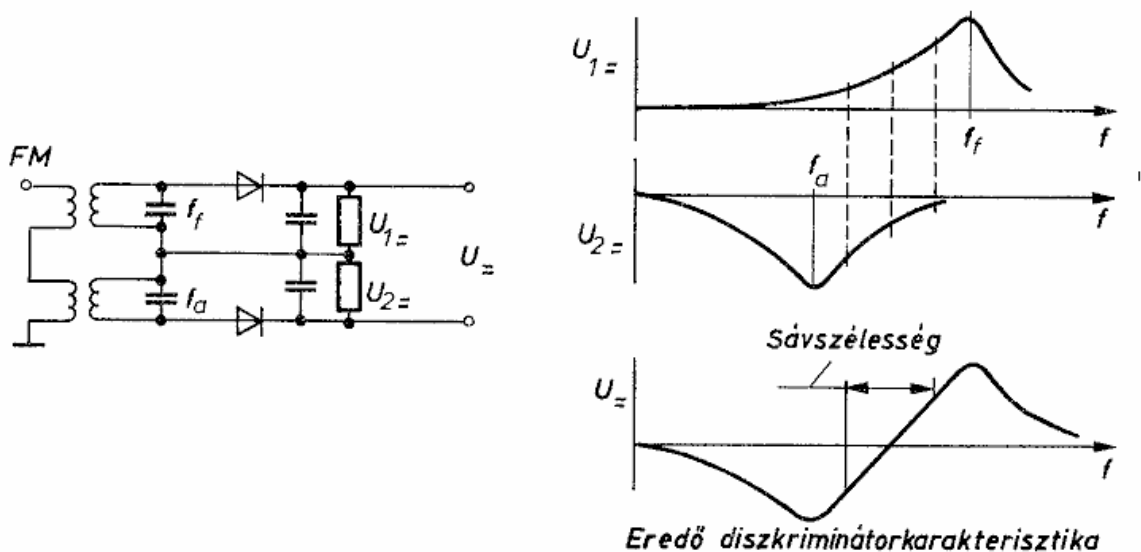
Elhangolt rezgőkörös diszkriminátor (párhuzamos rezgőkörös átalakító): Az FM egy párhuzamos rezgőkörre jut. A vivő azonban nem a rezonanciapontba kerül, hanem az átviteli görbe egyik oldalára. Így a frekvencia változás amplitúdóváltozást eredményez. A keletkező AM-et egyenirányítják.

A munkapontnak a karakterisztika oldal lineáris tartományában, vagyis a párhuzamos rezgőkör sávszélességet meghatározó pontjában kell lennie. A maximális frekvencialöknek kisebbnek

kell lennie a munkapont-rezonanciapont távolságnál. A torzítások az oldal görbülsége miatt keletkeznek.

Ellenütemű diszkriminátor (különbségi diszkriminátor, ellenütemű elhangolt rezgőkörös diszkriminátor): Nagyobb linearitás érhető el, ha egymással szembekapcsolunk két elhangolt rezgőkörös diszkriminátort, melyek rezonanciagörbéje egymáshoz képest el van tolva (7. ábra). Az egyik rezgőkör valamivel az átviendő sáv felső határa fölé, a másik valamivel az alsó sávhatár alá van hangolva. Egyenirányítás után a feszültségek különbsége képződik. Ez arányos a kisugárzott információs feszültséggel.

Az ellenütemű diszkriminátor előnye, hogy a görbült karakterisztika nemlinearitásai részben kompenzálódnak. A rezonanciagörbék metszéspontja azonban itt sem lehet túl távol a sávzélességet meghatározó ponttól ($0,7U_{max}$ -tól).



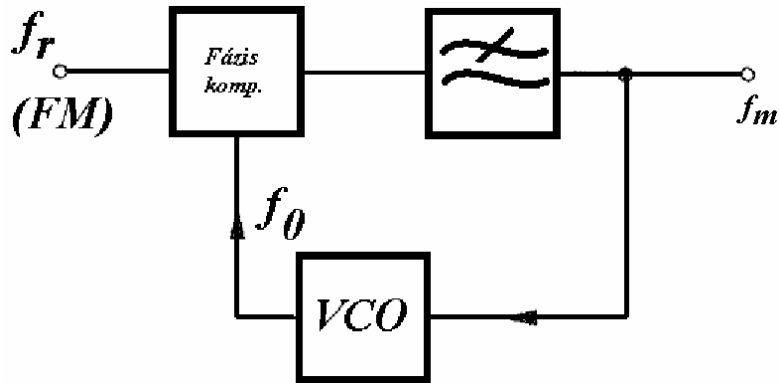
7. ábra Ellenütemű diszkriminátor

További megoldások még a Fázisdiszkriminátor; Aránydetektor; Aszimmetrikus aránydetektor; Koincidencia demodulátor; Számláló demodulátor. Ezek részletes magyarázatára nem térek ki.

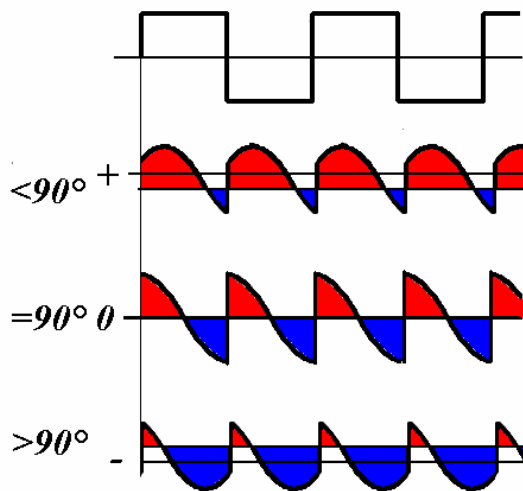
Fázisszinkronizált hurkú diszkriminátor (PLL diszkriminátor) A fázisszinkronizált hurok (Phase-Locked-Loop=PLL) egy szabályozási hurok a 8. ábra szerint. A kapcsolás egy fázis összehasonlítóból (fáziskomparátorból, szorzóból) áll, amit pl. kapcsolóként vagy gyűrűsmodulátorként képzelhetünk el. Ehhez csatlakozik egy aluláteresztő szűrő (pl. egy RC-tag). Végül a szabályozási hurok egy vezérelhető oszcillátort tartalmaz (amelyre az angol irodalomban előszeretettel használják a VCO-Voltage Controlled Oscillator megjelölést). Ennél egy frekvenciamodulálható oszcillátort képzeljünk el. Mivel a fázisösszehasonlító szorozóként dolgozik, a kimeneten a két bemenetre jutó f_0 és f_r frekvenciák különbségét és összegét szolgáltatja. f_r az úgynevezett referencifrekvencia.

Ha a különbségi frekvencia az aluláteresztő f_h határfrekvenciája fölött van, akkor az aluláteresztő kimeneti feszültsége gyakorlatilag nulla. A feszültségvezérelt oszcillátor frekvenciája nem változik. Ha a különbségi frekvencia kisebb, akkor megjelenik az aluláteresztő kimenetén, és modulálja az oszcillátor frekvenciáját. Ez ilyenkor f_r irányba hangolódik. Amikor $f_r = f_0$ a fázisösszehasonlító kimenetén olyan kapcsolgatott váltófeszültség jelenik meg, amely az

$f_r + f_0 = 2f_r$ és $f_r - f_0 = 0$ frekvenciákat tartalmazza. A nulla frekvencia egyenáramú összetevőt jelent. A két komparátor feszültség egymáshoz képesti fázisától függően ez az egyenáramú összetevő pozitív, negatív vagy nulla feszültségként jelentkezik az aluláteresztő kimenetén, és fenntartja az $f_r = f_0$ szinkronizmust (9. ábra).



8. ábra Fázisszinkronizált hurkú diszkriminátor (PLL diszkriminátor)



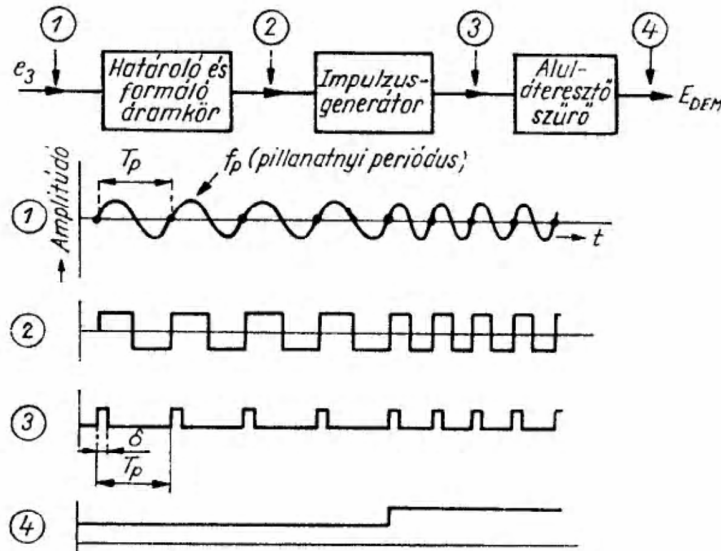
9. ábra A fázisösszehasonlítás kimeneti jelei

f_r -et változtatva megváltozik az egyenfeszültség is. A feszültségváltozás arányos a frekvenciaváltozással. Ha tehát a bemeneten f_r helyett FM jel van, akkor az egyenfeszültség az FM moduláló feszültségének megfelelően változik. Az aluláteresztő kimenetén fellépő szabályozó feszültség tehát megegyezik a moduláló jellel. A kapcsolás diszkriminátorként működik.

A működés határát az aluláteresztő f_h határfrekvenciája jelenti (befogási tartomány).

Az impulzusszámláló FM-demodulátor az eddigi demodulátor típusoktól eltérő elven működik. Maga a működési elv nagyon régen ismert, korábban azonban ezt a demodulátort csak ritkán alkalmazták. Ma viszont, az integrált áramkörök fejlődésével és a demodulátor paramétereivel szemben támasztott követelmények növekedésével, ez a demodulátor típus egyre inkább az

érdeklődés előterébe kerül. Az impulzusszámláló FM-demodulátor működési elvét az 10. ábra szemlélteti.



10. ábra Az impulzusszámláló FM-demodulátor elve

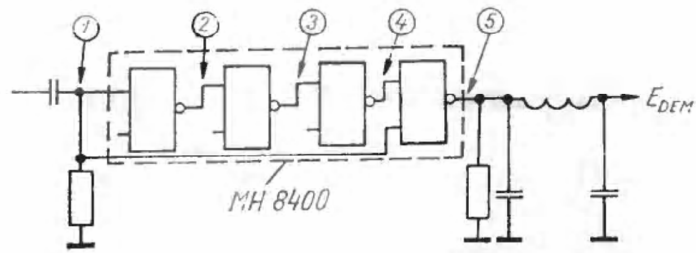
Az E_s frekvenciamodulált jel a határoló és jelformáló áramkörre érkezik, amely kiküszöböli a nemkívánatos amplitúdómodulációt és impulzusokat állít elő a jelből. Az impulzusok szélessége egyenesen arányos a bemeneti FM-jel pillanatnyi frekvenciájával. A következő áramkör, egy impulzusgenerátor a beérkező szélességmodulált impulzusokból állandó δ szélességű, de T_p változó periódusidejű impulzusokat képez. A periódusidő a bemeneti FM-jel pillanatnyi frekvenciájának megfelelően változik. A fenti impulzussorozat egyenösszetevője az impulzusok ismétlődési frekvenciájával arányosan változik és a demodulált jelet reprezentálja.

Aluláteresztő szűrővel a demodulált jel leválasztható a többi összetevőről (vivőfrekvencia, oldalsávok és ezek többszörösei).

Az impulzusszámláló FM-demodulátor fő előnyei:

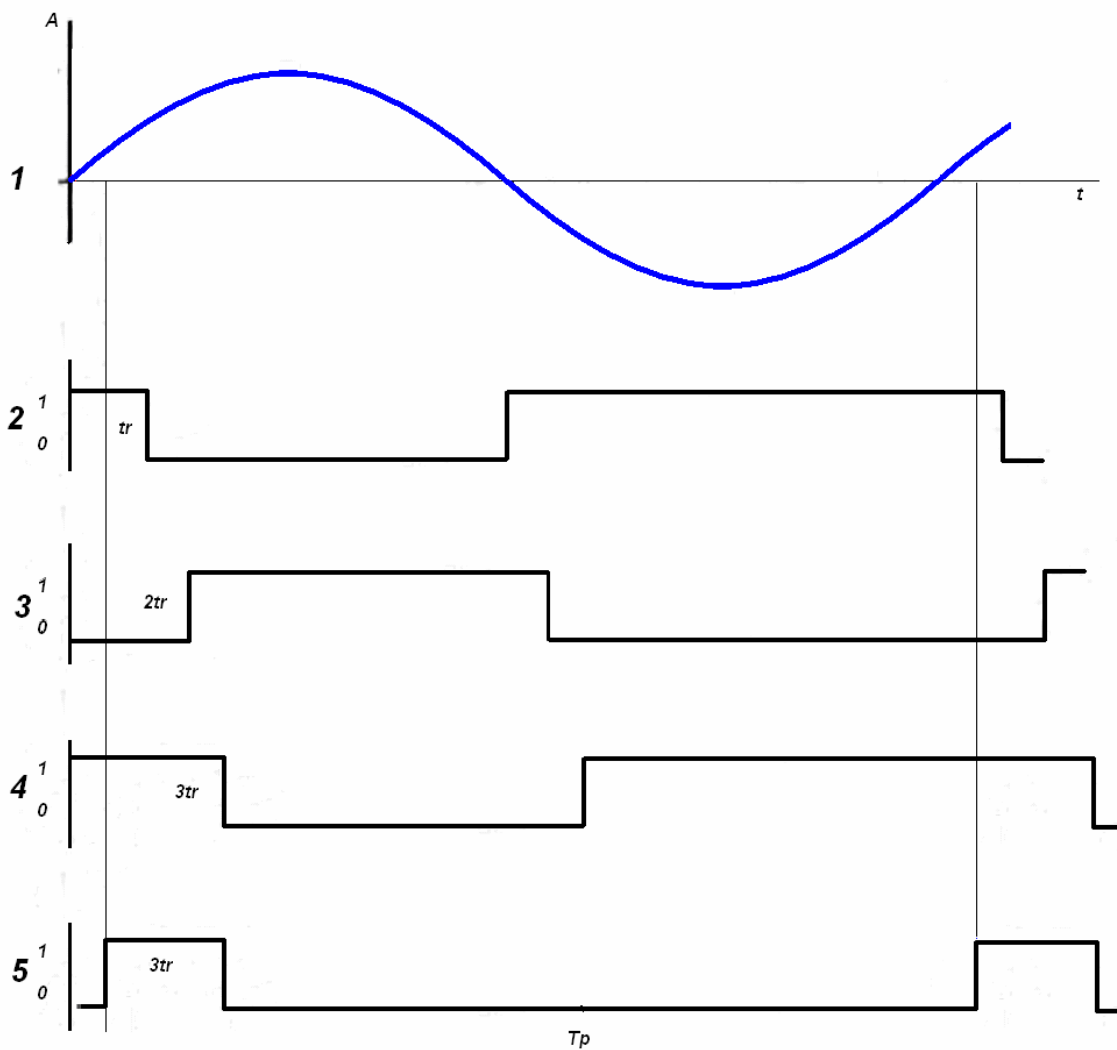
- a) A kiváló linearitás és a nagy demodulációs pontosság,
- b) A demodulációs karakterisztika nagy sávszélessége és a jó tranziens átvitel.
- c) Egyszerű áramköri elrendezés, amely gyakorlatilag nem igényel beállító elemeket.

Az impulzusszámláló FM-demodulátor hátránya, hogy általában kicsi a demoduláció hatásfoka, és maga az áramkör többnyire kiegyenlített típusú. Szélessávú impulzusszámláló FM-demodulátor kapcsolási példáját mutatja be az 11. ábra. A demodulátor egy TTL-típusú, egy tokban négy NAND kaput tartalmazó integrált áramkörből áll. Felhasználható azonban más típusú (p1. ECL stb.) logika is.



11. ábra Digitális integrált áramkör segítségével megvalósított impulzusszámláló demodulátor

Az 11. ábra szerinti FM-demodulátor jelalakjait az 12. ábra tünteti fel. A negyedik kapu kimenetén $3t_r$ konstans szélességű impulzusok jelennek meg, ahol t_r



12. ábra Az 11. ábra szerinti demodulátor jelalakjai

az időkézés, ami egy kaput okoz. A η demodulációs hatásfokra felírható, hogy

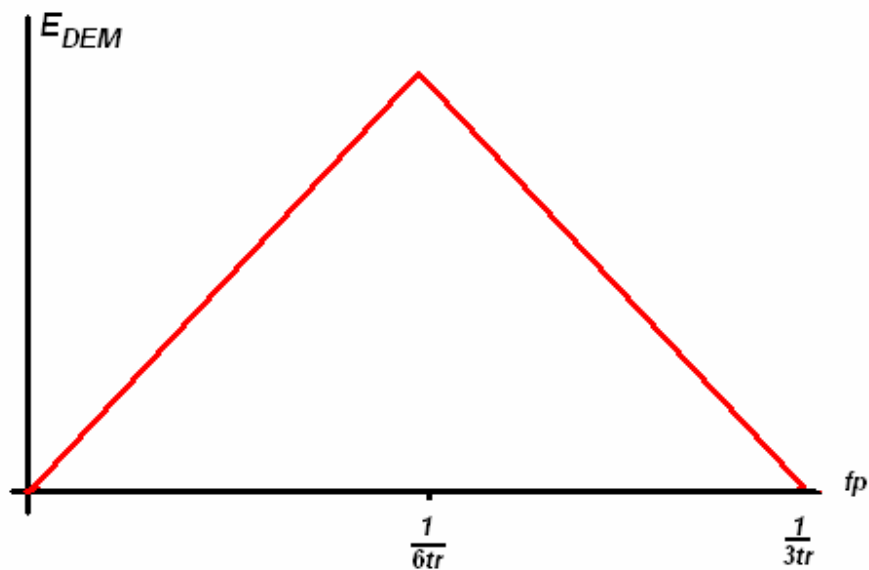
$$\eta = \frac{\Delta E_{DEM}}{\Delta F} = 3t_r V_{CC} \quad \mathbf{17. \text{Egyenlet}}$$

ahol ΔF a frekvenciaeltérés, V_{CC} az impulzus amplitúdó a negyedik kapu kimenetén.

Az egyenletből az is kitűnik, hogy az impulzusszámláló demodulátor demodulációs karakterisztikája elméletileg egy $3t_r V_{CC}$ iránýtangensű egyenes, mivel

$$\Delta E_{DEM} = 3t_r V_{CC} \Delta F \quad \mathbf{18. \text{Egyenlet}}$$

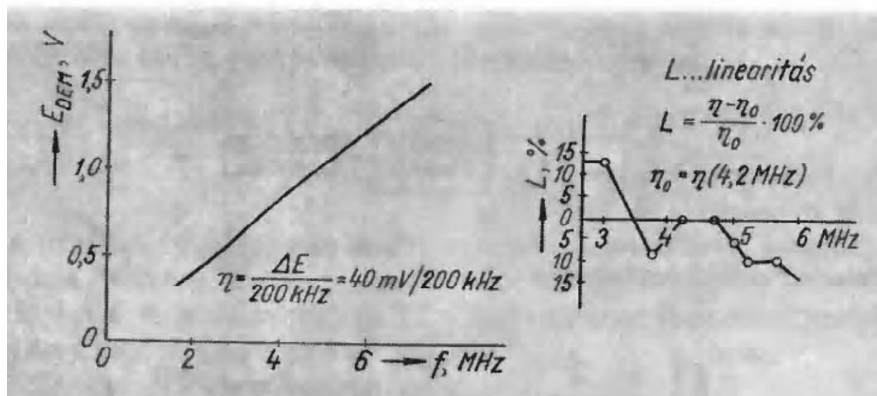
A kimeneti feszültség egyenesen arányos a t_r késleltetéssel, a V_{CC} impulzus amplitúdóval és a ΔF frekvenciaeltéréssel. Ha a demodulátor aktív elemeit képező kapuk nem lineárisak, a fenti egyenletek érvényessége bizonyos intervallumokra korlátozódik. Az érvényességi intervallumok megállapíthatók az 13. ábra alapján, amely az 11. ábra szerinti demodulátor karakterisztikáját szemlélteti. Az $1/6t_r$, $1/3t_r$ stb. frekvenciák a demodulációs karakterisztika töréspontjainak felelnek meg emellett az $1/3t_r$ frekvencián a demodulátor kimeneti jelen nulla.



13. ábra A digitális integrált áramkörös demodulátor karakterisztikája

$$F_r \leq \frac{1}{6t_r}; f(0, F_p) \quad \mathbf{19. \text{Egyenlet}}$$

Tehát a frekvenciaintervallumra fenti egyenletek változtatás nélkül érvényesek.



14. ábra Az MH 5400 áramkörrel megépített demodulátor demodulációs karakterisztikája és linearitása

Egy konkrét demodulációs karakterisztikát — az MH 5400 típusú áramkörrel megépített demodulátorét — adjuk meg az 14. ábra, ahol feltüntettük a demodulációs linearitás mérésének eredményét is a 3...6 MHz-es sávban.

Az ismertetett impulzusszámláló demodulátort — pontossága és stabilitása miatt — felhasználják szélessávú FM-jelek ellenőrzésére. Az egyszerű impulzusszámláló FM-demodulátorokon kívül léteznek közvetett számlálású bonyolult digitális demodulációs rendszerek is. Ezeknek jobbak a zajparamétereik, és nem olyan érzékenyek a fázis-amplitúdó modulációra. Alkalmazási területük: professzionális berendezésekben, pl. a műholdas távközlés berendezéseiben, ahol keskenysávú FM segítségével adatokat visznek át.

Kérdések és feladatok

1. Hogyan lehet az FM-jelet előállítani?
2. Elvileg milyen összefüggés van a frekvenciaváltozás és a hangerő között?
3. Hogyan befolyásolja FM-nél a moduláló jel hangmagassága a pillanatnyi frekvenciát?
4. Miért beszélünk FM-nél pillanatnyi frekvenciáról?
5. Egy rezgés 1s alatt $31,4 \text{ rad} (= 10\pi)$ szöget tesz meg. Mekkora a frekvenciája?
6. Egy szinuszjelet $\Delta F = 75 \text{ kHz}$ (25 kHz)-cel frekvenciamodulálunk. A moduláló frekvencia jel 12 kHz-es. Mekkora az FM-vektor maximális kilengéséhez tartozó szög (maximális fázislöklet)?
7. Milyen összefüggés van a fázislöklet és a moduláló frekvencia között?
8. Egy vivőt $f_m = 15 \text{ kHz}$ -cel frekvenciamodulálnak. Spektrumanalizátorral vizsgálják a spektrumot növekvő löklet mellett. A vivő $U_m = 1,1 \text{ V}$ -nál tűnik el másodszer.
 - o Mekkora a frekvenciaváltozás ebben az esetben?
 - o Mekkora üzem közben, ha olyankor $U_m = 1 \text{ V}$?
9. Egy FM-jel időfüggvénye (oszilloszkópábráján) legnagyobb pillanatnyi frekvenciaként 10,775, legkisebbként 10,625 MHz lép fel. Két sűrűsödési, ill. ritkulási hely távolsága 0,1 ms. Mekkora a modulációs index?
10. $\eta = 3$ (4, 5, 6, ...) modulációs indexnél mekkora a 4. (5., 6., 7., ...) spektrumvonal amplitúdója?
11. A 10. feladatból adódik, hogy az $n = (\eta + 1)$ rendű spektrumvonalak még nagyobbak 10%-nál. Ha ezeket még éppen venni akarjuk, akkor az egyes vonalak közti f_m távolság

miatt $B = 2nf_m$ sávszélességre van szükség. Hogyan jutunk el a két összefüggés alkalmazásával a $B = 2(\Delta F + f_m)$ sávszélességképletig?

12. Hányadrendűek azok a spektrumvonalak, amelyek a 11. feladatban megadott sávszélességképlet alkalmazásakor már nem foghatók?
13. Legyen egy FM-jel modulálatlan vivője 100%. A löket legyen 50 kHz, a modulációs frekvencia 10 kHz (TV -hang!). A modulálatlan vivőamplitúdónak hány %-a annak az oldalhullámnak az amplitúdója, amely a $2(\Delta F + f_m)$ sávszélesség képlet alkalmazásakor a vivőtől (50 + 10) kHz távolságban még éppen átvitelre kerül? Hány %-os a többi átvitt oldalhullám?
14. A sávhatárolás következtében a vivőtől jobbra és balra eső két oldalhullám, melyeknek amplitúdója kerekén 5%-a a modulálatlan vivőamplitúdónak, már nem vihető át. Hány %-át jelenti ez az összteljesítménynek?
15. Miben egyezik és miben különbözik egy AM és egy FM vektorábrája ($\eta < 0,5$)?
16. Mekkora egy $\eta = 0,4$ -es FM-nél és $m = 0,4$ -es AM-nél az oldalhullám-amplitúdók? (A modulálatlan vivő legyen 1V.)
17. Legyen egy $\Delta F = 75$ kHz-es FM-jel amplitúdója 2mV. A zavarófeszültség legyen 0,2mV. A zavarófrekvencia oly közel van a vivőhöz, hogy az alapsávban
 - 1,5;
 - 15 kHz-en zavar.Mekkora a két esetben a zavaró frekvencialöket és a $\Delta F / \Delta F_2$ viszony?
18. Miért használható egy tekercs a bele kényszerített áramra vonatkozóan szélessávú lineáris frekvencia-demodulátorként?
19. Magyarázzuk meg a fázisszinkronizált diszkriminátor (PLL-diszkriminátor) működését!