



Osnove telekomunikacija

Doc. dr Enis Kočan (enisk@ucg.ac.me)

Saradnici: Dr Uglješa Urošević (ugljesa@ucg.ac.me)

MSc Slavica Tomović (slavicat@ucg.ac.me)

SADRŽAJ KURSA

1. Uvod. Opšti model telekomunikacionog sistema. Vrste prenosa signala.
2. Medijumi za prenos. Pojam modulacije.
3. Multipleksiranje. Referentni model za povezivanje otvorenih sistema (OSI i TCP/IP)
4. Harmonijska analiza periodičnih signala
5. Analiza aperiodičnih signala i slučajnih signala
6. Prenos signala kroz linearne sisteme. Izobličenja pri prenosu signala
- 7. Amplitudske modulacije**
8. Demodulacija AM signala. Realizacija multipleksa sa frekvencijskom raspodelom kanala
9. Ugaona modulacija. Spektar UM signala
10. FM modulatori. Demodulacija FM signala
11. Slučajni šum. Karakteristike uskopojasnog šuma
12. Uticaj šuma na prenos amplitudski moduliranih signala
13. Uticaj šuma na prenos ugaono moduliranih signala

Termin 7 - Sadržaj

- **Obrada signala**
- Amplitudska modulacija
- Realizacija produktne modulacije
- AM signali sa dva bočna opsega
- KAM signal

Obrada signala

- Različite vrste poruka se, prije prenosa telekomunikacionim sistemima, ekvivalentiraju električnim signalima.
- Dobijeni električni signali se na drugi kraj veze mogu prenositi u svom izvornom obliku – ***prenos u osnovnom (prirodnom, fizičkom) opsegu učestanosti***. Ovakav prenos je najjednostavniji.
- Osim ovog, postoje i drugi načini prenosa koji zahtijevaju prethodnu obradu originalnog signala. Cilj obrade je da se jednom pomoćnom periodičnom determinističkom signalu modifikuju neki osnovni parametri, tako da on postane ***nosilac*** originalnog signala, a samim tim i prenošene poruke. Postupak kojim se modifikuju parametri periodičnog signala u funkciji karakterističnih veličina izvornog signala, naziva se ***modulacija***.
- Cilj postupka modulacije je da se signal obradi tako da bude podesan za prenos.

- Signal koji je originalni nosilac poruke naziva se ***modulišući signal***, pomoćni periodični signal se naziva ***nosilac***, a modulišućim signalom modificovani nosilac naziva se ***modulisani signal***.
- Na mjestu prijema primljeni modulisani signal mora da se podvrgne novoj obradi. Neminovan je inverzan proces: iz modulisanog signala treba izvući originalan signal koji nosi poruku. Takav postupak obrade modulisanog signala naziva se ***demodulacija***, a na prijemu dobijeni originalan signal ***demodulisani (detektovani) signal***.
- Modulacija i demodulacija predstavljaju dva nerazdvojiva postupka u prenosu signala. Prvi je vezan za predajnik, a drugi za prijemnik. Sklop kojim se obavlja modulacija naziva se ***modulator***, a sklop u kome se obavlja demodulacija ***demodulator***. U opštem modelu komunikacionog sistema, modulator je sastavni dio kanalnog kodera, a demodulator kanalnog dekodera. Zajedničkim imenom, modulator i demodulator nazivaju se ***modem***.

- Obrada signala ima veliki značaj. Neke mogućnosti koje pruža modulacija su:
 - ✓ Radioprenos poruka
 - ✓ Frekvencijski multipleksni ili višekanalni sistemi prenosa.
 - ✓ Veća zaštita prenošenog signala od uticaja smetnji u vidu šumova.
 - ✓ Specijalnim postupcima modulacije signali se mogu zabilježiti i uskladištiti, što ima poseban značaj za njihovu reprodukciju u bilo kom vremenu.
- Danas postoji mnogo načina za modulisanje nosilaca koji se mogu klasifikovati u nekoliko grupa. Podjela se može izvršiti prema talasnom obliku modulisanog signala:
 - 1) postupci u kojima je modulisani signal kontinualan,
 - 2) postupci kojima se kao rezultat modulacije dobija signal impulsnog talasnog oblik.

- Kod postupaka u kojima se dobija ***kontinualan*** modulirani signal kao nosilac se koristi signal ***sinusoidalnog talasnog oblika***. On ima tri karakteristična parametra: **amplitudu, učestanost i fazu**. Na svaki od ovih parametara se može posebno uticati, tako što se izabrani parametar mijenja direktno srazmjerno modulišućem signalu. U skladu sa tim razlikuje se:
 - a) ***Amplitudska modulacija*** (AM) - amplituda nosioca je direktno proporcionalna modulišućem signalu;
 - b) ***Frekvencijska modulacija*** (FM) - učestanost nosioca je direktno proporcionalna modulišućem signalu;
 - c) ***Fazna modulacija*** (Φ M) - faza nosioca je direktno proporcionalna modulišućem signalu.
- Posljednja dva modulaciona postupka se nazivaju zajedničkim imenom ***ugaona modulacija*** (UM).

Termin 7 - Sadržaj

- Obrada signala
- **Amplitudska modulacija**
- Realizacija produktne modulacije
- AM signali sa dva bočna opsega
- KAM signal

Amplitudska modulacija

- Spada u grupu **linearnih modulacionih postupaka** u kojima se koristi kontinualni nosilac sinusoidalnog talasnog oblika.
- Kod linearnih modulacionih postupaka modulacija se obavlja translacijom spektra modulišućeg signala bez generisanja novih spektralnih komponenti.
- U procesu ove modulacije amplituda nosioca modifikuje se tako da ona postane vremenska funkcija direktno srazmjerna modulišućem signalu.

- Postoji nekoliko vrsta amplitudski moduliranih signala. Oni se međusobno razlikuju po tome koji se karakteristični dio spektra moduliranog signala prenosi, pa razlikujemo:
 1. AM signal sa dva bočna opsega (AM-2BO)
 2. AM signal sa dva bočna opsega i nosiocem – konvencionalni AM signal (KAM)
 3. AM signal sa jednim bočnim opsegom (AM-1BO)
 4. AM signal sa nesimetričnim bočnim opsezima (AM-NBO)
- Inverzan proces - demodulacija AM signala je takođe linearan i predstavlja translaciju spektra iz domena viših u domen nižih učestanosti.

Produktna modulacija – princip dobijanja AM signala

Kod AM nosilac je kontinualan, oblika: $u_0(t) = U_0 \cos \omega_0 t$

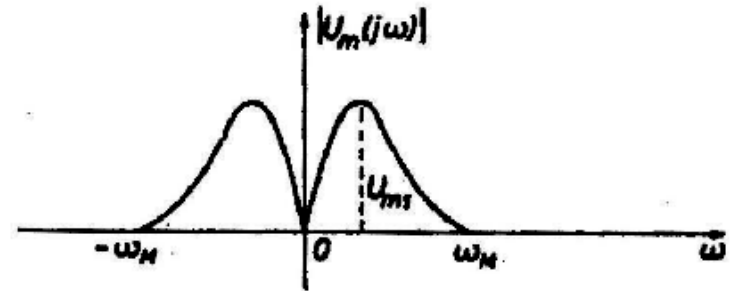
$U_0 = \text{const.}$ je amplituda napona nosioca, $\omega_0 = 2\pi f_0$ njegova kružna učestanost.

Neka je sa $u_m(t)$ označen električni ekvivalent poruke (modulišući signal).

Pretpostavimo da modulišući signal ima sledeće osobine:

- da je njegova srednja vrijednost jednaka nuli;
- da je njegov spektar ograničen učestanošću ω_M

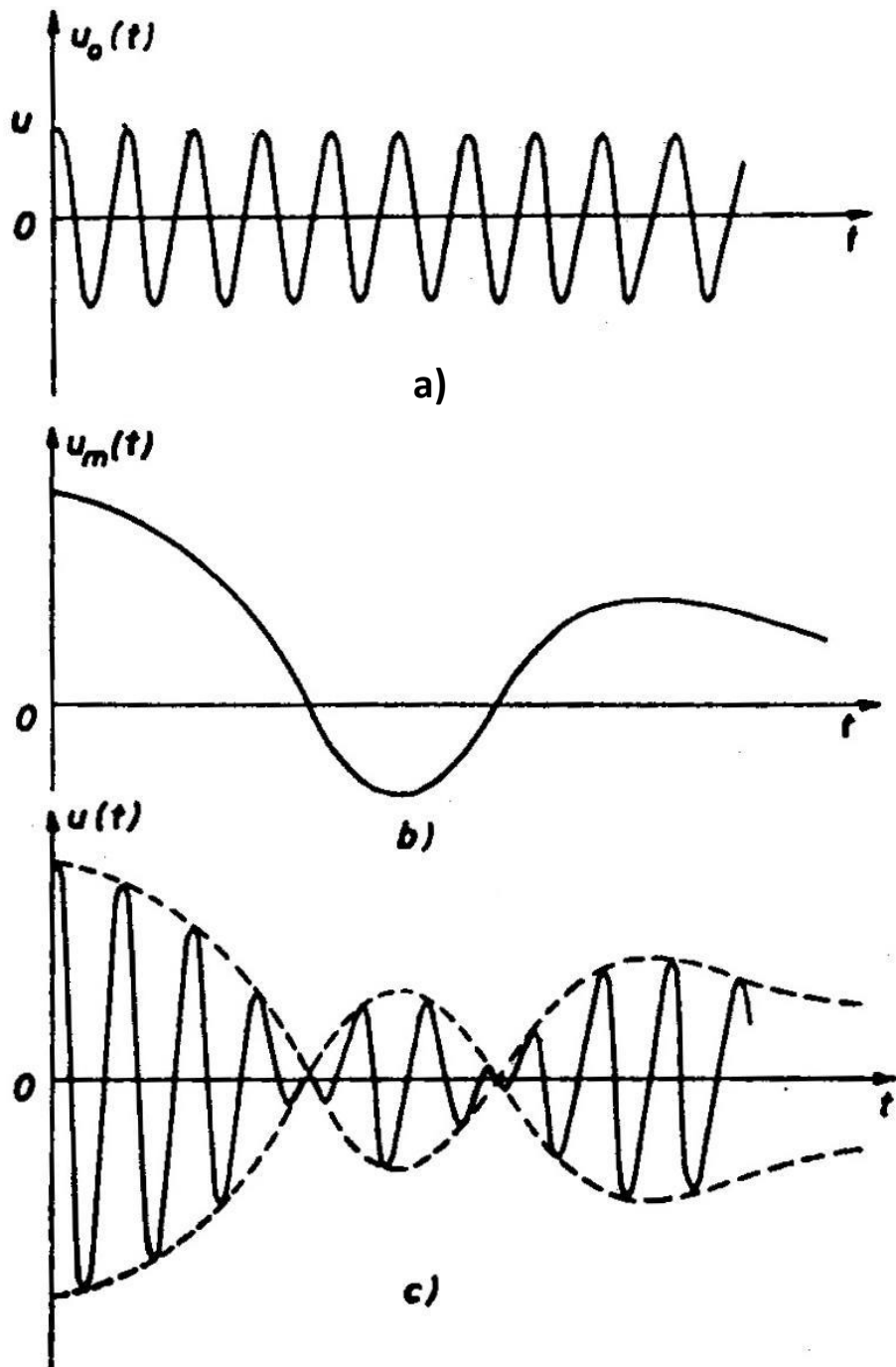
$$U_m(j\omega) = \begin{cases} U_m(j\omega) & |\omega| < \omega_M \\ 0 & |\omega| > \omega_M \end{cases}$$



Amplitudska modulacija podrazumijeva modifikaciju amplitude nosioca tako da ona u procesu modulacije postaje direktno srazmjerna modulišućem signalu. Stoga izraz za amplitudski modulirani signal treba da bude u obliku:

$$u_{AM}(t) = k_U u_m(t) \cos \omega_0 t$$

k_U predstavlja neku konstantu proporcionalnosti. Veličina $k_U u_m(t)$ može da se shvati kao promjenljiva amplituda koja nosi poruku.



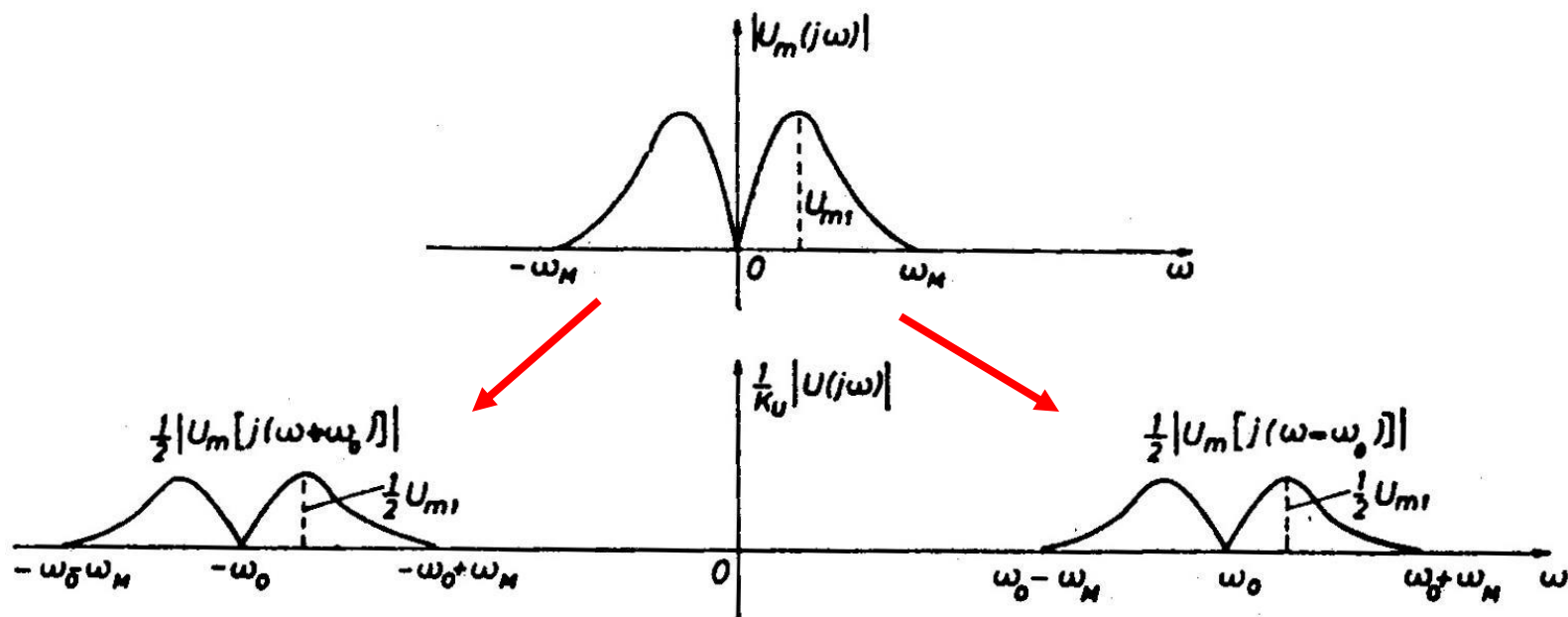
- Na slici su prikazane funkcije koje predstavljaju nosilac, modulišući i modulirani signal. Uočava se da je anvelopa moduliranog signala direktno srazmjerna modulišućem signalu.
- Iz izraza za AM signal vidi se da se on dobija kao proizvod dvije funkcije: $k_U u_m(t)$ i $\cos \omega_0 t$. Stoga se modulacija zasnovana na ovom principu naziva **produktna modulacija**, a sklopovi pomoću kojih se ona realizuje nazivaju se **produktivnim modulatorima**.

Slika: a) Nosilac b) modulišući signal
c) modulirani signal

- Spektar dobijenog AM signala (primjenom Fourierove transformacije):

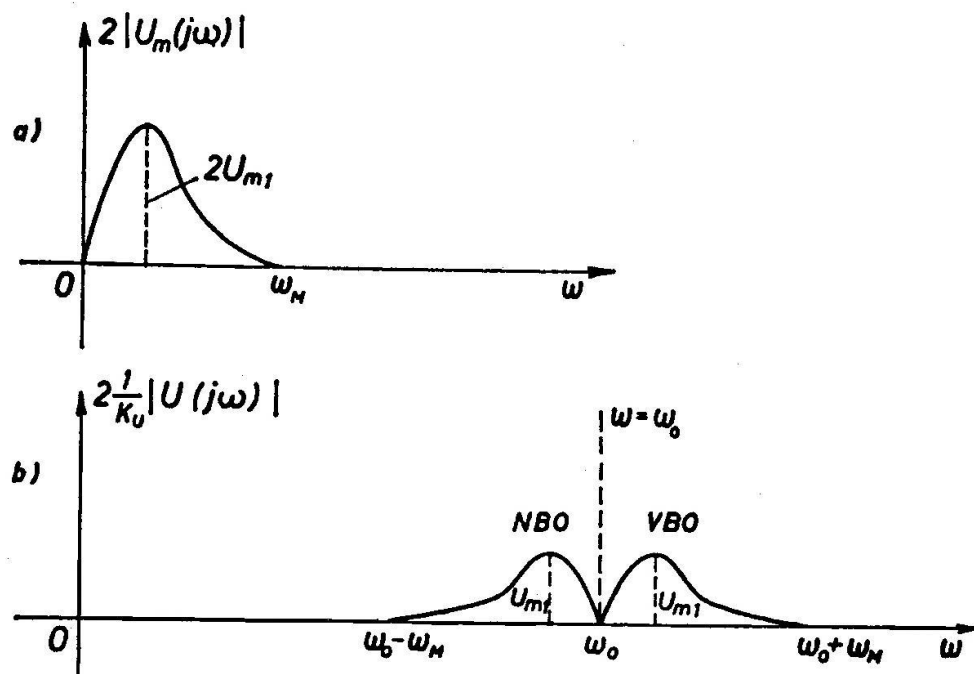
$$U(j\omega) = \frac{1}{2} k_U U_m [j(\omega - \omega_0)] + \frac{1}{2} k_U U_m [j(\omega + \omega_0)]$$

- Zaključujemo da se množenjem signala i nosioca u vremenskom domenu vrše dvije translacije u frekvencijskom domenu, jedna za vrijednost učestanosti nosioca ω_0 i druga za $-\omega_0$.



Slika: Na gornjoj slici je spektralna gustina amplituda modulišućeg signala $u_m(t)$, a na donjoj spektralna gustina amplituda modulisanog signala $u(t)/k_U = u_m(t)\cos \omega_0 t$

- Poslije izvršene amplitudske modulacije širina spektra je dva puta veća od širine spektra modulišućeg signala. Spektar koji se nalazi u opsegu učestanosti $(\omega_0 \div \omega_0 + \omega_M)$ naziva se **višim bočnim opsegom** (VBO), a njemu simetričan spektar u opsegu $(\omega_0 - \omega_M \div \omega_0)$ **nižim bočnim opsegom** (NBO).



Slika: a) Spektralna gustina amplituda modulišućeg signala $u_m(t)$
 b) spektralna gustina amplituda modulisanog signala $u(t)/k_U = u_m(t)\cos \omega_0 t$
 u slučaju kada se uzmu u obzir samo pozitivne učestanosti.

- Oblik i jednog i drugog bočnog opsega ostao je isti kao i oblik spektra modulišućeg signala. Znači, modulirani signal vjerno nosi u sebi prenošenu poruku.
- Cilj modulacije je translacija spektra modulišućeg signala za vrijednost ω_0 .
- Prenošeni signal $u_m(t)$, u svom osnovnom opsegu učestanosti, ima spektar koji zauzima opseg:

$$B_{NF} = f_M - 0 = f_M$$

- Modulirani signal zauzima dva puta širi opseg učestanosti :

$$B_{VF} = (f_0 + f_M) - (f_0 - f_M) = 2f_M = 2B_{NF}$$

- Modulirani signal ima dva bočna opsega, i ovaj tip amplitudski moduliranog signala naziva se AM signal sa dva bočna opsega (AM-2BO).
- I viši i niži bočni opseg imaju oblik spektra modulišućeg signala, pa je za prenos željene poruke u principu dovoljno prenositi samo jedan bočni opseg. Takav AM signal se naziva AM signal sa jednim bočnim opsegom (AM-1BO).

Termin 7 - Sadržaj

- Obrada signala
- Amplitudska modulacija
- **Realizacija produktne modulacije**
- AM signali sa dva bočna opsega
- KAM signal

Realizacija produktne modulacije

- Produktna modulacija predstavlja osnov za dobijanje amplitudski moduliranih signala. Produktna modulacija se može realizovati na tri načina:
 1. Pomoću nelinearnih sklopova
 2. Pomoću prekidačkih sklopova
 3. Metodom varijacije parametara (zasniva na mogućnosti da se neki od parametara linearnog kola (R, L ili C) mijenja srazmerno modulišućem signalu)

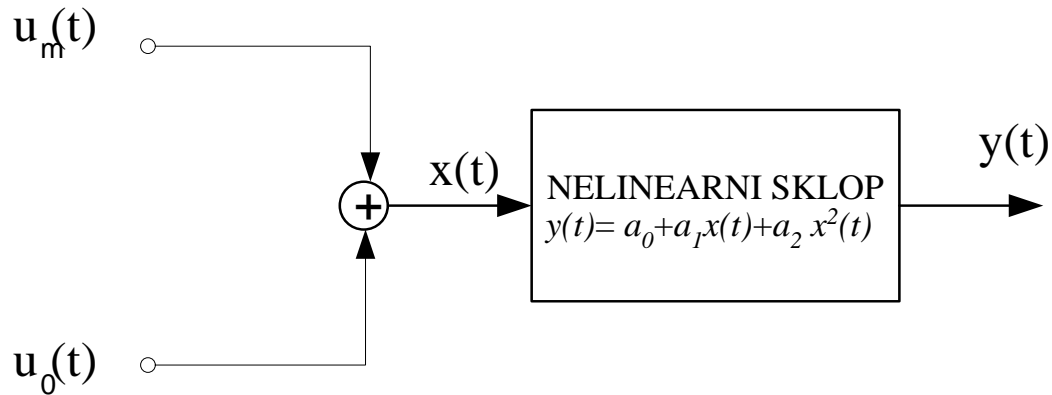
1. Realizacija produktne modulacije pomoću nelinearnih sklopova

- 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.

- Da bi razmatranje bilo lakše, pretpostavimo kvadratnu nelinearnu karakteristiku.

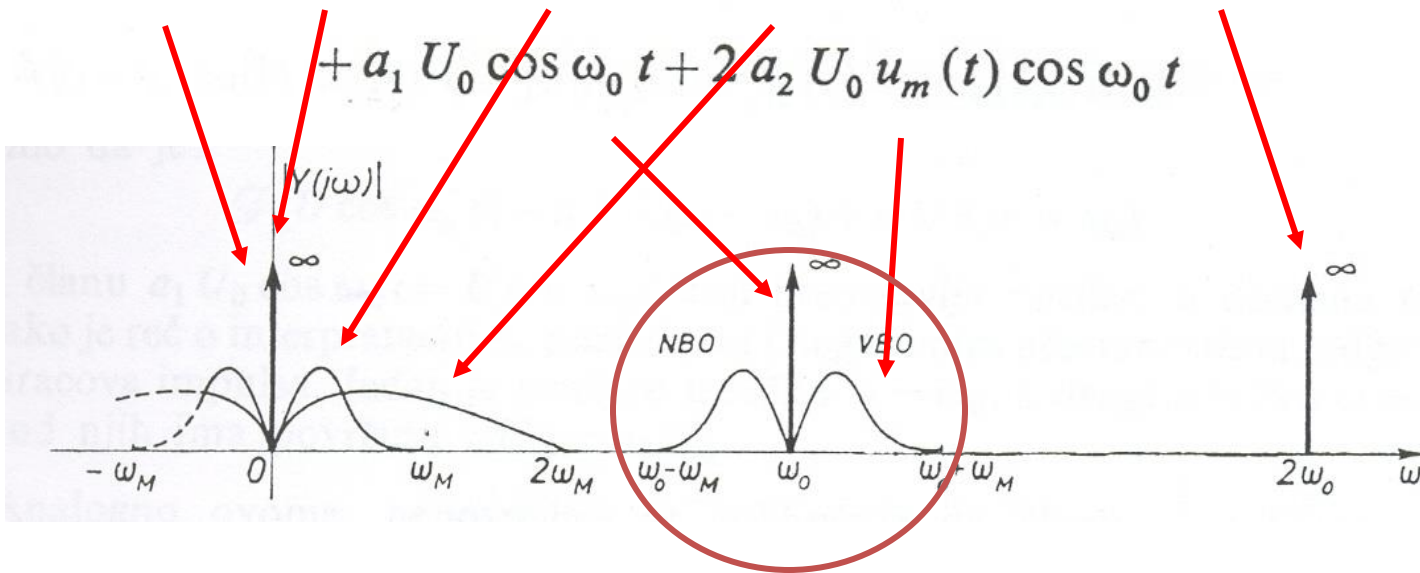


Slika: Blok-šema za dobijanje AM pomoću nelinearnog sklopa

- Neka na ulaz nelinearnog sklopa dolazi zbir modulišućeg signala i prostoperiodičnog nosioca. Tada se na izlazu ovog sklopa dobija signal:

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

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



- 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 drugi harmonik nosioca (Diracov impuls na učestanosti $2\omega_0$);
- Šesti član predstavlja nosilac;
- **Poslednji član je koristan produkt modulacije (AM signal);**
- **Znači, svi članovi sem poslednjeg predstavljaju parazite u slučaju koji posmatramo.**

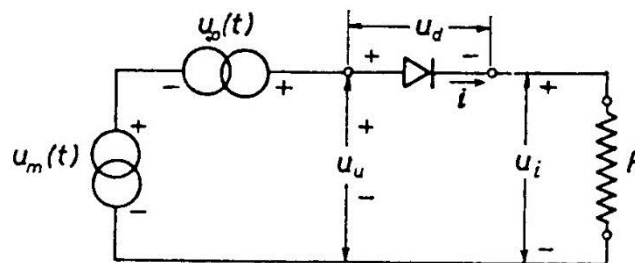
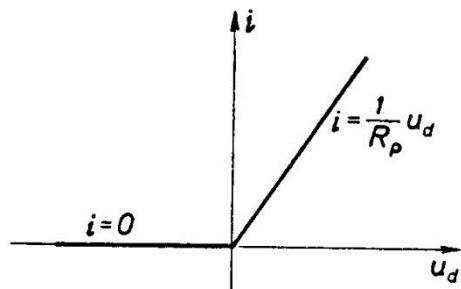
- Da bi se dobio amplitudski modulisan signal potrebno je iz spektra izlaznog signala izdvojiti korisni član. To se jednostavno može ostvariti pomoću filtra propusnika opsega učestanosti u opsegu $(\omega_0 - \omega_M \div \omega_0 + \omega_M)$. Pri tome se mora izbjeći eventualno preklapanje ove komponente 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 reda 2.

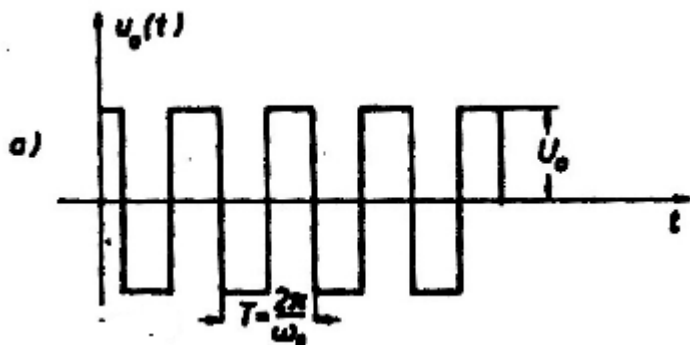
2. Realizacija produktne modulacije pomoću prekidačkih sklopova

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



Slika: Idealizovana karakteristika poluprovodničke diode; Tipično kolo linearnog prekidača

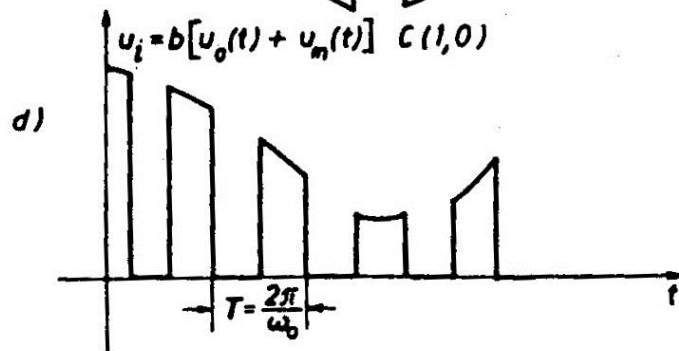
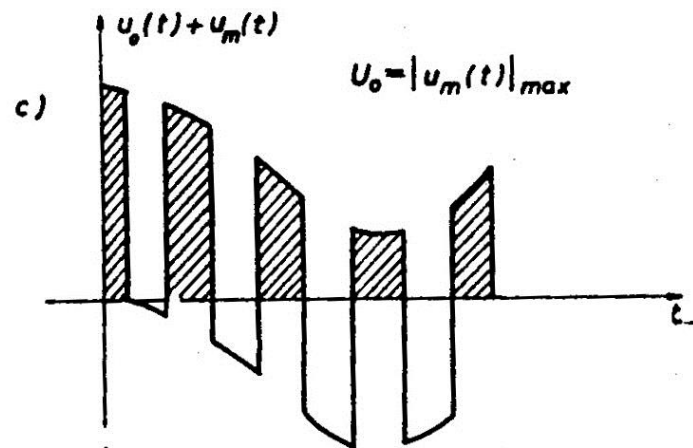
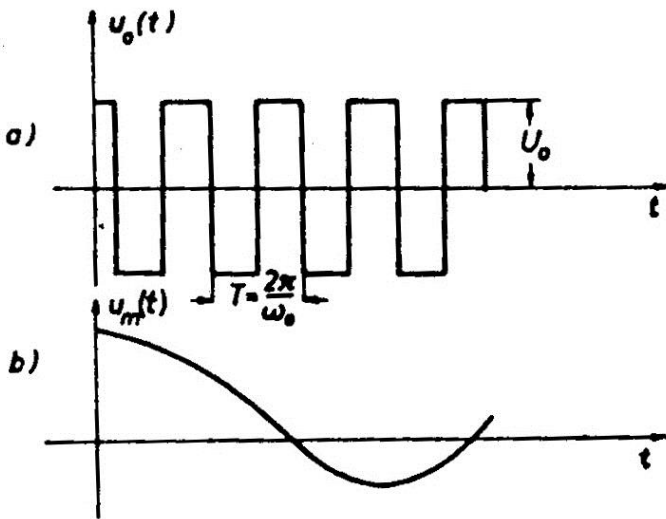
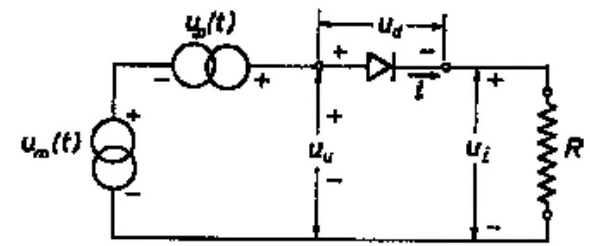
- U ovom slučaju nosilac nije sinusoidalna funkcija, već je povorka pravougaonih impulsa. Izraz za napon ovog signala može da se nađe na osnovu Fourierove analize i ima oblik:



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

Za diodu važi:

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

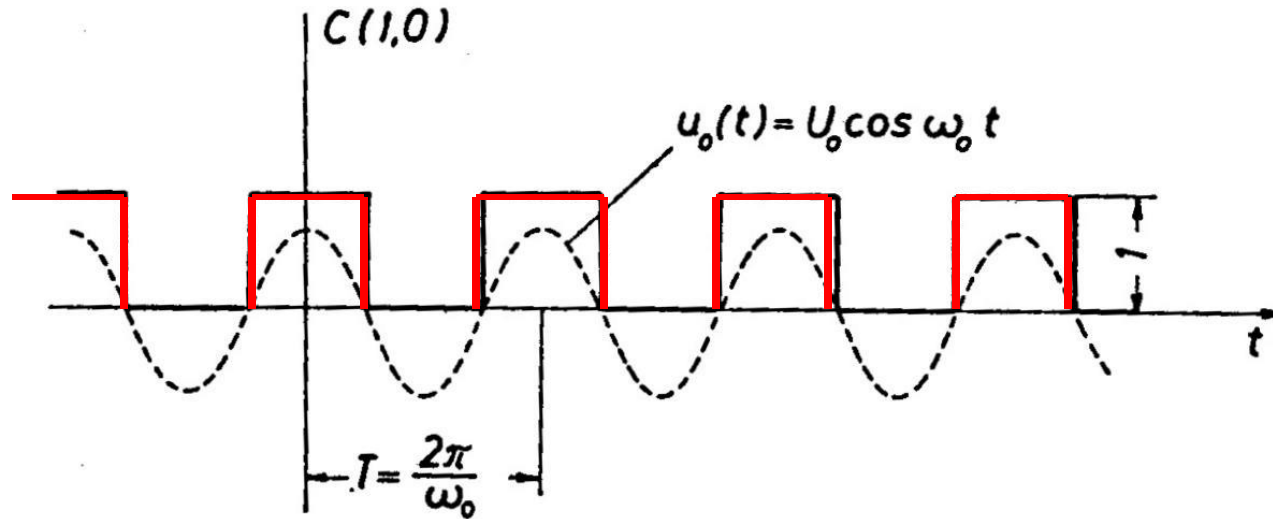


- **Nosilac upravlja radom diode, tj. linearnog prekidača.**
- Na osnovu slike, izlazni napon $u_i(t)$ je proporcionalan sumi napona nosioca i modulišućeg signala kada je $u_d > 0$, odnosno kad je $u_0(t) > 0$.
- Isto tako vidi se da je $u_i = 0$, kada je $u_d \leq 0$, odnosno kada je $u_0(t) \leq 0$. Prema tome, pozitivni dijelovi krive $u_0(t) + u_m(t)$, (osjenčena površina) predstavljaju u nekoj razmjeri izlazni napon u_i .

$$u_i(t) = \frac{R}{R + R_d} [u_0(t) + u_m(t)] C(1,0)$$

Slika: Vremenski dijagrami pojedinih napona a) napon nosioca $u_0(t)$; b) modulišući signal $u_m(t)$; c) suma napona $u_0(t) + u_m(t)$; 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.



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

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

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

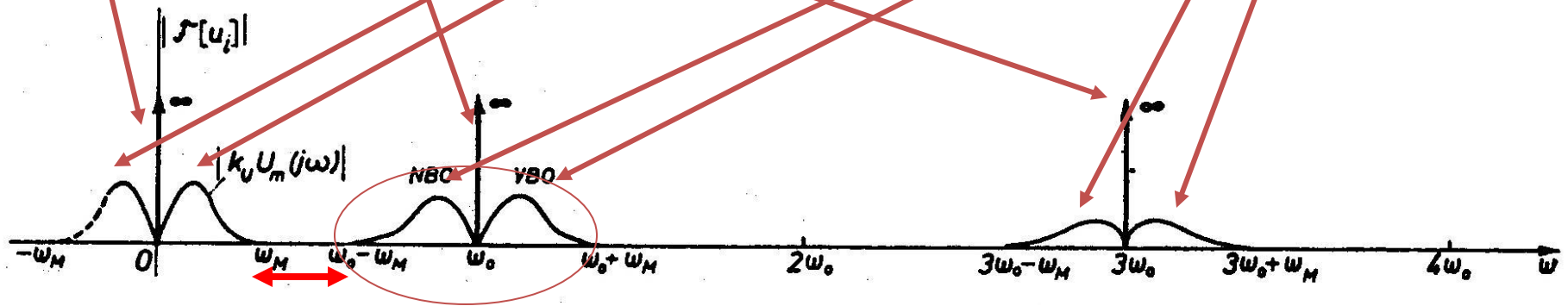
$C(1,-1)$ predstavlja povorku naizmjeničnih pravougaonih impulsa čije su amplitude u pozitivnim poluperiodama jednake 1, a u negativnim -1.

$C(1,0)$ 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.

Termin 7 - Sadržaj

- Obrada signala
- Amplitudska modulacija
- Realizacija produktne modulacije
- **AM signali sa dva bočna opsega**
- KAM signal

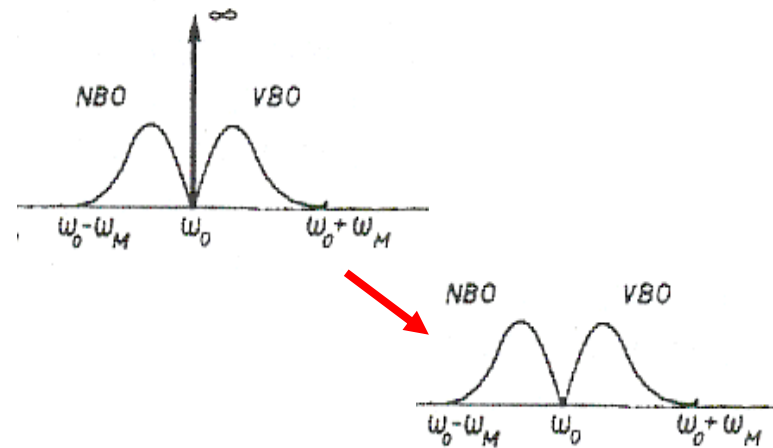
Vrste AM signala i principi izgradnje modulatora

- Produktnom modulacijom se uvijek dobija amplitudski modulirani 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 bismo 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 moduliranog signala za $-\omega_0$. Za to je na prijemu potreban pomoćni signal identičan nosiocu, koji KAM signal obezbjeđuje.

- Navedeni primjeri predstavljaju 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.

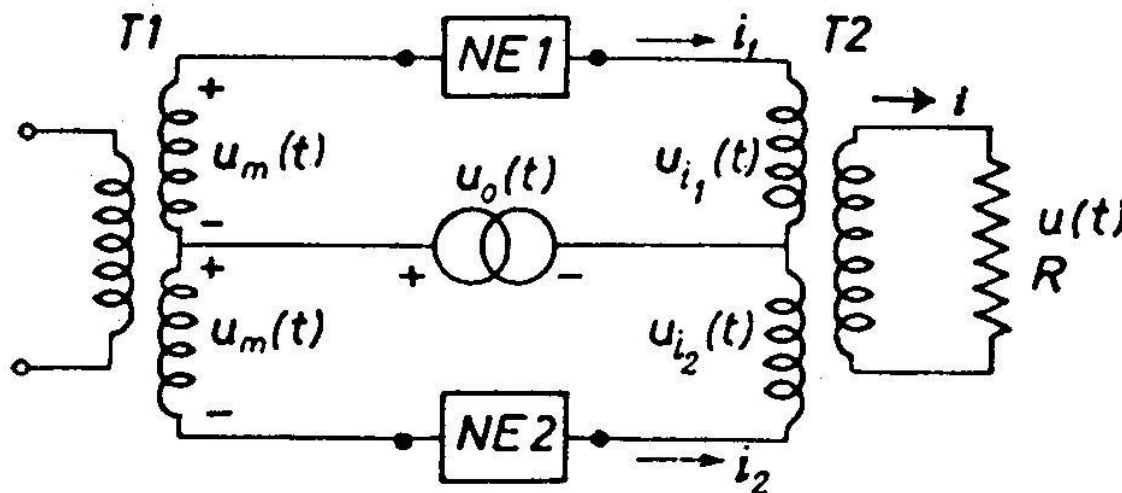
AM signali sa dva bočna opsega

- AM-2BO 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**
 - Sastoje se od prekidačkih elemenata (dioda) u izbalansiranim električnim šemama, tako da se dobije signal sa dva bočna opsega, bez nosioca.



1. BALANSNI NELINEARNI MODULATOR

- Ovaj modulator se izgrađuje 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.

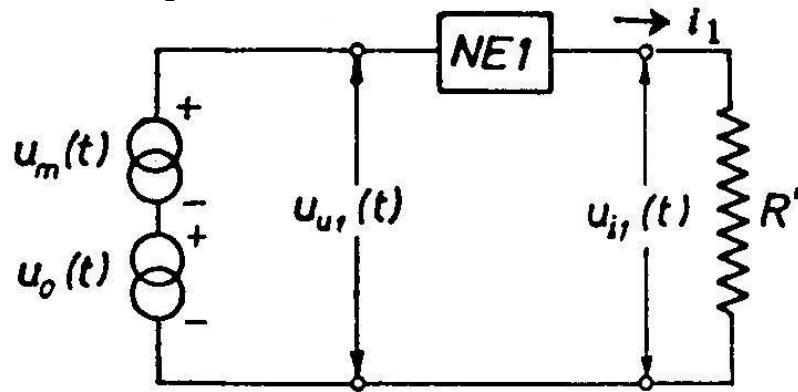


Slika: Šema nelinearnog balansnog modulatora

- 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 budu 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:

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

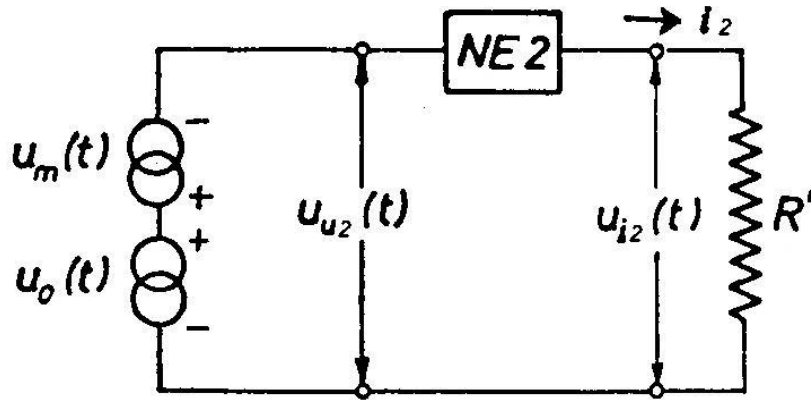
Kako je ulazni signal:

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

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' :

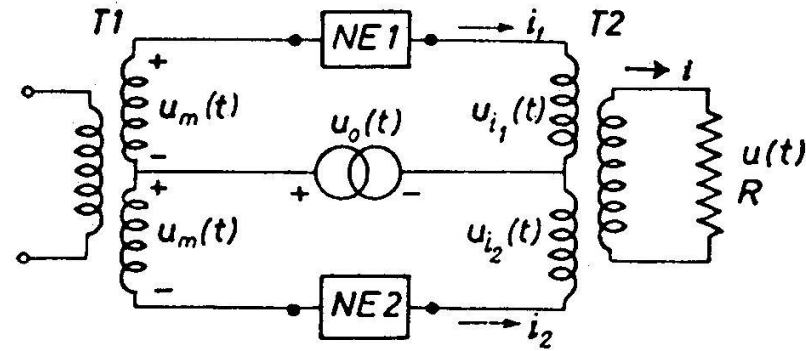
$$u_{i2}(t) = a_0 + a_1[u_o(t) - u_m(t)] + a_2[u_o(t) - u_m(t)]^2$$

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:

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



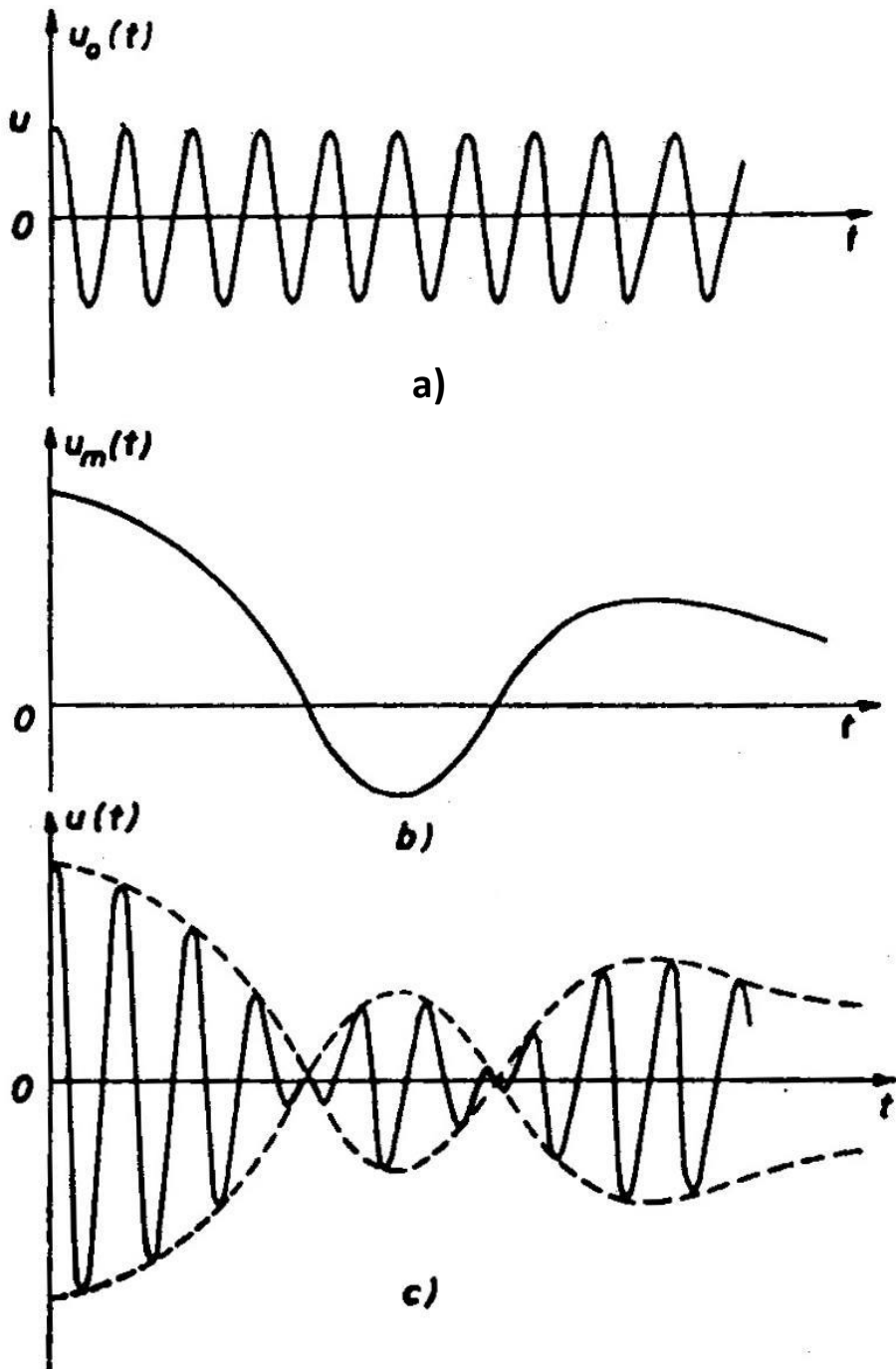
Na izlazu iz modulatora dobio se **modulišući signal** i drugi član koji predstavlja **modulisani signal tipa AM-2BO**, tj. **nema nosioca**.

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:

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

Vremenski oblik AM-2BO signala

- Poruka je sakrivena u anvelopi pozitivnih i negativnih vrhova, naizmjenično.



Slika: a) Nosilac b) modulišuci signal
c) AM-2BO modulisani signal

Termin 7 - Sadržaj

- Obrada signala
- Amplitudska modulacija
- Realizacija produktne modulacije
- AM signali sa dva bočna opsega
- **KAM signal**

Konvencionalni AM (KAM) signal

- 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:

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

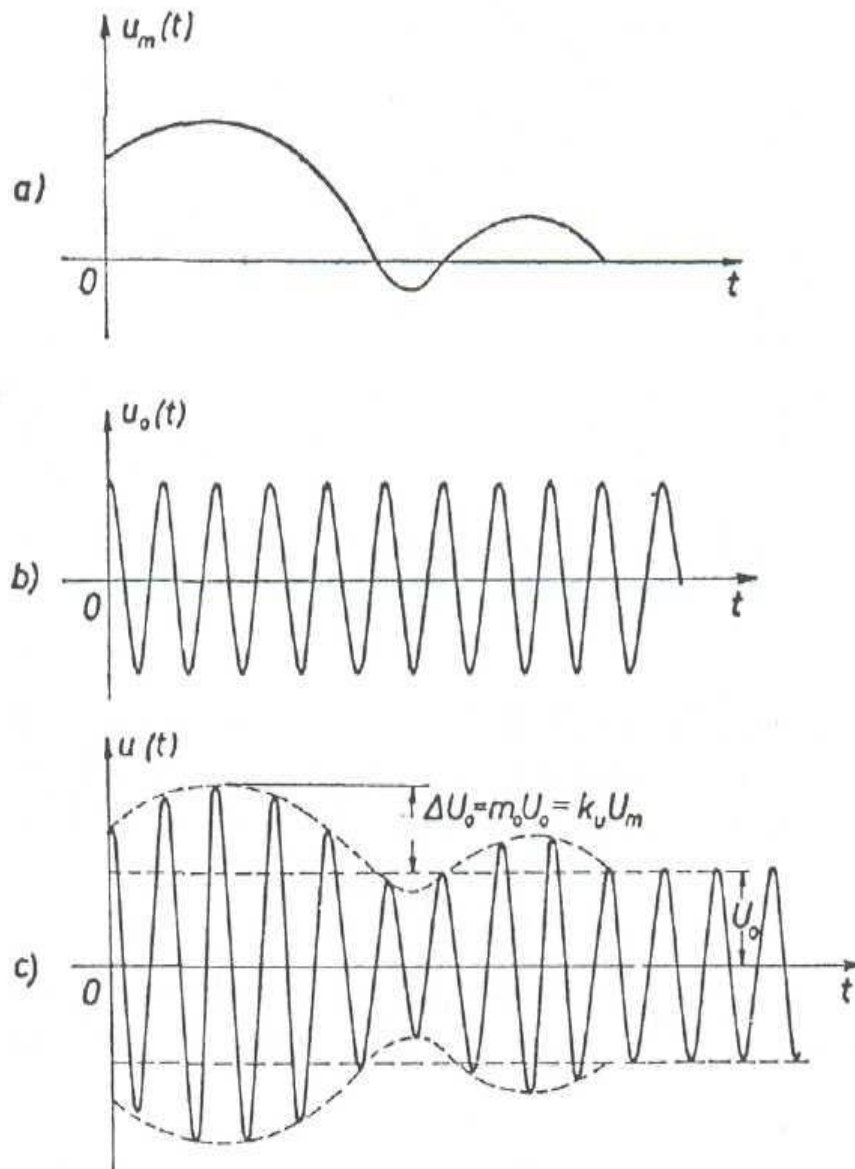
$$k_U U_m = \Delta U_0$$

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

Iz prethodnog se dobija da je:

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

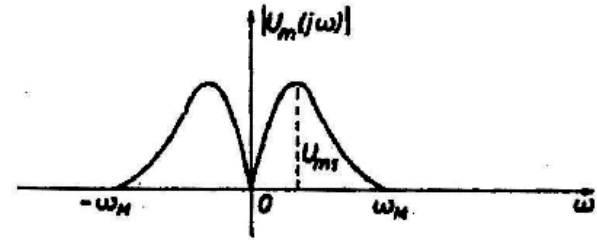
- $u_m(t)$ je modulišuci signal
- nosilac je oblika $u_0(t)=U_0\cos\omega_0t$
- $u(t)$ je talasni oblik za KAM signal
- ΔU_0 je maksimalna promjena amplitude modulisanog signala koja je k_u puta veća od maksimalne vrijednosti modulišućeg signala
- m_0 izražava maksimalnu relativnu promjenu amplitude modulisanog signala i naziva se **stepen (indeks) modulacije** (m_0 se izražava i u procentima).



Slika: Talasni oblici: a) modulišuci signal; b) nosilac; c) amplitudski modulisani signal KAM tipa

Spektar KAM signala

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



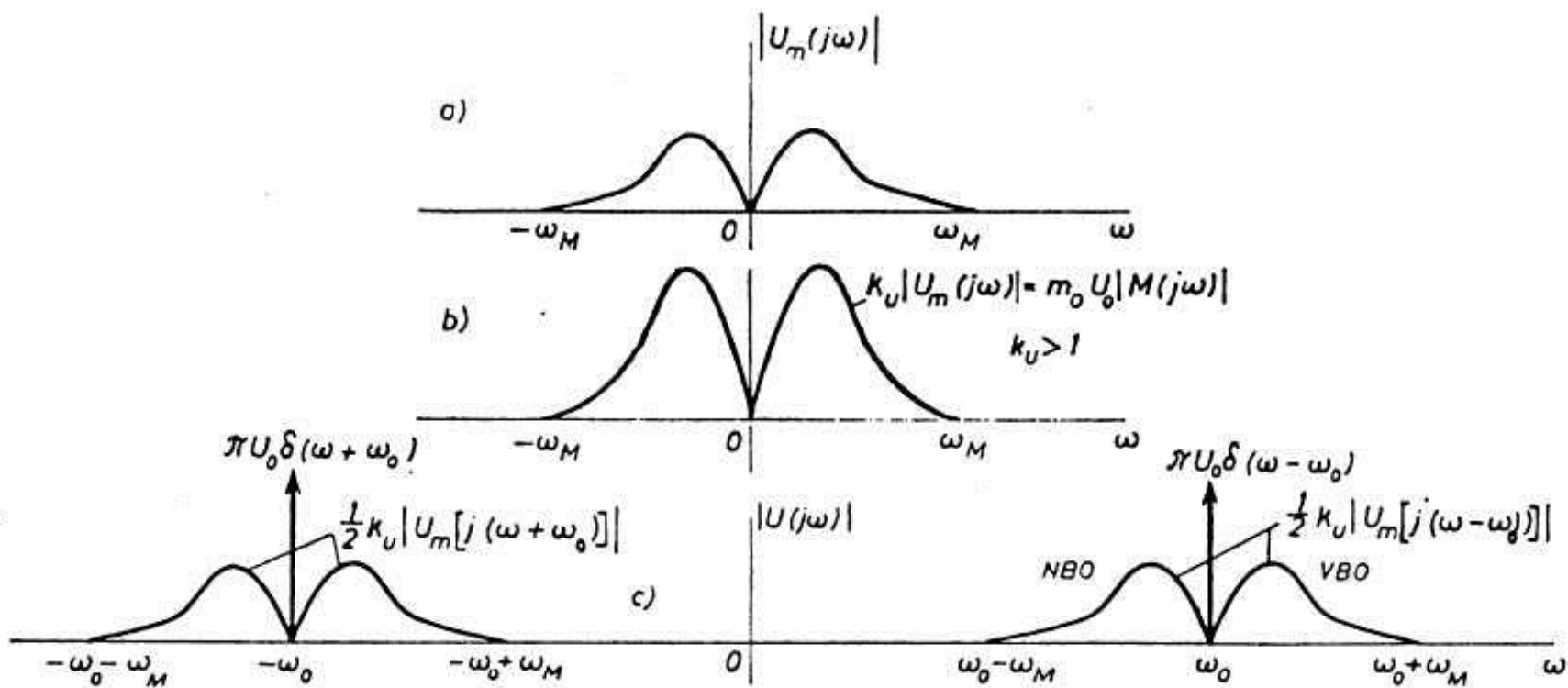
$$U_0 + k_U u_m(t) \geq 0, \text{ tj. } 1 + m_0 m(t) \geq 0$$

- 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

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:

$$\omega_0 \geq \omega_M$$

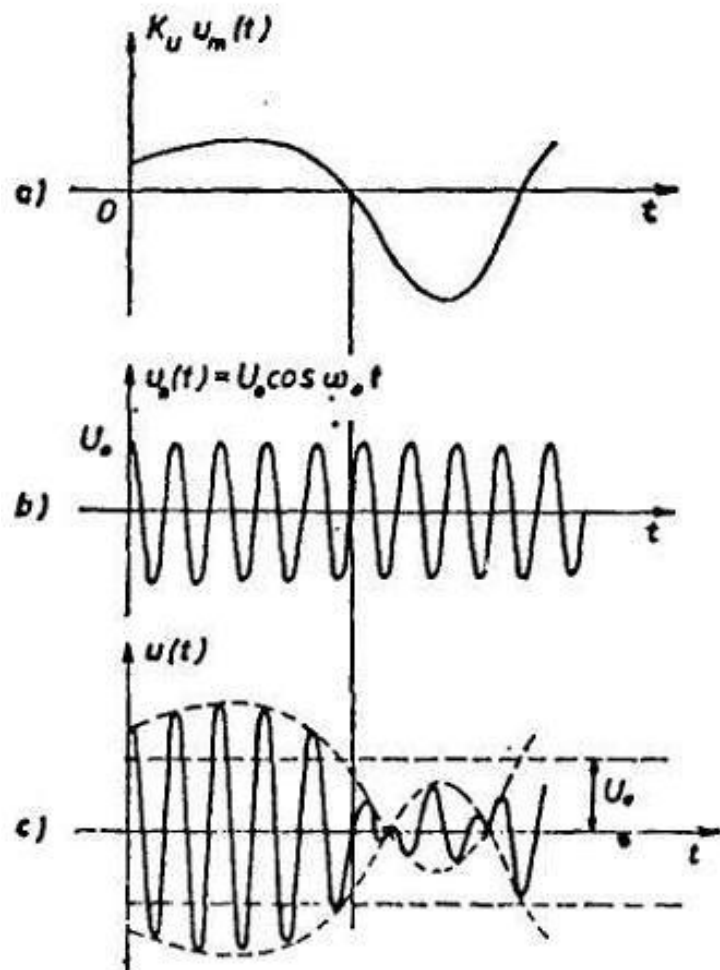
- Postoji još jedan uslov:

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

- 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