

REALIZACIJA PRODUKTNE MODULACIJE

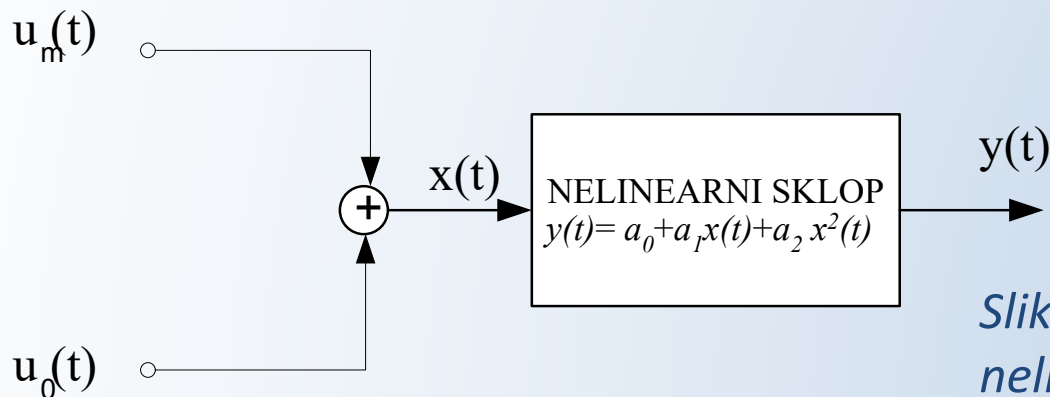
1. POMOĆU NELINEARNIH SKLOPOVA

Svaki električni sklop koji posjeduje nelinearnu karakteristiku "izlaz-ulaz" može da posluži kao produktni modulator.

Pretpostavimo zato da imamo neki nelinearan sklop čija je karakteristika "izlaz - ulaz " data polinomom oblika:

$$y(t) = a_0 + a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + \dots$$

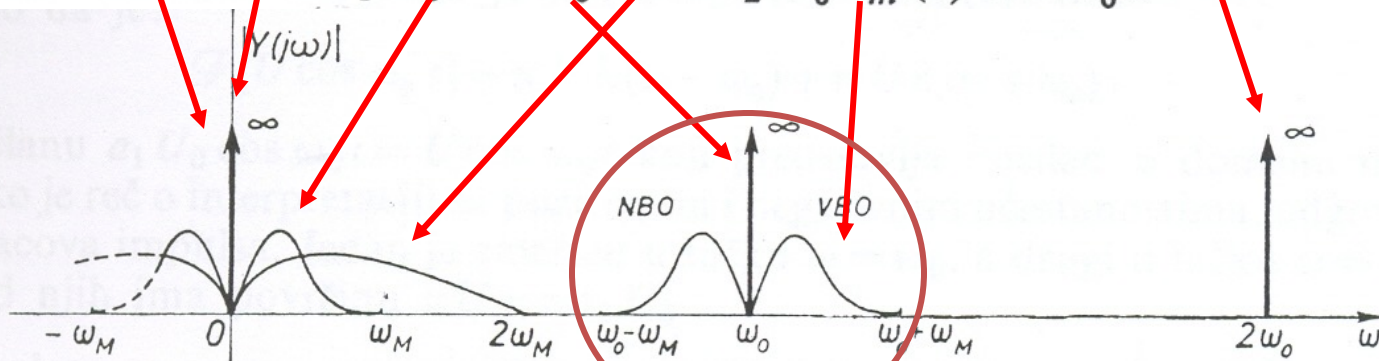
U ovoj relaciji $x(t)$ predstavlja ulazni, a $y(t)$ izlazni signal, dok su a_0 , a_1 , $a_2 \dots$ konstante. U ovom razmatranju, biće pretpostavljena kvadratna karakteristika. Nelinearni sklop se može iskoristiti na sledeći način:



Slika: Realizacija AM pomoću nelinearnog sklopa

Na izlazu iz ovog sklopa se dobija signal oblika:

$$y = y(t) = a_0 + a_1 [U_0 \cos \omega_0 t + u_m(t)] + a_2 [U_0 \cos \omega_0 t + u_m(t)]^2 =$$
$$= a_0 + \frac{1}{2} a_2 U_0^2 + a_1 u_m(t) + a_2 u_m^2(t) + \frac{1}{2} a_2 U_0^2 \cos 2\omega_0 t +$$
$$+ a_1 U_0 \cos \omega_0 t + 2 a_2 U_0 u_m(t) \cos \omega_0 t$$



- Prva dva člana predstavljaju jednosmjernu komponentu (u spektru Diracov impuls na učestanosti 0);
- Treći član predstavlja modulišući signal;
- Četvrti član je kvadrat modulišućeg signala koji ima dva puta širi spektar;
- Peti član je deterministički signal dva puta veću učestanosti od nosioca (Diracov impuls na učestanosti $2\omega_0$);
- Šesti član predstavlja nosilac;
- Poslednji član je korisni produkt modulacije (AM signal).

Znači, svi članovi sem poslednjeg predstavljaju neželjene komponente (parazite) u slučaju koji posmatramo.

Da bi se dobio amplitudski modulisan signal potrebno je iz spektra izlaznog signala izdvojiti korisni član. To se jednostavno može ostvariti pomoću filtra propusnika opsega učestanosti u opsegu $(\omega_0 - \omega_M \div \omega_0 + \omega_M)$. Pri tome se mora izbjeći eventualno preklapanje ove komponente sa ostalim. Sa slike je jasno da treba da je zadovoljen uslov:

$$\omega_0 - \omega_M \geq 2\omega_M \quad \text{tj.} \quad \omega_0 \geq 3\omega_M$$

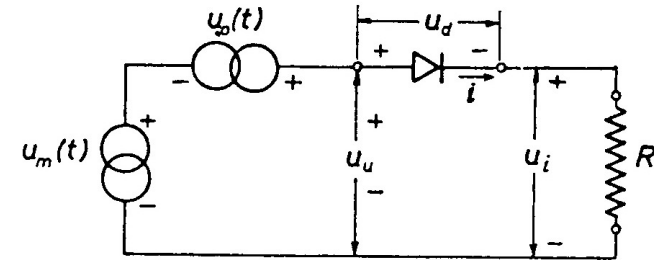
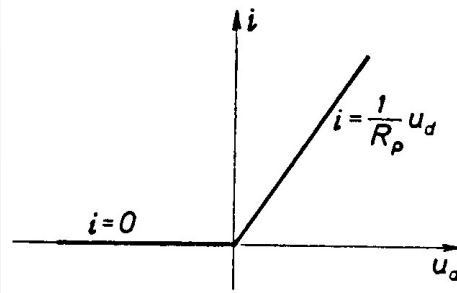
U sredini opsega postoji nosilac, tj. filter propušta dva bočna opsega i nosilac. Nemoguće je napraviti filter koji bi izdvojio samo dva bočna opsega, a ne i nosilac. Zato se za dobijanje AM signala sa dva bočna opsega primjenjuju specijalni postupci. Prisustvo nosioca ne utiče na poruku, ali je “višak” sa stanovišta snage. Ova kombinacija: nosilac, niži i viši bočni opseg naziva se konvencionalni amplitudski modulisani signal (KAM).

Za nelinearni sklop reda 3 povećava se broj komponenti (pored ovih navedenih za 2, još 6 novih), ali ni jedna od njih ne predstavlja korisnu komponentu.

✓ Zaključak: Za dobijanje AM signala pomoću nelinearnih sklopova dovoljna je nelinearnost sklopa reda 2.

2. APROKSIMACIJA PRODUKTNE MODULACIJE POMOĆU PREKIDAČKIH SKLOPOVA

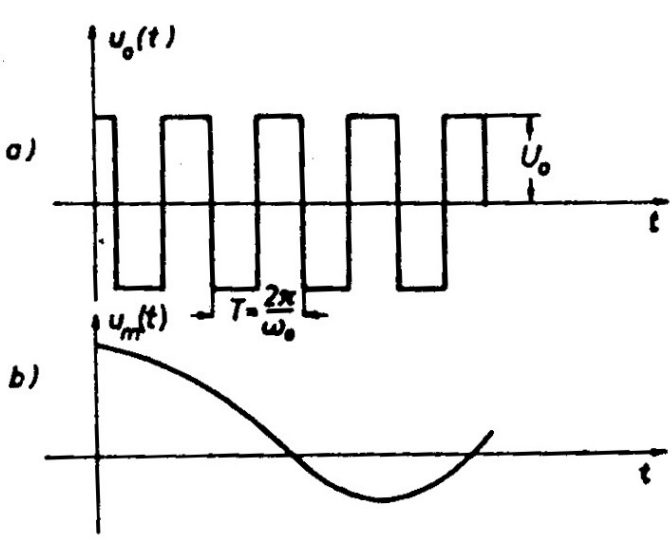
Ovi sklopovi imaju dva režima rada. Najprostiji primjer prekidačkog sklopa je poluprovodnička dioda.



Slika: Idealizovana karakteristika poluprovodničke diode; Tipično kolo linearnog prekidača

U ovom slučaju nosilac nije sinusoidalna funkcija, već je povorka pravougaonih impulsa. Izraz za napon ovog signala može da se nađe na osnovu Fourierove analize i ima oblik:

$$u_0(t) = 2 U_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n \pi}{2}}{\frac{n \pi}{2}} \cos n \omega_0 t$$



Za diodu važi:

$$i = \begin{cases} \frac{1}{R_p} u_d & u_d > 0 \\ 0 & u_d \leq 0 \end{cases}$$

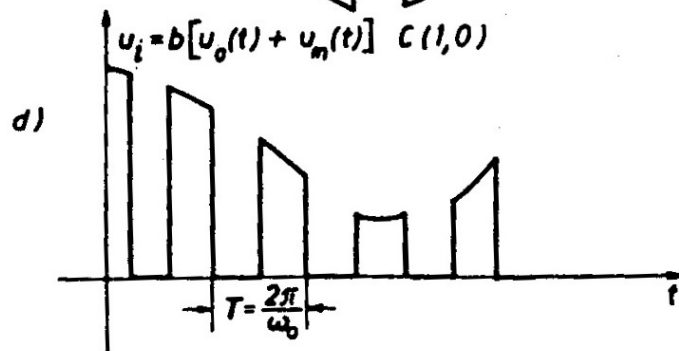
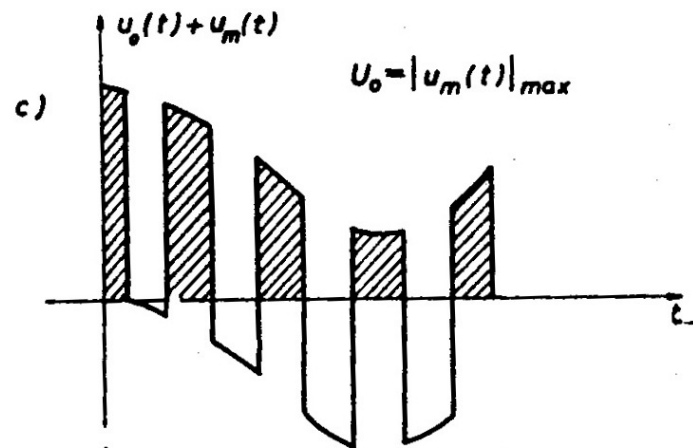
R_p predstavlja otpornost diode u propusnom smjeru. Izlazni napon u_i na otporniku R zavisi od režima rada diode. Kada je u kolu uspostavljen protok el. energije (napon na diodi $u_d > 0$) važi:

$$u_d(t) = -Ri(t) + u_o(t) + u_m(t)$$

tj.

$$u_d(t) = \frac{1}{1 + \frac{R_p}{R}} [u_o(t) + u_m(t)]$$

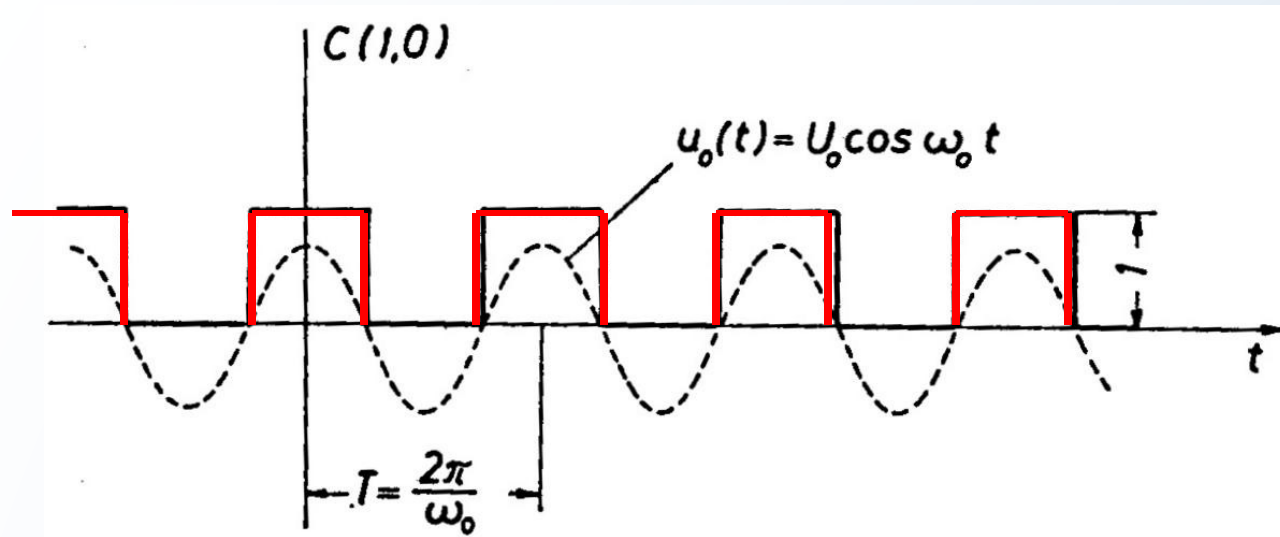
$$u_i(t) = \frac{u_d(t) R_p}{R_p} = \frac{R}{R_p + R} [u_o(t) + u_m(t)]$$



Kada nema protoka el.energije, $u_i=0$.

Slika: Vremenski dijagrami pojedinih napona a) napon nosioca $u_o(t)$; b) modulišući signal $u_m(t)$; c) suma napona $u_o(t) + u_m(t)$; d) talasni oblik izlaznog napona u_i

Sa $C(1,0)$, je označena prekidačka funkcija koja u pozitivnim poluperiodama nosioca ima vrijednost 1, a u njegovim negativnim poluperiodama vrijednost 0.



$$C(1,0) = \begin{cases} 1, & u_0 > 0 \\ 0, & u_0 < 0 \end{cases}$$

$$C(1,0) = \frac{C(1,-1) + 1}{2}$$

$$C(1,0) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\frac{n\pi}{2}} \cos n\omega_0 t = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_0 t - \frac{1}{3} \frac{2}{\pi} \cos 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \frac{2}{\pi} \cos 5\omega_0 t + \dots$$

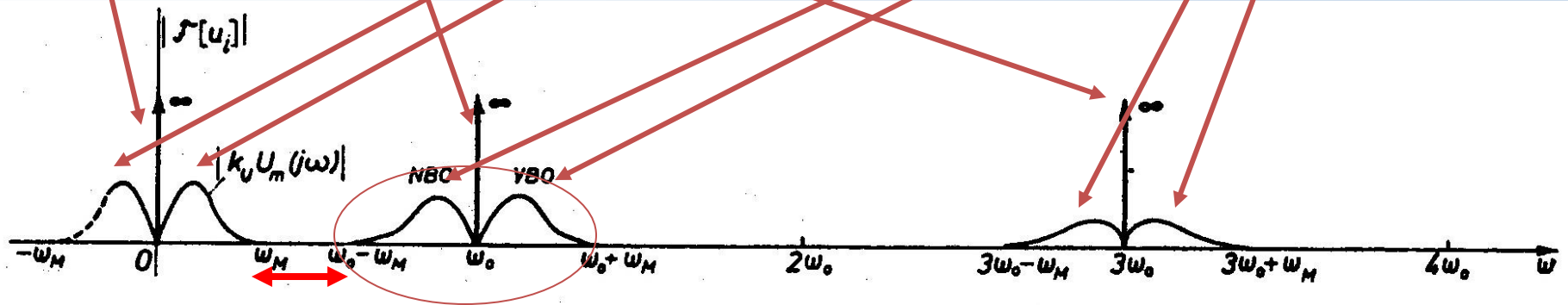
$C(1,-1)$ predstavlja povorku naizmjeničnih pravougaonih impulsa čije su amplitude u pozitivnim poluperiodama jednake 1, a u negativnim -1.

$C(1,0)$ se naziva **prekidačka funkcija**, a $C(1,-1)$ **komutaciona funkcija**.

Sada je izlazni napon oblika:

$$u_i(t) = \frac{R}{R + R_d} (U_0 + u_m(t)) C(1,0) = \frac{R}{R + R_d} (U_0 + u_m(t)) \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\frac{n\pi}{2}} \cos n\omega_0 t \right) =$$

$$= \frac{RU_0}{2(R + R_d)} + \frac{RU_0}{R + R_d} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\frac{n\pi}{2}} \cos n\omega_0 t + \frac{R}{2(R + R_d)} u_m(t) + \frac{R}{R + R_d} u_m(t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\frac{n\pi}{2}} \cos n\omega_0 t$$



$$\omega_0 \geq 2\omega_M$$

Slika: Spektralna gustina amplituda signala u_i

Iz izraza za izlazni signal, kao i sa slike koja predstavlja njegov spektar, vidi se da se pomoću linearnog prekidača može ostvariti produktna modulacija:

Prvi član u izrazu predstavlja jednosmjernu komponentu, drugi član beskonačno mnogo nosilaca na učestanostima $n\omega_0$, $n=1, 3, 5, \dots$, treći član predstavlja signal poruke, dok poslednji član predstavlja beskonačno mnogo AM komponenti na učestanostima $n\omega_0$ kojima u domenu učestanosti odgovaraju dva bočna opsega lijevo i desno od učestanosti $n\omega_0$.

Da bi se dobio željeni amplitudski modulirani signal pomjeren na učestanost ω_0 potrebno je dobijeni signal propustiti kroz filter propusnik opsega učestanosti ($\omega_0 - \omega_m \div \omega_0 + \omega_m$). Izdvajanje filtrom će biti usješno ako nema preklapanja komponenti, tj. ako je ispunjen uslov:

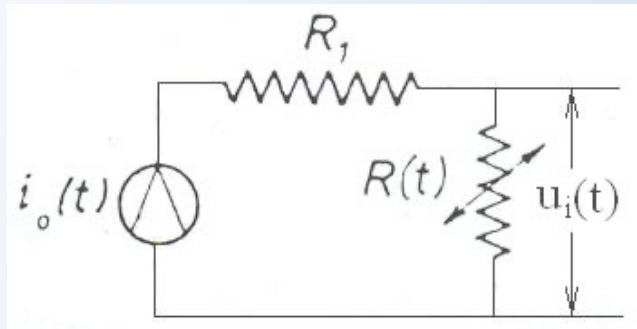
$$\omega_0 - \omega_M \geq \omega_M, \text{ tj. } \omega_0 \geq 2\omega_M$$

Da bi filtriranje bilo uspješno učestanost nosioca mora biti bar dva puta veća od maksimalne učestanosti modulišućeg signala.

3. METODA VARIJACIJE PARAMETARA

Metoda varijacije parametara ili **parametarska modulacija** se zasniva na mogućnosti da se neki od parametara linearnog kola mijenja srazmjerno modulišućem signalu. Riječ je o klasi linearnih kola sa vremenski promjenljivim parametrima.

Posmatrajmo neko pasivno linearno kolo sastavljeno od R, L i C elemenata. Ako se jedan, bilo koji, od ovih parametara mijenja u vremenu kaže se da se radi o kolu sa promjenljivim parametrima. Ako se otpornost R otpornika mijenja u vremenu, tako da su njegove promjene srazmjerne modulišućem signalu ($R(t)=ku_m(t)$) tada je izlazni napon oblika $u_i(t)=R(t)i_o(t)$.



Slika: Linearno kolo sa promjenljivim parametrom $R(t)$

Slično je ako se mijenja kapacitivnost kondenzatora ($q(t)=C(t)u(t)$), ili induktivnost kalema ($\varphi(t)=L(t)i(t)$). Međutim, ovakve realizacije nisu našle neku ozbiljniju primjenu u telekomunikacijama. Ovaj metod više teorijski nego praktični značaj jer su elementi mehanički sa velikim stepenom inertnosti.

VRSTE AM SIGNALA I PRINCIPI IZGRADNJE MODULATORA

Produktnom modulacijom se uvijek dobija amplitudski modulisani signal čiji se spektar sastoji iz nižeg i višeg bočnog opsega. Svaki od ovih bočnih opsega sadrži prenošenu poruku, pa je za prenos poruke potrebno i dovoljno prenijeti sve komponente iz samo jednog bočnog opsega. Međutim, postoje opravdani razlozi zašto se koriste modulacioni postupci za generisanje AM-2BO signala:

- čak i kada bi imali idealan produktni modulator koji na svom izlazu daje samo dva bočna opsega, postavlja se problem selekcije jednog od njih (pitanje filtra koji može uspješno da izdvoji jedan bočni opseg)
- ako je riječ o modulacionim postupcima koji pored ova dva bočna opsega daju i druge, nekorisne produkte, problem filtriranja željene komponente postaje još ozbiljniji
- veliki uticaj ima i pitanje demodulacije koja treba da predstavlja proces inverzan modulaciji. Pošto se modulacijom vrši transliranje spektra signala za učestanost nosioca ω_0 , demodulacijom se vrši translacija spektra modulisanog signala za $-\omega_0$. Za to je na prijemu potreban pomoćni signal identičan nosiocu, koji KAM signal obezbjeđuje.

Navedeni primjeri sadrže protivrječne argumente za izbor rješenja:

- prenos dva bočna opsega zahtijeva dva puta širi opseg učestanosti za prenos iste poruke;
- prenos jednog od njih dozvoljava bolje iskorišćenje raspoloživog opsega učestanosti, ali su potrebni posebni filtri i komplikovaniji uređaji;
- ako se prenosi i nosilac, demodulacija je lakša, ali se troši predajna snaga za prenos ove komponente i svi pojačavači moraju biti predviđeni za veću snagu.

Bira se ono rješenje koje u datim okolnostima predstavlja tehničko-ekonomski kompromis.

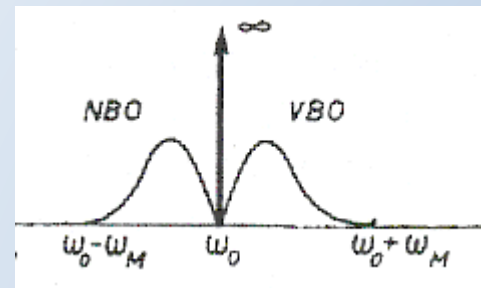
AM SIGNALI SA DVA BOČNA OPSEGA – AM-2BO

AM-2BO signal se može dobiti pomoću sklopova sa nelinearnom karakteristikom, pomoću prekidačkih sklopova i kola sa varijacijom parametara. Međutim, u tim slučajevima je problem izdvajanje dva bočna opsega koja se nalaze u okolini učestanosti nosioca od ostalih produkata modulacije, a naročito eliminisanje nosioca.

Balansni modulatori omogućavaju dobijanje AM-2BO signala koji ne sadrži nosilac.

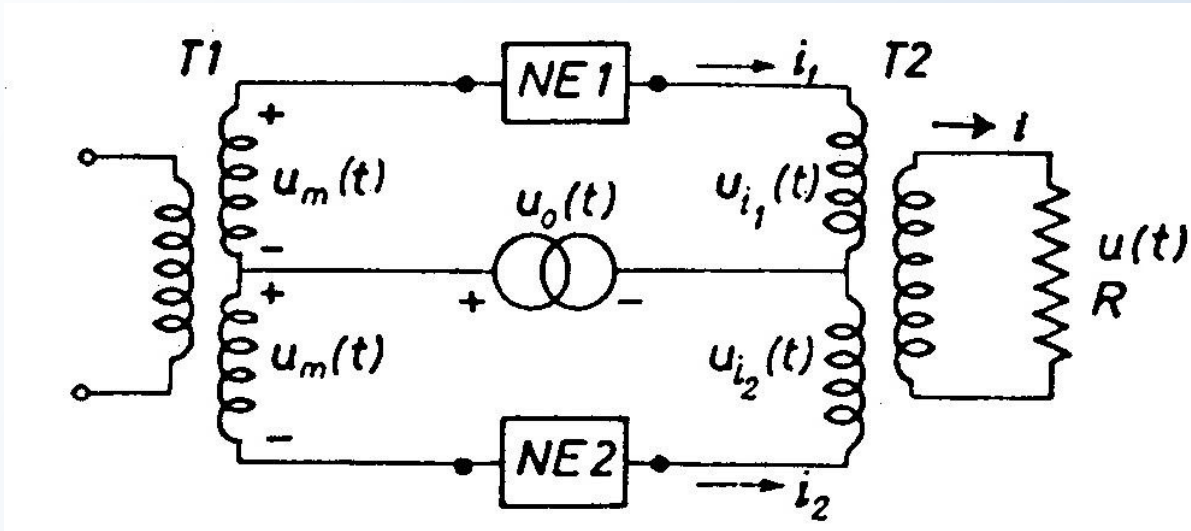
Dva tipa modulatora:

1. balansni nelinearni modulator
2. balansni prekidački modulator



1. BALANSNI NELINEARNI MODULATOR

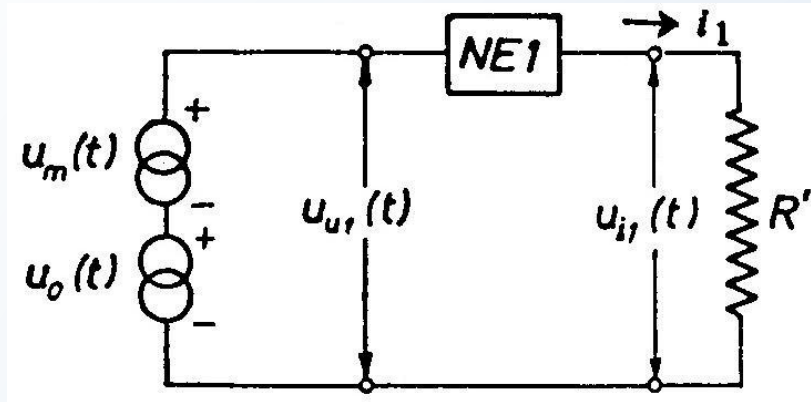
Ovaj modulator se realizuje pomoću dva nelinearna elementa označena sa NE1 i NE2, kao na slici. Pretpostavimo da je ova karakteristika kvadratna, jer članovi višeg reda od 2 ne doprinose dobijanju korisne komponente.



Slika: Šema nelinearnog balansnog modulatora

Transformatori T1 i T2 su takvi da ako je T1 odnosa 1:n, onda je T2 n:1. Na primarne krajeve transformatora T1 se vezuje izvor modulišućeg signala tako da je na svakoj polovini sekundara napon $u_m(t)$. Nelinearni elementi NE1 i NE2 moraju da imaju potpuno **identičnih** karakteristika.

a) Analiza gornje polovine šeme:
Njoj ekvivalentna šema je na slici.



Slika: Ekvivalentna šema gornjoj polovini šeme nelinearnog balansnog modulatora

R' je otpornost ekvivalentnog otpornika.

Zavisnost izlaznog napona od ulaznog je:

$$u_{i1}(t) = a_0 + a_1 u_{u1}(t) + a_2 u_{u1}^2(t)$$

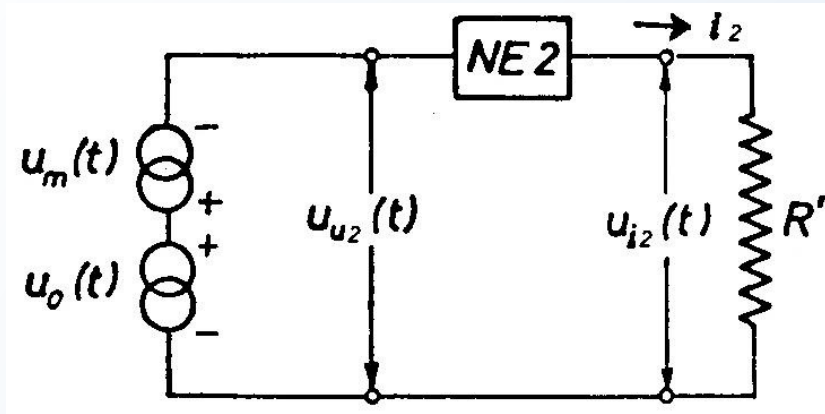
Kako je ulazni signal:

$$u_{u1}(t) = u_0(t) + u_m(t)$$

to će izlazni napon na krajevima ekvivalentnog otpornika R' biti:

$$u_{i1}(t) = a_0 + a_1 [u_0(t) + u_m(t)] + a_2 [u_0(t) + u_m(t)]^2$$

b) Slično je za donju polovinu šeme.



Slika: Ekvivalentna šema donjoj polovini šeme nelinearnog balansnog modulatora

U ovom slučaju ulazni napon će biti:

$$u_{u2}(t) = u_o(t) - u_m(t)$$

pa je napon na krajevima otpornika R' :

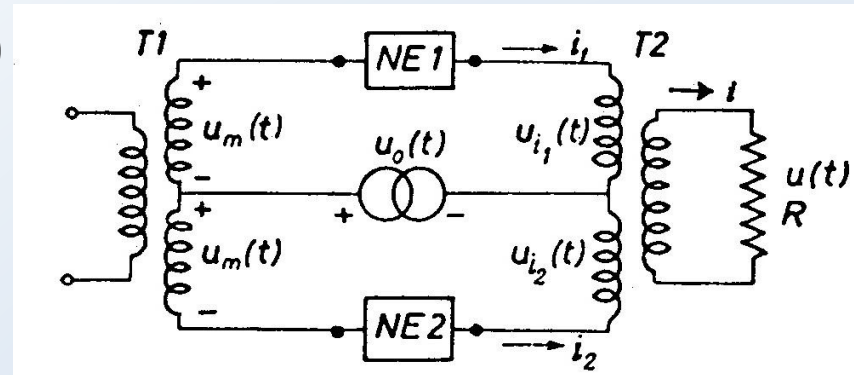
$$u_{i2}(t) = a_0 + a_1[u_o(t) - u_m(t)] + a_2[u_o(t) - u_m(t)]^2$$

Pretpostavljajući da je izlazni transformator T2 idealan, struja i u kolu sekundara biće proporcionalna razlici struja $i_1 - i_2$, odnosno napona $u_{i1} - u_{i2}$.

$$u_{i1}(t) - u_{i2}(t) = 2a_1 u_m(t) + 4a_2 u_m(t) u_0(t)$$

Napon $u_i(t)$ na krajevima potrošača R je:

$$u(t) = 2ka_1 u_m(t) + 4ka_2 U_0 u_m(t) \cos \omega_0 t$$



Na izlazu iz modulatora dobio se modulišući signal i drugi član koji predstavlja modulisani signal tipa AM-2BO, nosioca nema. Zahvaljujući simetriji gornje i donje polovine šeme i identičnosti karakteristika nelinearnih elemenata NE1 i NE2, fluksevi koji potiču od napona nosioca su u protivfazi, pa se poništavaju. Korisni produkt modulacije izdvaja se filtrom propusnikom opsega učestanosti. Da bi to bilo moguće, potrebno je da je maksimalna učestanost u spektru modulišućeg signala $u_m(t)$ i učestanost nosioca zadovoljavaju uslov:

$$\omega_0 - \omega_M \geq \omega_M, \text{ tj. } \omega_0 \geq 2\omega_M$$

2. BALANSNI PREKIDAČKI MODULATOR

Sastoji se od prekidačkih elemenata u izbalansiranim električnim šemama tako da se dobija signal sa dva bočna opsega bez nosioca.

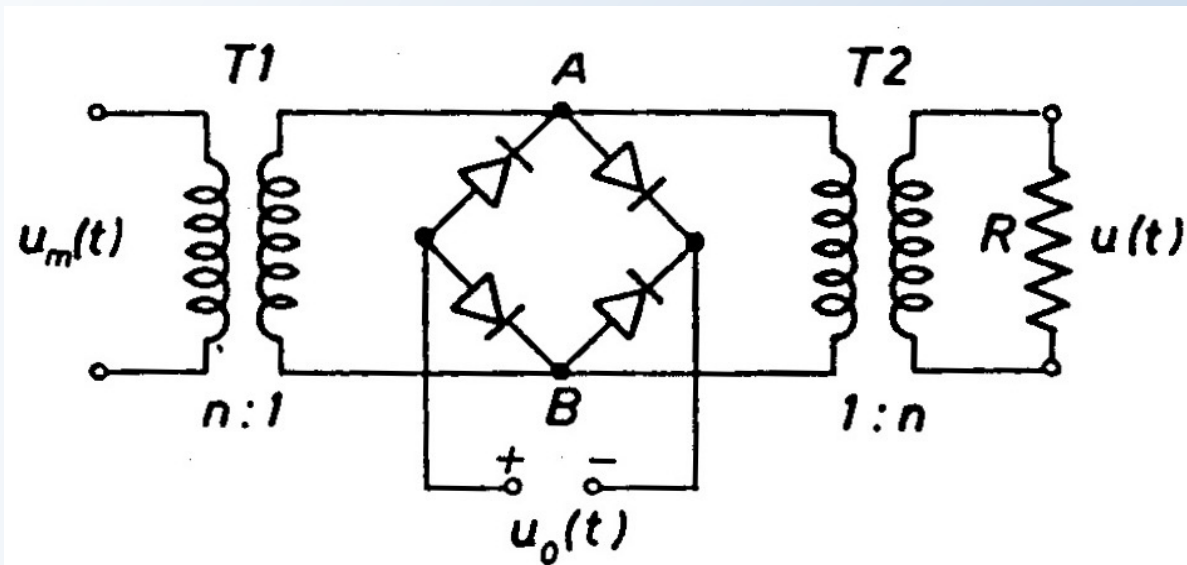
Postoji nekoliko različitih šema koje se realizuju preko transformatora i prekidačkih elemenata:

- balansni prekidački modulator paralelnog tipa
- balansni prekidački modulator rednog tipa
- kružni modulator

BALANSNI PREKIDAČKI MODULATOR PARALELNOG TIPRA

Pretpostavke:

- transformatori su komplementarni
- kao prekidački elementi koriste se poluprovodničke diode
- diode su međusobno identične i idealne (otpornost u propusnom smjeru je 0, u nepropusnom beskonačna)
- kao u slučaju prekidačkih sklopova $|u_m(t)|_{\max} \ll U_0$ (smatramo da približno važi da nosilac otvara i zatvara diode)

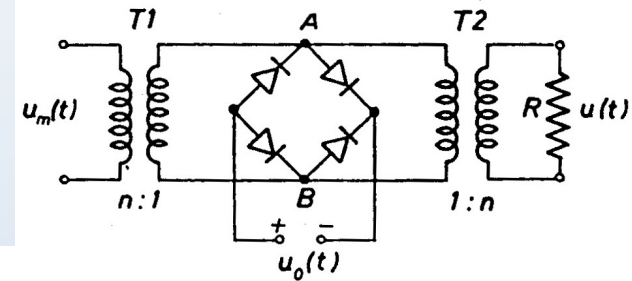


Slika: Balansni prekidački modulator paralelnog tipa

U pozitivnim poluperiodama nosioca, napon na krajevima primara izlaznog transformatora je nula, a u negativnim poluperiodama proporcionalan naponu $u_m(t)$. Izlazni napon je oblika:

$$u(t) = u_m(t)[1 - C(1,0)]$$

$C(1,0)$ je prekidačka funkcija. Sada je izlazni signal:



$$u(t) = u_m(t) \left(\frac{1}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\frac{n\pi}{2}} \cos n\omega_0 t \right) = \frac{1}{2} u_m(t) - \frac{2}{\pi} u_m(t) \cos \omega_0 t +$$

$$+ \frac{1}{3} \frac{2}{\pi} u_m(t) \cos 3\omega_0 t - \frac{1}{5} \frac{2}{\pi} u_m(t) \cos 5\omega_0 t + \dots +$$

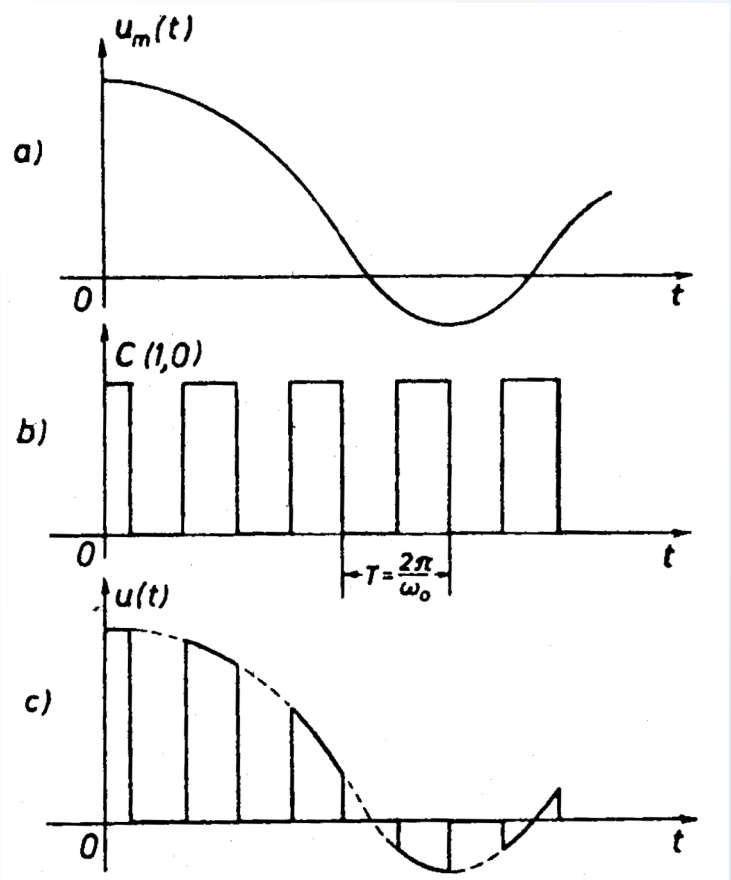
Prvi član izraza je modulišući signal, drugi član predstavlja amplitudski modulirani signal tipa AM-2BO. Na izlazu iz modulatora se ne pojavljuju ni nosilac, ni njegovi harmonici. Da bi se korisni član mogao izdvojiti filtrom, mora da bude zadovoljen uslov:

$$\omega_0 - \omega_M \geq \omega_M, \text{ tj. } \omega_0 \geq 2\omega_M$$

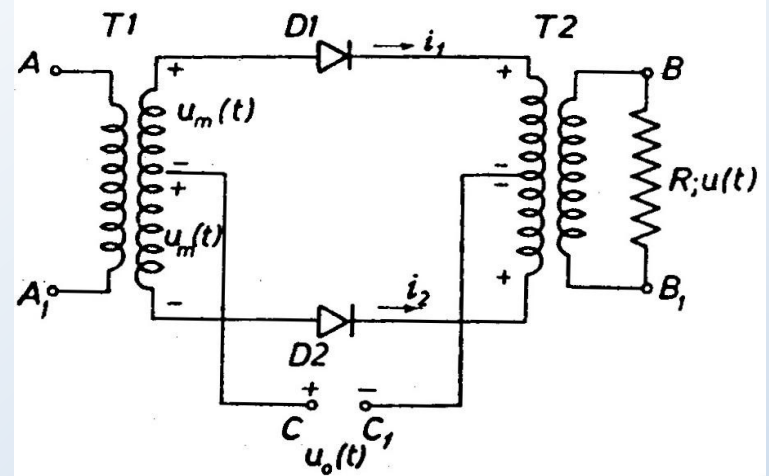
BALANSNI PREKIDAČKI MODULATOR REDNOG TIPA

Pretpostavke:

- transformatori su komplementarni
- diode su identične i idealne
- $U_0 \gg |u_m(t)|_{\max}$



Slika: a) Modulišući signal, b) prekidačka funkcija, c) modulirani signal



Slika: Balansni prekidački modulator rednog tipa

Kad diode provode, kolo u kome je napon $u_m(t)+u_m(t)=2u_m(t)$ biće zatvoreno i napon na otporniku R, u tom intervalu vremena, zavisice samo od $u_m(t)$ i biće mu direktno srazmjeran. Kad diode ne provode, napon $u(t)$ biće jednak nuli, jer je kolo prekinuto.

$$u(t) \propto u_m(t)C(1,0)$$

Korisni član se izdvaja filtrom, uz uslov:

$$\omega_0 - \omega_M \geq \omega_M, \text{ tj. } \omega_0 \geq 2\omega_M$$

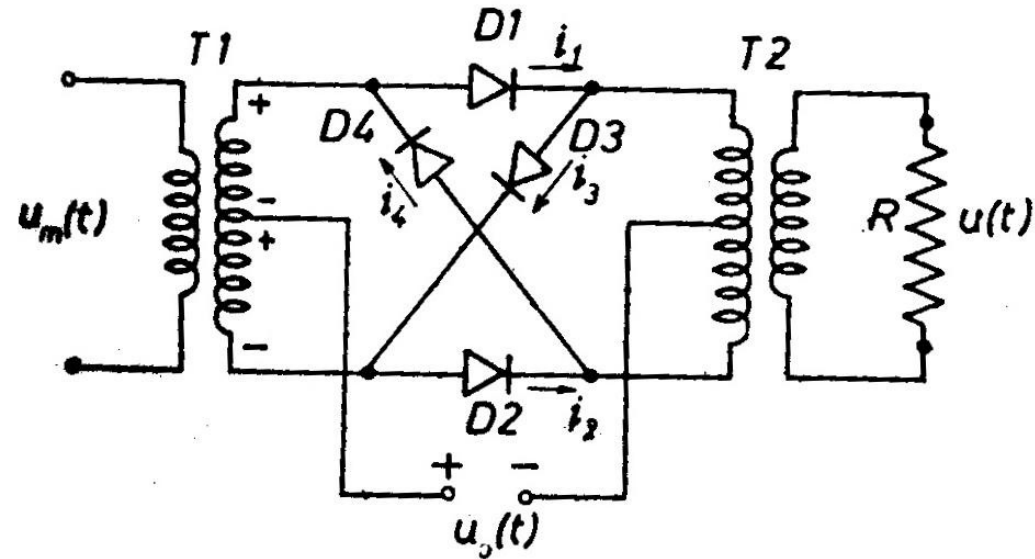
KRUŽNI (PRSTENASTI, RING) MODULATOR

Pretpostavke:

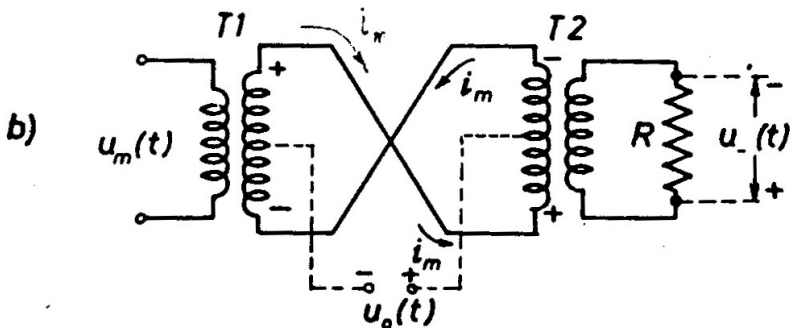
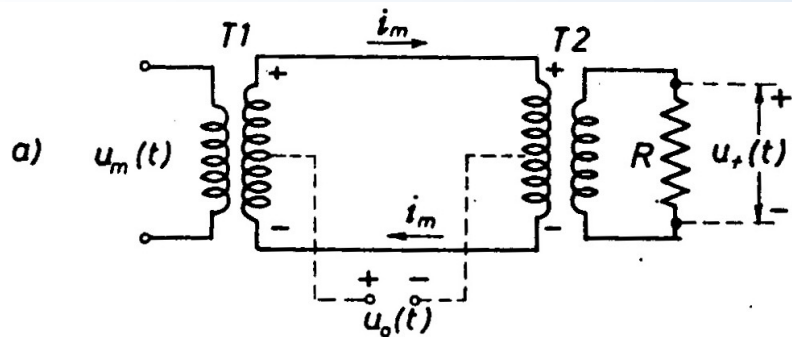
- transformatori su komplementarni
- diode su identične i idealne
- $U_0 \gg |u_m(t)|_{\max}$
- šema je u odnosu na generator nosioca $u_0(t)$ električki simetrična

Postoje dva režima rada dioda:

1. Za $u_0(t) > 0$ provode D1 i D2
2. Za $u_0(t) < 0$ provode D3 i D4



Slika: Kružni modulator



Slika: Šeme ekvivalentne šemi kružnog modulatora

a) Slučaj kad provode diode D1 i D2, a D3 i D4 ne;

b) slučaj kad provode diode D3 i D4, a D1 i D2 ne.

Za pozitivnu poluperiodu, izlazni napon je:

a za negativnu: $u_+(t) \propto u_m(t)C(1,0)$

$$u_-(t) \propto u_m(t)C(0,1)$$

Konačno, superpozicijom ova dva linearna stanja napon na izlazu će biti:

$$u(t) = u_+(t) - u_-(t) \propto u_m(t)[C(1,0) - C(0,1)]$$

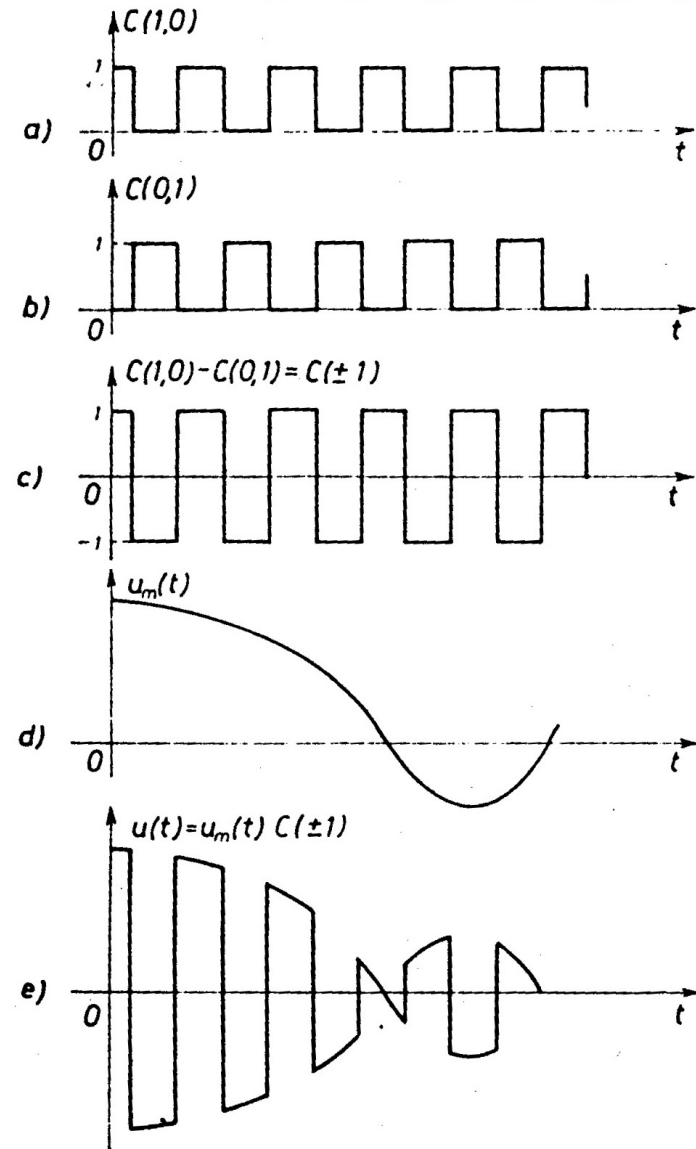
$$u(t) \propto u_m(t)C(1,-1)$$

$$C(1,-1) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\frac{n\pi}{2}} \cos n\omega_0 t$$

$$u(t) \propto u_m(t)C(\pm 1) = u_m(t) 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{2}}{\frac{n\pi}{2}} \cos n\omega_0 t$$

Pošto se u konačnom izrazu ne javlja i modulišući signal, to se korisni član može izdvojiti filtrom, uz uslov:

$$\omega_0 - \omega_M \geq 0, \text{ tj. } \omega_0 \geq \omega_M$$



Slika: Talasni oblici signala:
 a) Funkcija $C(1,0)$; b) funkcija $C(0,1)$; c) funkcija $C(1,-1)$; d) modulišući signal; e) modulisani signal

KONVENCIONALNI AM SIGNAL (KAM)

Signali koji u sebi sadrže dva bočna opsega i nosilac. KAM signal može da se predstavi izrazom:

$$u(t) = [U_0 + k_U u_m(t)] \cos \omega_0 t$$

Izraz u uglastoj zagradi može se shvatiti kao **amplituda** prostoperiodične funkcije $\cos \omega_0 t$. Ona se sastoji od konstante U_0 i člana $k_U u_m(t)$ koji je direktno srazmjeran modulišućem signalu.

KAM signal može da se dobije na tri načina:

- modulator se realizuje pomoću nelinearnog sklopa kvadratne karakteristike na čiji ulaz se dovodi suma modulišućeg signala i nosioca
- pomoću poluprovodničkih dioda na čiji ulaz se dovodi suma modulišućeg signala i nosioca
- parametarskom modulacijom

$$u_{KAM}(t) = U_0 \cos \omega_0 t + k_U u_m(t) \cos \omega_0 t = [U_0 + k_U u_m(t)] \cos \omega_0 t$$

Modulišići signal se može napisati i u normalizovanoj formi:

$$u_m(t) = U_m m(t)$$

$$U_m = |u_m(t)|_{\max}$$

$$m(t) \leq 1$$

Pa se KAM signal može zapisati:

$$u_{KAM}(t) = U_0 \left[1 + \frac{k_U U_m}{U_0} m(t) \right] \cos \omega_0 t$$

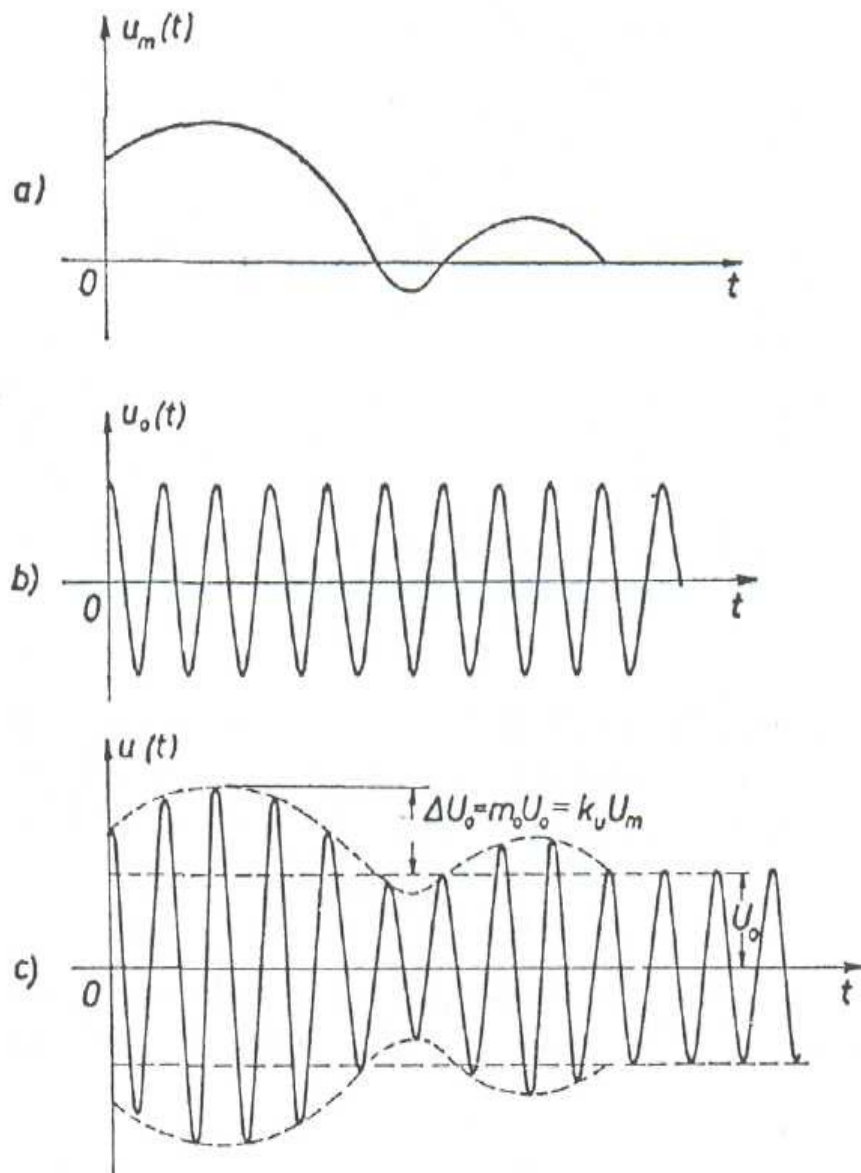
$$k_U U_m = \Delta U_0$$

$$\frac{k_U U_m}{U_0} = \frac{\Delta U_0}{U_0} = m_0$$

pa je:

$$u_{KAM}(t) = U_0 \left[1 + \frac{\Delta U_0}{U_0} m(t) \right] \cos \omega_0 t = U_0 [1 + m_0 m(t)] \cos \omega_0 t$$

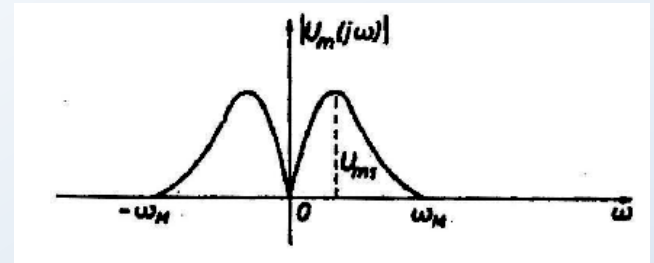
- $u_m(t)$ je modulišući signal
- nosilac je oblika $u_o(t) = U_o \cos \omega_o t$
- $u(t)$ je talasni oblik za KAM signal
- ΔU_o je maksimalna promjena amplitude modulisanog signala koja je k_u puta veća od maksimalne vrijednosti modulišućeg signala
- m_o izražava maksimalnu relativnu promjenu amplitude modulisanog signala i naziva se **stepen (indeks) modulacije** (m_o se izražava i u procentima).



Slika: Talasni oblici: a) modulišući signal; b) nosilac; c) amplitudski modulirani signal KAM tipa

Spektar KAM signala:

1. $u_m(t)$ je aperiodičan signal
2. $u_m(t)$ je periodičan signal.



1. $u_m(t)$ je aperiodičan signal čija je jednosmjerna komponenta nula, a spektar je ograničen učestanošću ω_m . Zadovoljen je i uslov:

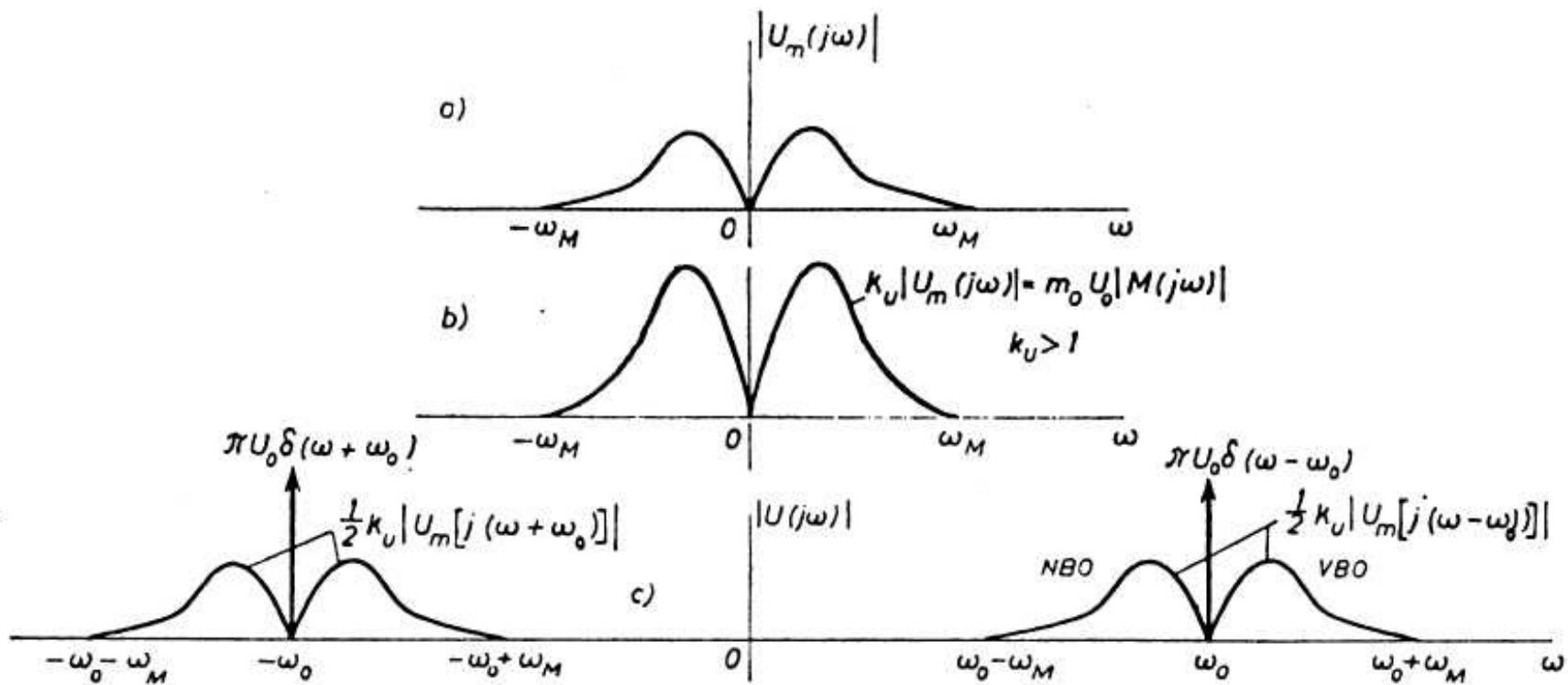
$$U_0 + k_U u_m(t) \geq 0, \text{ tj. } 1 + m_0 m(t) \geq 0$$

Spektar modulisanog signala $u_{KAM}(t)$ dobiće se Fourierovom transformacijom izraza koji predstavlja KAM signal, pa je:

$$U(j\omega) = \pi U_0 \delta(\omega - \omega_0) + \pi U_0 \delta(\omega + \omega_0) + \frac{1}{2} k_U U_m [j(\omega - \omega_0)] + \frac{1}{2} k_U U_m [j(\omega + \omega_0)]$$

Spektar KAM signala sastoji se od sinusoidalne komponente učestanosti ω_0 i nižeg i višeg bočnog opsega koji su smješteni simetrično u odnosu na $\omega = \omega_0$. Oblik krive spektralnih gustina svakog od bočnih opsega identičan je obliku krive spektralne gustine amplituda modulišućeg signala.

- ✓ U svakom od bočnih opsega sadržana je prenošena poruka.
- ✓ Za prenos poruka modulisanim signalom tipa KAM potreban je opseg učestanosti dvostruko veći od širine spektra modulišućeg signala f_M .



Slika: Spektralna gustina amplituda: a) modulišućeg signala, b) modulišućeg signala pomnožena sa k_U , c) KAM signala

2. Modulišući signal je periodičan, a amplitudski spektar je ograničen učestanošću ω_M . Funkcija $u_m(t)$, koja opisuje ovakav signal, moći će da se predstavi u obliku Fourierovog reda:

$$u_m(t) = \sum_{n=-M}^M U_{mn} e^{jn\omega_1 t} = 2 \sum_{n=1}^M |U_{mn}| \cos(n\omega_1 t + \theta_n)$$

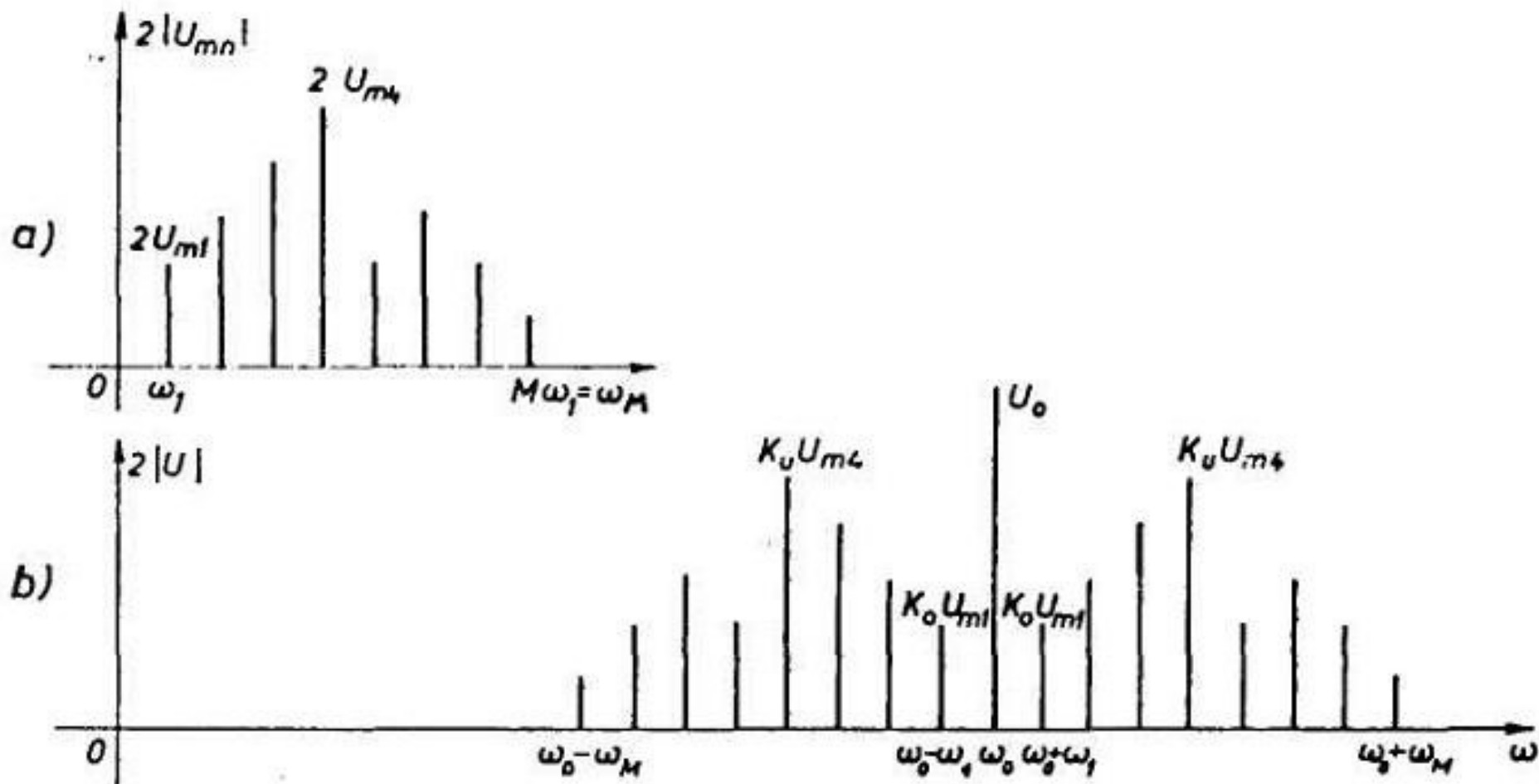
$\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi/T_1$, T_1 je perioda periodične funkcije.

Pošto smo prepostavili da je spektar funkcije $u_m(t)$ ograničen učestanošću ω_M , to mora biti $\omega_M = M \omega_1$, M predstavlja rang najvišeg harmonika u spektru.

Sada je:

$$\begin{aligned} u_{KAM}(t) &= \left[U_0 + k_U 2 \sum_{n=1}^M |U_{mn}| \cos(n\omega_1 t + \theta_n) \right] \cos \omega_0 t = \\ &= U_0 \cos \omega_0 t + k_U \sum_{n=1}^M |U_{mn}| \cos[(\omega_0 - n\omega_1)t - \theta_n] + k_U \sum_{n=1}^M |U_{mn}| \cos[(\omega_0 + n\omega_1)t + \theta_n] \end{aligned}$$

Na osnovu ovog izraza se lako određuje amplitudski spektar.



Slika: Amplitudski spektar: a) modulišućeg signala; b) modulisanog signala KAM tipa

Pošto je modulišući signal periodičan, njegov spektar je **diskretan**. Amplitudski spektar modulisanog signala takođe je diskretan:

- Svakoj komponenti modulišućeg signala odgovaraju dvije komponente modulisanog signala (dva bočna opsega).
- Amplituda svake komponente iznosi $1/2$ amplitude odgovarajuće komponente modulišućeg signala pomnožene koeficijentom k_U .
- Svaki od bočnih opsega u sebi sadrži kompletnu poruku.
- U spektru se javlja i nosilac, koji **ne nosi nikakvu poruku**.
- Opseg učestanosti potreban za prenos modulisanog signala tipa KAM je dva puta veći od najveće učestanosti u spektru modulišućeg signala.

Postavlja se pitanje: kakvog smisla ima koristiti ovu vrstu modulisanog signala za prenos poruka, kad je jasno da se prenosom nosioca ne prenosi nikakva informacija?

Odgovor na ovo pitanje će uslijediti nakon objašnjenja o demodulaciji ove vrste AM signala (prenos nosioca je opravdan radi vrlo jednostavne demodulacije modulisanog KAM signala).

Energetski bilans KAM signala:

Pretpostavimo da je modulišući signal oblika $u_m(t) = U_m \cos \omega_m t$. Tada je odgovarajući KAM signal oblika:

$$\begin{aligned} u_{KAM}(t) &= U_0 [1 + m_0 m(t)] \cos \omega_0 t = U_0 [1 + m_0 \cos \omega_m t] \cos \omega_0 t = \\ &= U_0 \cos \omega_0 t + \frac{U_0 m_0}{2} \cos(\omega_0 + \omega_m) t + \frac{U_0 m_0}{2} \cos(\omega_0 - \omega_m) t \end{aligned}$$

Srednja snaga na otporniku otpornosti R je:

$$P = \frac{U_0^2}{2R} \left[1 + \left(\frac{m_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{m_0}{2}\right)^2 \right] = \frac{U_0^2}{2R} \left(1 + \frac{m_0^2}{2} \right) = P_0 \left(1 + \frac{m_0^2}{2} \right)$$

Sa $P_0 = U_0^2 / 2R$ označena je snaga nosioca.

Srednja snaga u jednom bočnom opsegu u kom je sadržana prenošena poruka je:

$$P_{1BO} = \frac{1}{2R} \left(\frac{m_0 U_0}{2} \right)^2 = \frac{m_0^2}{4} P_0$$

Stoga je stepen iskorišćenja:

$$\eta = \frac{P_{1BO}}{P} = \frac{1}{2} \frac{m_0^2}{2 + m_0^2}$$

Stepen iskorišćenja je najveći onda kada je indeks modulacije $m_0=1$, i on iznosi $1/6$. Znači, $5/6$ snage predajnika emituje se samo da bi demodulacija, odnosno prijemnik bili jednostavniji.

Za ispravnu demodulaciju KAM signala mora biti zadovoljen uslov da je:

$$\omega_0 \geq \omega_M$$

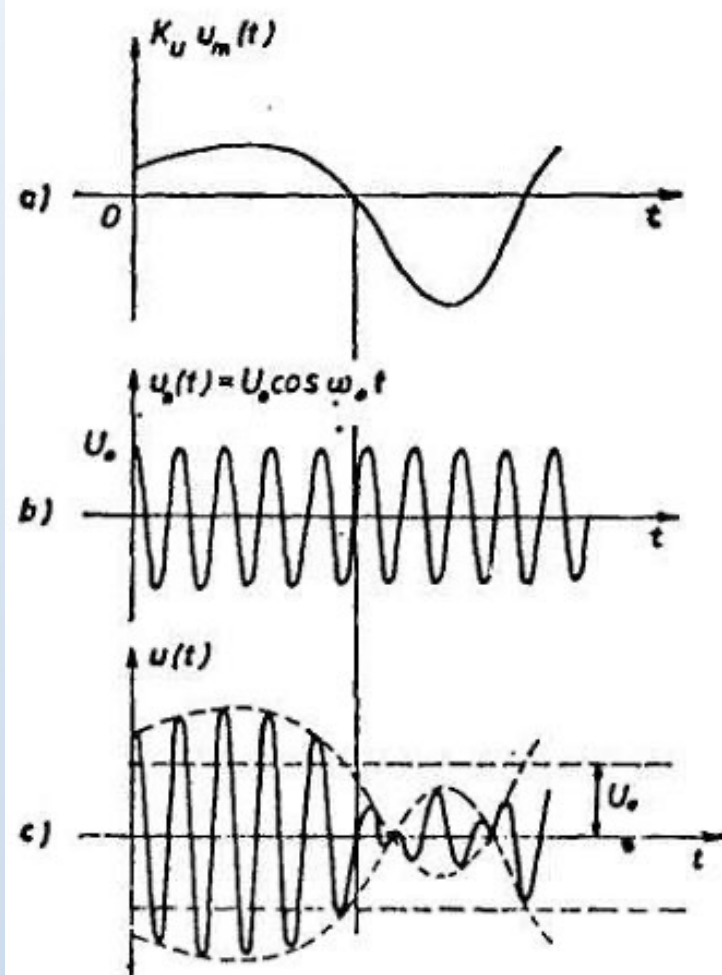
Postoji još jedan uslov:

$$U_0 + k_U u_m(t) \geq 0$$

U slučaju da nije ispunjen, talasni oblik modulisanog signala je kao na slici. Anvelopa modulisanog signala više nije srazmjerna modulišućem signalu. Za takav modulisani signal se kaže da je **premodulisan**.

KAM modulatori:

1. Pomoću nelinearnog sklopa, a KAM signal se izdvaja pomoću filtra koji propušta opseg učestanosti od $\omega_0 - \omega_M$ do $\omega_0 + \omega_M$.
2. Pomoću linearnog prekidača
3. Pomoću parametarske modulacije



Slika: a) modulišući signal, b) nosilac, c) premodulisani KAM signal