



ELEKTRONIKA

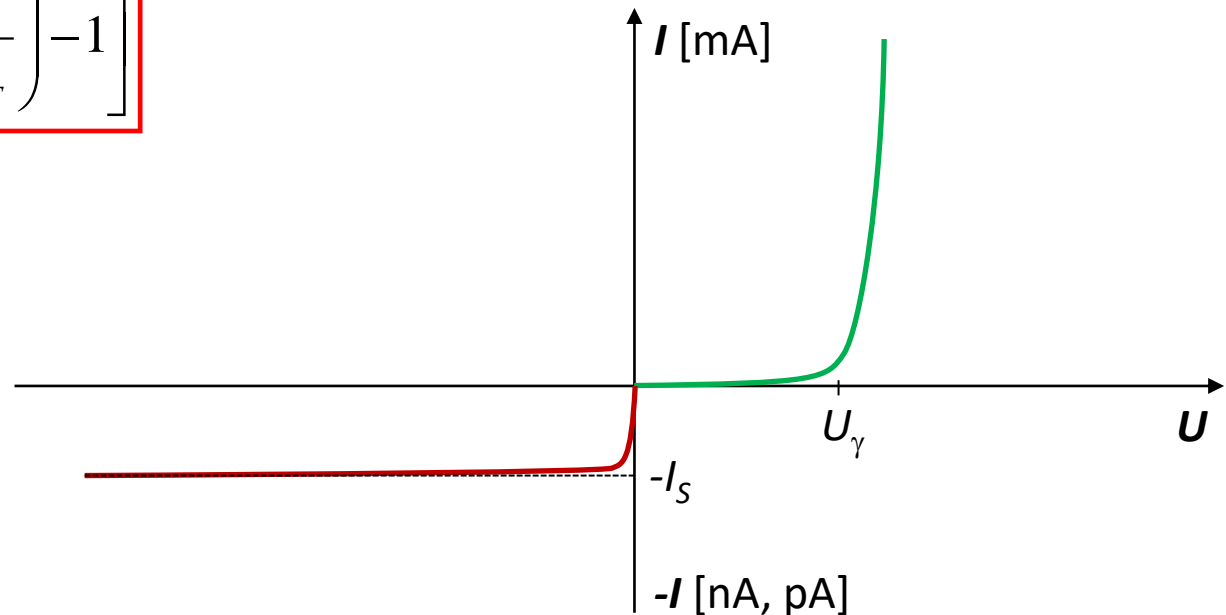
Predavanje 9

ANALIZA ELEKTRONIČKIH SKLOPOVA U STATIČKIM I DINAMIČKIM UVJETIMA RADA

Nelinearnost elektroničkih komponenata

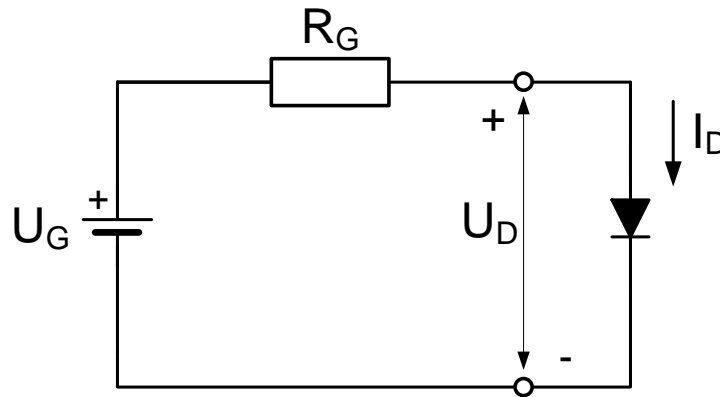
- Elektroničke komponente kao što su diode i tranzistori su nelinearne komponente.
- Dioda se uzima kao osnovni primjer nelinearne komponente čija je karakteristika opisana Shockleyjevom jednačbom:

$$I = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right]$$



Statički uvjeti rada (1)

- Podrazumijevaju rad u istosmjernim uvjetima kada je u mreži aktivan jedino istosmjerni izvor.
- Pod pretpostavkom da su poznate veličine U_G i R_G , uz zadanu karakteristiku diode potrebno je odrediti istosmjerni napon na diodi U_D i struju kroz diodu I_D .



- Za prikazani strujni krug vrijede sljedeće jednačbe:

$$U_G = I_D R_G + U_D$$

$$I_D = I_S \left(\exp \left(\frac{U_D}{U_T} \right) - 1 \right)$$



Statički uvjeti rada (2)

- Rješavanjem prethodne dvije jednačbe dobije se transcendentna jednačba:

$$U_G = I_S R_G \left(\exp \left(\frac{U_D}{U_T} \right) - 1 \right) + U_D$$

- Prethodna jednačba nije rješiva analitički pa se pristupa drugim načinima rješavanja (analize) kao što su:
 1. Grafo-analitički postupak
 2. Iteracijski postupak



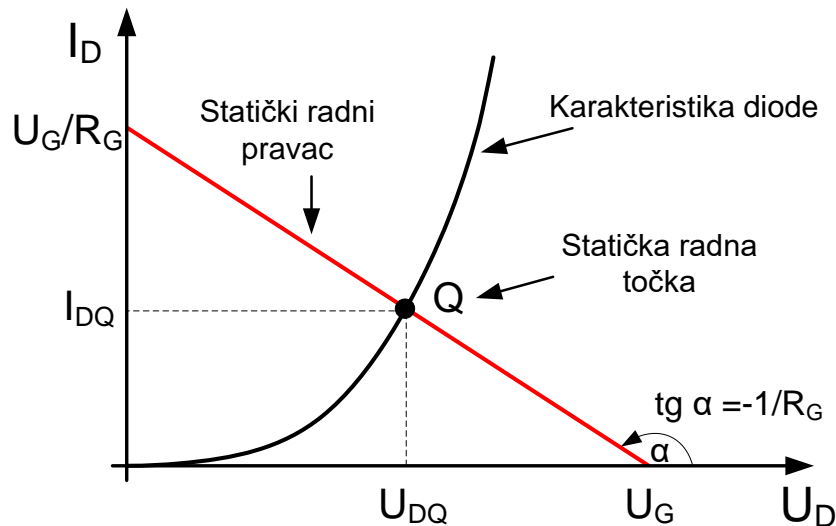
Statički uvjeti rada (3)

Osnovni postupci analize elektroničkih sklopova

1. Grafo-analitički postupak:

- U isti koordinatni sustav ucrtta se pravac dan jednađbom: $U_G = I_D R_G + U_D$ i karakteristika diode

- Određivanje statičkog radnog pravca: $U_G = I_D R_G + U_D \Rightarrow I_D = -\frac{1}{R_G} U_D + \frac{U_G}{R_G}$



$$y = kx + l$$

Kroz dvije točke:

- za $U_D = 0 \Rightarrow I_D = \frac{U_G}{R_G}$
- za $I_D = 0 \Rightarrow U_D = U_G$

- Presjecište statičkog radnog pravca i karakteristike diode predstavlja statičku radnu točku!!!!

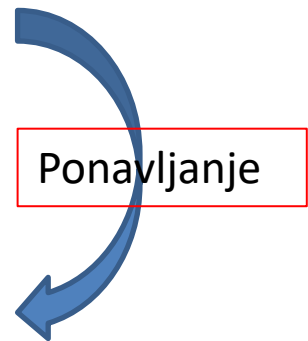


Statički uvjeti rada (4)

Osnovni postupci analize elektroničkih sklopova

2. Iteracijski postupak:

- 1. korak: napon na diodi se zanemari: $I_1 = \frac{U_G}{R}$
- 2. korak: $I_1 \rightarrow I = I_S \left(\exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) - 1 \right) \rightarrow U_{D1} = U_T \ln\left(\frac{I_1}{I_S} + 1\right)$
- 3. korak: $I_2 = \frac{U_G - U_{D1}}{R}$

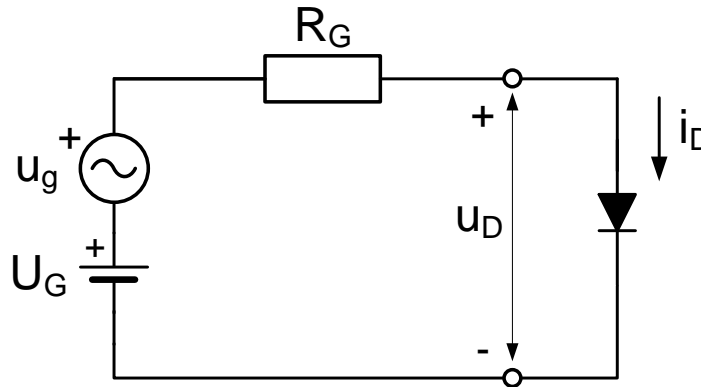


Kada je razlika između struja I_n i I_{n-1} dovoljno mala postupak se prekida!!!!!!



Režim malih signala (1)

- Što se događa kada na diodu osim istosmjernog napona priključimo i izmjenični sinusni napon elektromotorne sile u_g ?



u_d – izmjenični napon
 U_D – istosmjerni napon
 $u_D = u_d + U_D$ – ukupni napon
 i_d – izmjenična struja
 I_D – istosmjerna struja
 $i_D = i_d + I_D$ – ukupna struja

- Uz pretpostavku da je frekvencija izmjeničnog napona u_g dovoljno niska, ne dolazi do kapacitivnih efekata koji su posljedica promjene akumuliranog naboja manjinskih nosilaca na p i n strani diode te se ponašanje diode može opisati statičkom I - U karakteristikom.
- Za strujni krug na slici vrijede relacije:

$$u_g + U_G = i_D R_G + u_D$$

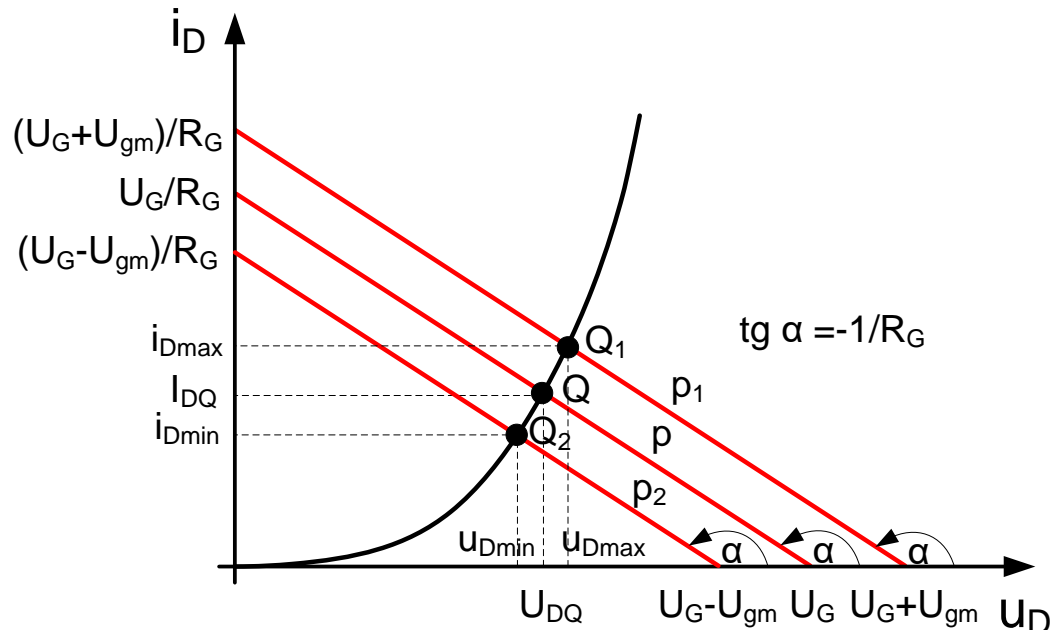
$$i_D = I_s \left(\exp \left(\frac{u_D}{U_T} \right) - 1 \right)$$



Režim malih signala (2)

- Ako je napon u_g sinusni napon oblika $u_g = U_{gm} \sin \omega t$ odsječci radnog pravca na koordinatnim osima mijenjat će se s vremenom u ritmu ulaznog napona.
- Nagib radnog pravca ostaje isti jer ga određuje samo otpor R_G ($\tan \alpha = -1/R_G$).
- U trenutku:

- $U_g = 0 \rightarrow$ pravac p
 - Statička radna točka Q
- $U_g = U_{gm} \rightarrow$ pravac p_1
 - Statička radna točka Q_1
- $U_g = -U_{gm} \rightarrow$ pravac p_2
 - Statička radna točka Q_2

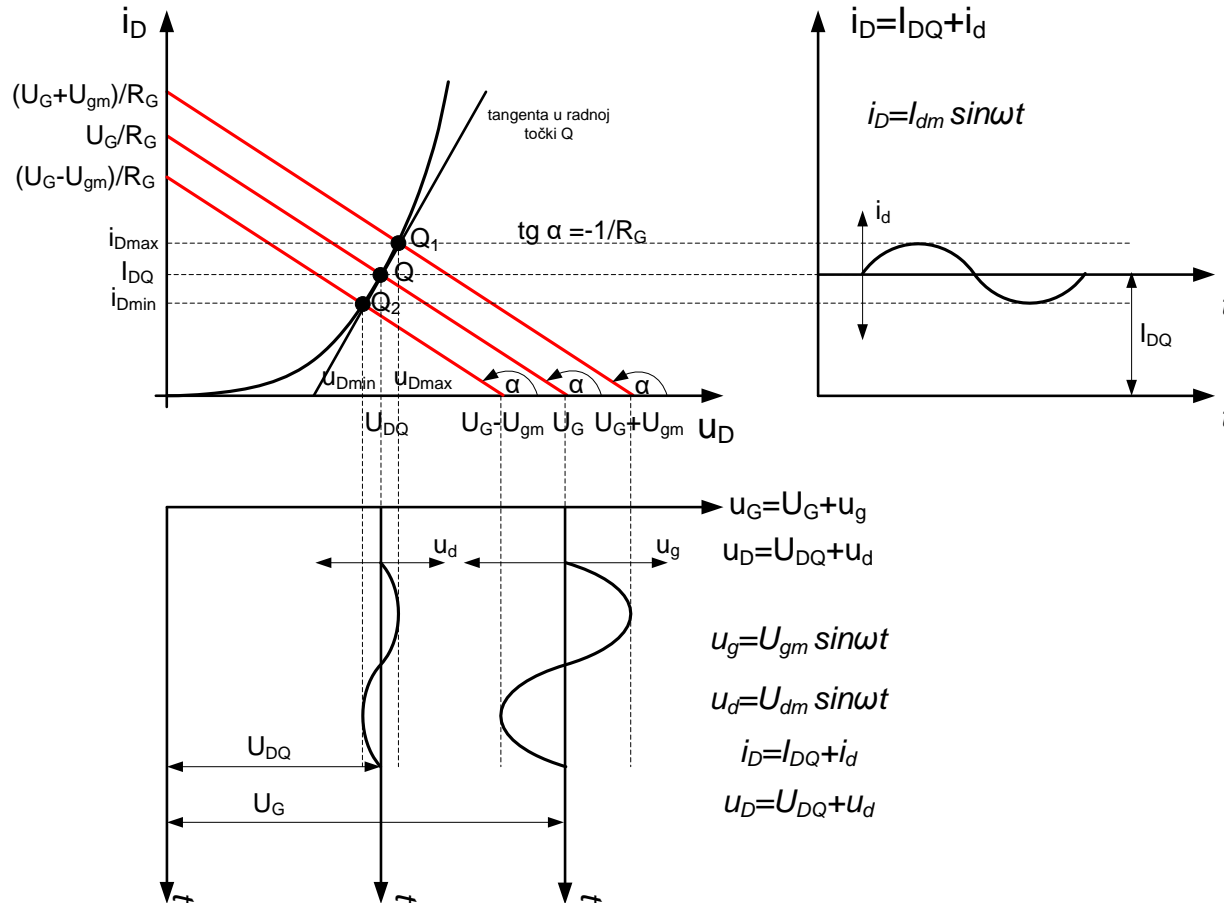


- Ako je amplituda napona u_g dovoljno mala tada će i pomak statičke radne točke Q biti malen pa se karakteristika diode može aproksimirati pravcem odnosno tangentom na karakteristiku u radnoj točki $Q \rightarrow$ **linearizacija!!!**



Režim malih signala (3)

- Grafički postupak određivanja valnih oblika napona na diodi.



- Sinusni napon u_g frekvencije ω generira sinusoidnu struju i_d i sinusoidni napon u_d **iste frekvencije**.



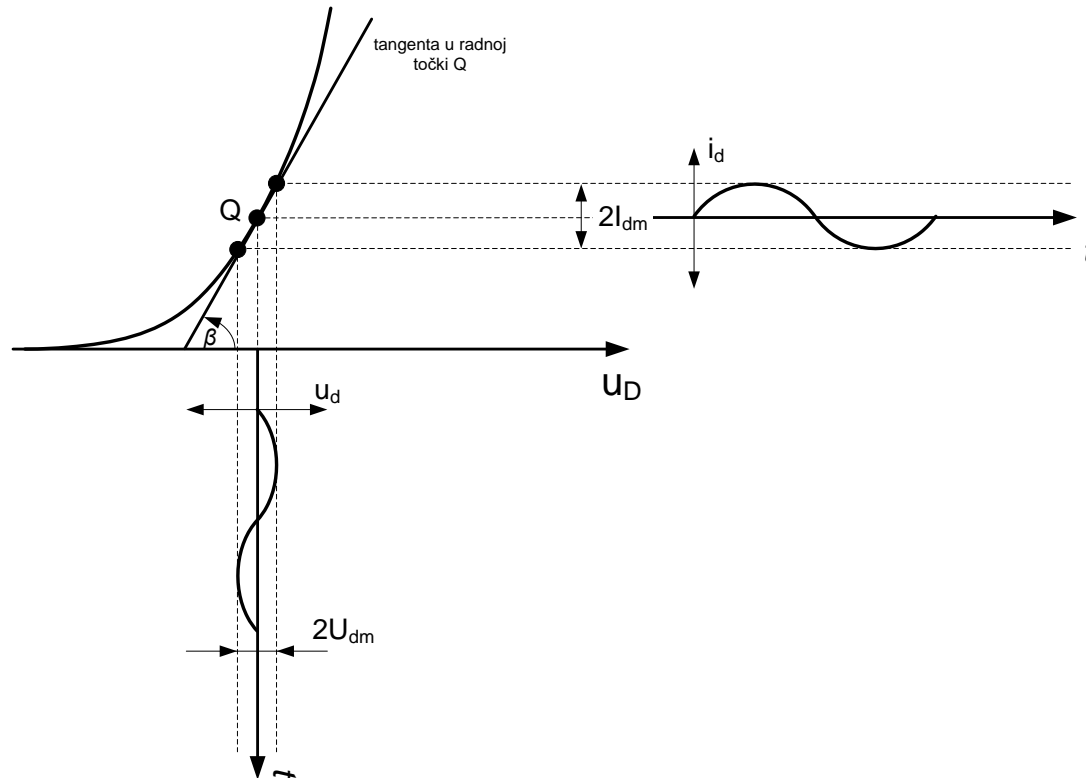
Režim malih signala (4)

- Totalne trenutne vrijednosti mogu se pisati kao:

$$u_D = U_{DQ} + u_d = U_{DQ} + U_{dm} \sin \omega t$$

$$i_D = I_{DQ} + i_d = I_{DQ} + I_{dm} \sin \omega t$$

- gdje su U_{dm} i I_{dm} amplitude izmjeničnog napona i struje.



Režim malih signala (5)

- Kut β pod kojim tangenta u radnoj točki siječe apscisu određen je relacijom:

$$\operatorname{ctg} \beta = \frac{2U_{dm}}{2I_{dm}} = \frac{U_{dm}}{I_{dm}} = \frac{u_d}{i_d} \bigg|_Q = \frac{du_d}{di_d} = r_d$$

- Koristeći dinamički otpor diode prethodni izrazi mogu se pisati kao:

$$u_D = U_{DQ} + U_{dm} \sin \omega t$$

$$i_D = I_{DQ} + I_{dm} \sin \omega t = I_{DQ} + \frac{U_{dm}}{r_d} \sin \omega t = I_{DQ} + \frac{u_d}{r_d}$$

- Pitanje: u kojim uvjetima će se moći zanemariti nelinearnost karakteristike diode u okolini statičke radne točke, odnosno kada će sinusoidni napon na diodi generirati sinusoidnu struju kroz diodu?

- Polazište za odgovor – Shockleyjeva jednadžba: $i_D = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{u_D}{mU_T}\right) - 1 \right]$

gdje je m tzv. faktor injekcije (1 za nisku injekciju, 2 za visoku injekciju)



Režim malih signala (6)

- Ako se na diodu dovede ukupni napon u_D tada je struja i_D određena izrazom:

$$i_D = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{DQ} + u_d}{mU_T}\right) - 1 \right] = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{DQ}}{mU_T}\right) \exp\left(\frac{u_d}{mU_T}\right) - 1 \right]$$

- Uz pretpostavku da je ispunjen uvjet:

$$\frac{u_d}{mU_T} \ll 1$$

- Rastavljanjem u Taylorov red i uzimanjem prva dva člana može se pisati:

$$\exp\left(\frac{u_d}{mU_T}\right) \approx 1 + \frac{u_d}{mU_T}$$

$$i_D = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{DQ}}{mU_T}\right) \left(1 + \frac{u_d}{mU_T} \right) - 1 \right]$$



Režim malih signala (7)

- Kombinacijom prethodna dva izraza dobije se:

$$i_D \approx I_{DQ} + \frac{u_d}{\frac{mU_T}{I_S + I_{DQ}}}$$

- Deriviranjem struje po naponu dobije se dinamička vodljivost diode u statičkoj radnoj točki:

$$g_d = \frac{1}{r_d} = \left. \frac{di_d}{du_d} \right|_Q = I_S \left(\exp \left(\frac{u_d}{mU_T} \right) \right) \left. \frac{1}{mU_T} \right|_Q = \left. \frac{i_D + I_S}{mU_T} \right|_Q = \frac{I_{DQ} + I_S}{mU_T}$$

iz čega slijedi:

$$i_D = I_{DQ} + \frac{u_d}{r_d}$$

- Dinamički otpor diode ovisi o istosmjernoj struji I_{DQ} u statičkoj radnoj točki, odnosno položaju statičke radne točke.
- S porastom struje I_{DQ} dinamički otpor r_d opada te kod zadanog napona u_d struja i_d raste.



Režim malih signala (8)

- Izrazi „mali signal” i „linearni režim” odnose se samo na izmjenične komponente napona i struje jer između tih komponenata postoji linearni odnos određen relacijom:

$$i_d = \frac{u_d}{r_d}$$

- Rad diode u režimu malih signala može se pretpostaviti kada je zadovoljen uvjet:

$$U_{dm} \ll mU_T$$

- Budući da je kod silicijske diode $1 \leq m \leq 2$ i da je na sobnoj temperaturi $U_T = 25\text{mV}$ rad diode u linearnom režimu rada može se numerički izraziti:

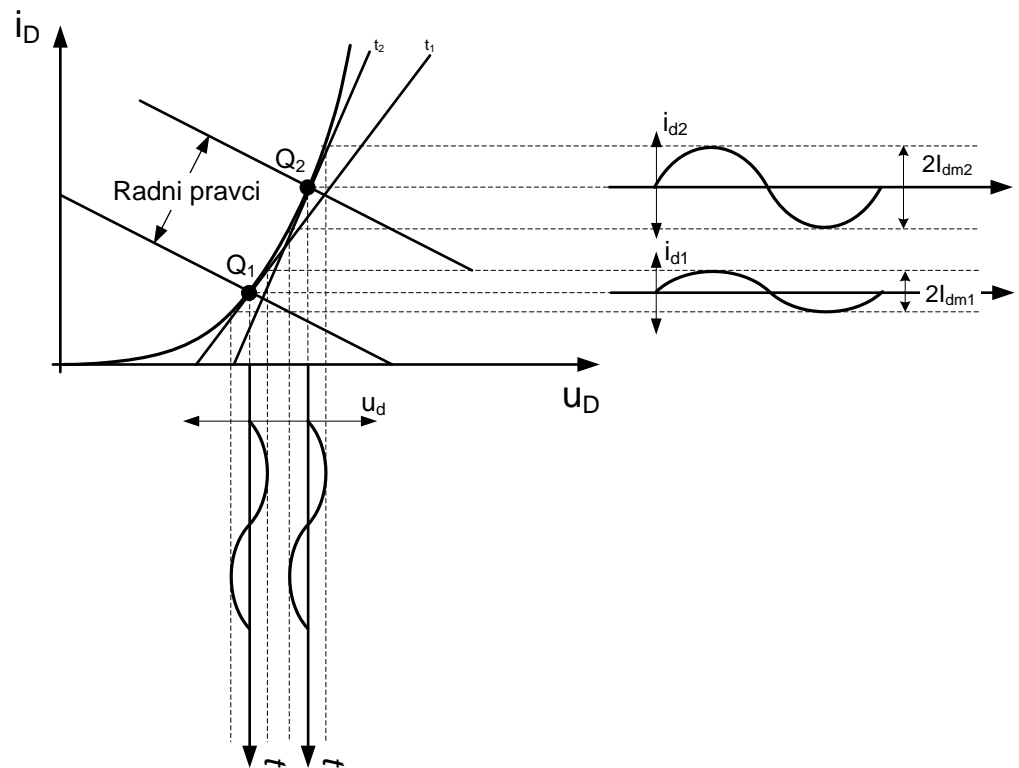
$$U_{dm} \ll (25 - 50)\text{mV}$$

- Opisani režim rada zove se režim malih signala ili linearni režim rada!!!**



Režim malih signala (9)

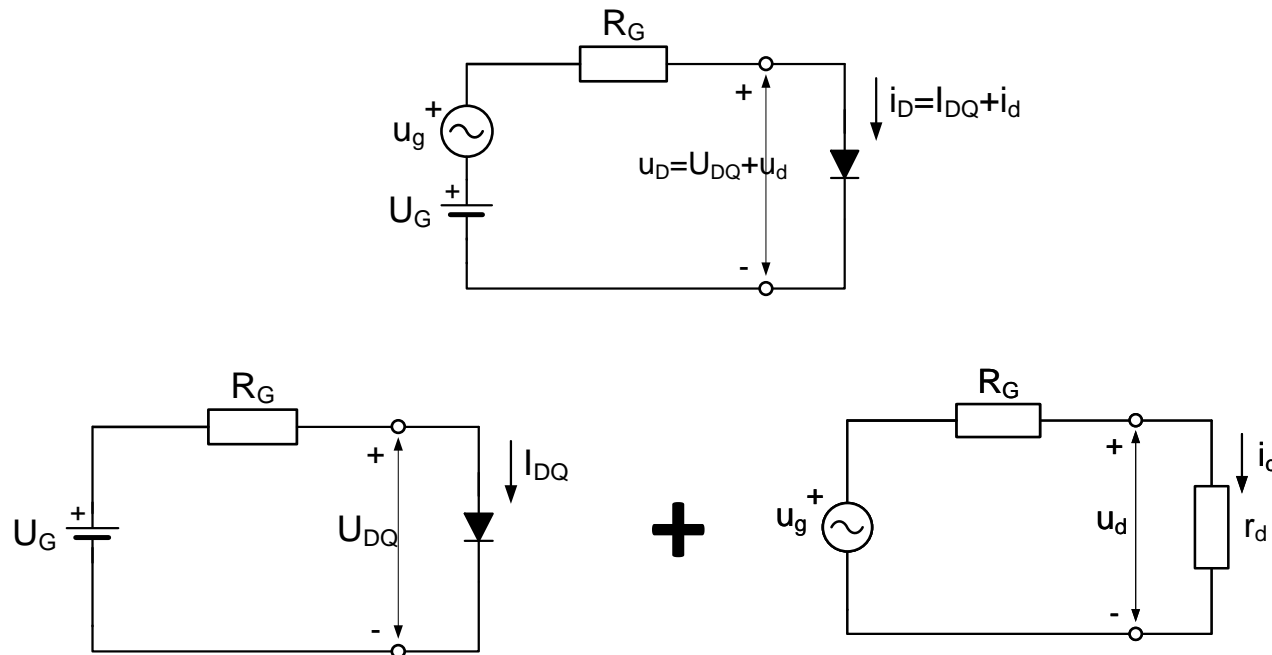
- Dinamički otpor diode ovisi o položaju statičke radne točke.
- Uz konstantan napon na diodi struja kroz diodu se razlikuje ovisno o položaju statičke radne točke.
- **Zaključak: statički uvjeti određuju ponašanje diode u dinamičkim uvjetima!!**



Režim malih signala (10)

- Statički i dinamički uvjeti rada (signali) su međusobno povezani i prisutni u istom vremenskom trenutku t .
- Zbog jednostavnije analize primjenjuje se metoda superpozicije (aktivan samo jedan izvor u mreži):

Ukupno ponašanje sklopa = Statički uvjeti rada + Dinamički uvjeti rada



Režim velikih signala (1)

- Ako nije ispunjen uvjet koji definira rad diode u režimu malih signala:

$$U_{dm} \ll mU_T$$

napon i struja na diodi bit će dani izrazima:

$$u_D = U_{DQ} + u_d \quad i_D = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{DQ}}{mU_T}\right) \exp\left(\frac{u_d}{mU_T}\right) - 1 \right]$$

- Razvojem drugog eksponencijalnog člana u Maclaurinov red dobije se:

$$i_D = I_{DQ} + (I_{DQ} + I_S) (a_1 u_d + a_2 u_d^2 + a_3 u_d^3 + a_4 u_d^4 + \dots)$$

- gdje je I_{DQ} struja diode u statičkoj radnoj točki prije dolaska izmjeničnog signala određena relacijom:

$$I_{DQ} = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{U_{DQ}}{mU_T}\right) - 1 \right]$$



Režim velikih signala (2)

- $a_1 \dots a_4$ su koeficijenti određeni relacijama:

$$a_1 = \frac{1}{mU_T}, a_2 = \frac{1}{2m^2U_T^2} = \frac{1}{2!}a_1^2, a_3 = \frac{1}{6m^3U_T^3} = \frac{1}{3!}a_1^3, a_4 = \frac{1}{24m^4U_T^4} = \frac{1}{4!}a_1^4,$$

- Ako se u izraz dobiven razvojem u Maclaurinov red uvrsti:

$$u_d = U_{dm} \sin \omega t$$

- Dobije se izraz:

$$i_D = I_{DQ} + (I_{DQ} + I_S) \left(a_1 U_{dm} \sin \omega t + a_2 U_{dm}^2 \sin^2 \omega t + a_3 U_{dm}^3 \sin^3 \omega t + a_4 U_{dm}^4 \sin^4 \omega t + \dots \right)$$

- Korištenjem trigonometrijskih izraza za potencije sinusnih funkcija:

$$\text{za } n \text{ neparan} \quad \sin^n \theta = \frac{2}{2^n} \sum_{k=0}^{\frac{n-1}{2}} (-1)^{\left(\frac{n-1}{2}-k\right)} \binom{n}{k} \sin((n-2k)\theta)$$



Režim velikih signala (3)

za n paran $\sin^n \theta = \frac{1}{2^n} \binom{n}{\frac{n}{2}} + \frac{2}{2^n} \sum_{k=0}^{\frac{n}{2}-1} (-1)^{\left(\frac{n}{2}-k\right)} \binom{n}{k} \cos((n-2k)\theta)$

- Dobije se:

$$\begin{aligned} i_D = & I_{DQ} + (I_{DQ} + I_S) \left(\frac{1}{2} a_2 U_{dm}^2 + \frac{3}{8} a_4 U_{dm}^4 + \dots \right) + \\ & (I_{DQ} + I_S) \left(a_1 U_{dm} + \frac{3}{4} a_3 U_{dm}^3 + \dots \right) \sin \omega t + \\ & (I_{DQ} + I_S) \left(-\frac{1}{2} a_2 U_{dm}^2 - \frac{1}{2} a_4 U_{dm}^4 \dots \right) \cos 2\omega t + \\ & (I_{DQ} + I_S) \left(\frac{1}{3} a_3 U_{dm}^3 - \dots \right) \sin 3\omega t + \\ & (I_{DQ} + I_S) \left(\frac{1}{8} a_4 U_{dm}^4 + \dots \right) \cos 2\omega t + \end{aligned}$$



Režim velikih signala (4)

- Uvođenjem oznaka

$$\Delta I_{DQ} = I_{DQ} + (I_{DQ} + I_S) \left(\frac{1}{2} a_2 U_{dm}^2 + \frac{3}{8} a_4 U_{dm}^4 + \dots \right),$$

$$I_{dm1} = (I_{DQ} + I_S) \left(a_1 U_{dm} + \frac{3}{4} a_3 U_{dm}^3 + \dots \right),$$

$$I_{dm2} = (I_{DQ} + I_S) \left(-\frac{1}{2} a_2 U_{dm}^2 - \frac{1}{2} a_4 U_{dm}^4 \dots \right),$$

$$I_{dm3} = (I_{DQ} + I_S) \left(\frac{1}{3} a_3 U_{dm}^3 - \dots \right),$$

$$I_{dm4} = (I_{DQ} + I_S) \left(\frac{1}{8} a_4 U_{dm}^4 + \dots \right).$$

- Dobije se izraz:

$$i_D = I_{DQ} + \Delta I_{DQ} + I_{dm1} \sin \omega t - I_{dm2} \cos 2\omega t - I_{dm3} \sin 3\omega t + I_{dm4} \sin 4\omega t + \dots$$



Režim velikih signala (5)

- Prethodni izraz vrijedi neovisno o iznosu amplitude U_{dm} , što je amplituda veća veće su i amplitude struja I_{dm1} , I_{dm2} , I_{dm3} , I_{dm4} te dolazi do nelinearnih efekata:

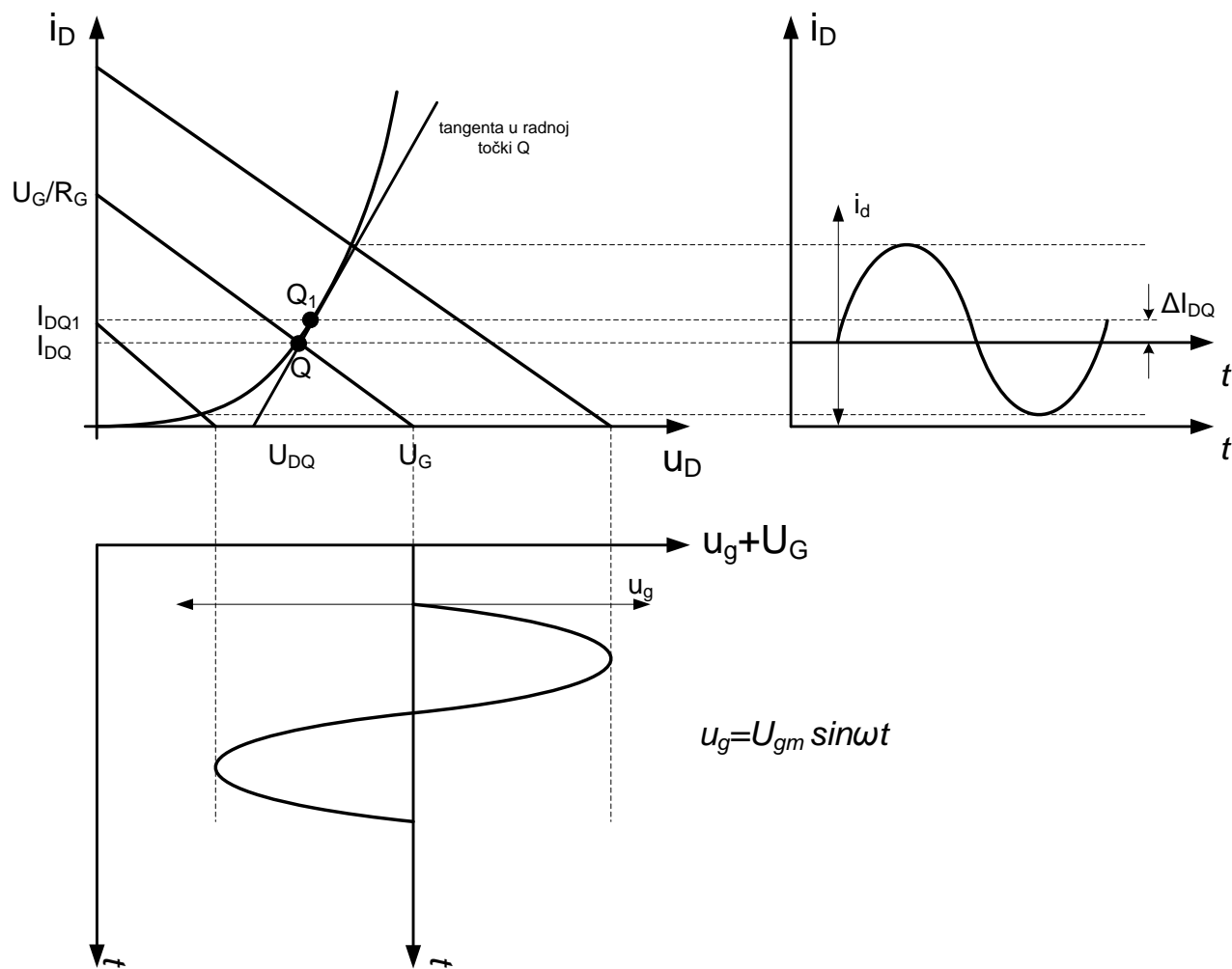
1. **Napon $u_d = U_{dm} \sin \omega t$ doveden na diodu u statičkoj radnoj točki (U_{DQ}, I_{DQ}) izaziva promjenu istosmjernje struje tako da ona raste te dolazi do pomaka radne točke:**

$$I_{DQ1} = I_{DQ} + \Delta I_{DQ}$$

- Radna točka u dinamičkim uvjetima razlikuje se od radne točke u statičkim uvjetima!!!!
- Prirast ΔI_{DQ} ovisi o parnim potencijama u redu potencija kojim je opisana karakteristika diode.
- Pomak radne točke ovisi o amplitudi U_{dm} , što je veća amplituda veći je i pomak radne točke ΔI_{DQ} .
- **Tada dioda radi u nelinearnim režimu odnosno režimu velikih signala.**



Režim velikih signala (6)



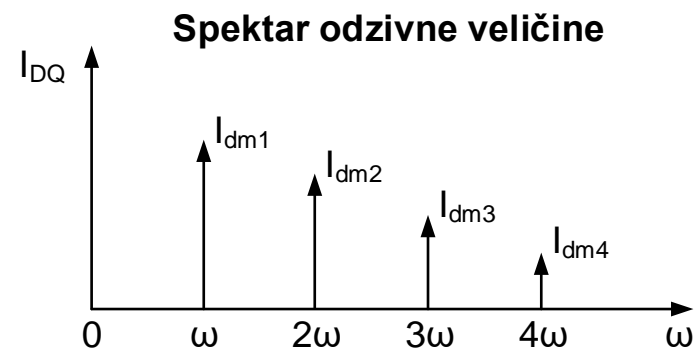
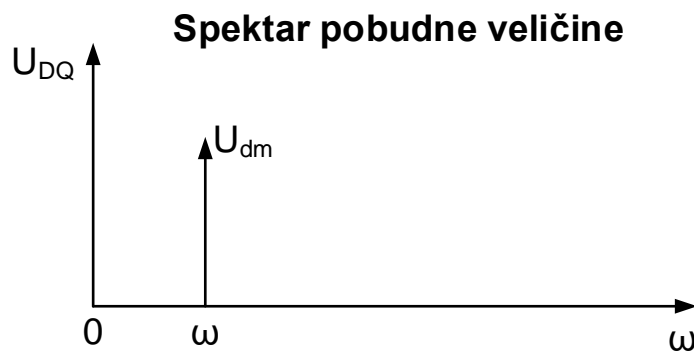
Režim velikih signala (7)

2. Struja i_D sadrži izmjenične komponente kružne frekvencije ω , 2ω , 3ω , 4ω ...
- Pored komponente osnovne frekvencije ω koja pripada signalu u_d javljaju se i komponente kojima su frekvencije cjelobrojni višekratnici osnovne frekvencije poznatiji kao viši harmonici:
 - I_{dm1} i ω su amplituda i kružna frekvencija osnovnog harmonika,
 - $I_{dm2}, I_{dm3}, I_{dm4}, 2\omega, 3\omega, 4\omega$ su amplitude i kružne frekvencije viših harmonika.
 - Većoj amplitudi U_{dm} odgovara i veći prirast struje ΔI_{DQ} .
 - **Pri radu diode u režimu velikih signala dolazi do pomaka radne točke te se u izrazu za struju pojavljuju komponente s frekvencijama koje nisu sadržane u priključenom naponskom signalu pa u režimu velikih signala nisu ispunjeni uvjeti linearnog rada te ne vrijedi princip superpozicije u analizi sklopova.**



Nelinearna izobličenja (1)

- U režimu velikih signala sinusoidni napon izaziva nesinusoidnu struju što je posljedica nelinearnosti i - u karakteristike diode pa se smatra da je struja izobličena.
- **Ovakva izobličenja nazivaju se nelinearna izobličenja, a budući se javljaju i viši harmonici radi se o nelinearnom harmoničkom izobličenju.**
- Iako su razmatrana samo na primjeru diode ova izobličenja se pojavljuju u svim odzivnim veličinama elektroničkih sklopova uz sinusnu pobudu.
- Za kvantitativnu ocjenu stupnja izobličenja polazište je izraz za struju i_D koji se može prikazati pomoću spektra pobudne i odzivne veličine.



Nelinearna izobličenja (2)

- Za kvantitativnu ocjenu stupnja nelinearnih harmoničkih izobličenja definiraju se sljedeći faktori izobličenja:

1. Dioni faktor izobličenja n -te harmoničke komponente

- Definira se kao omjer amplitude n -te harmoničke komponente i amplitude osnovne komponente:

$$D_n = \frac{I_{dmn}}{I_{dm1}} \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

2. Faktor izobličenja (Total harmonic distortion - *THD*)

- Definira se kao drugi korijen sume kvadrata dionih faktora izobličenja:

$$D = \sqrt{D_2^2 + D_3^2 + D_4^2 + \dots}$$



Nelinearna izobličenja (3)

- Ako se uz pretpostavku dovoljne točnosti izvrši aproksimacija karakteristike diode s prva četiri člana reda za slučaj kada vrijede sljedeći podaci:
 - $m=1$,
 - $U_T=25\text{mV}$ (sobna temperatura)
 - $U_{dm}=50\text{mV}$
- Dobiju se sljedeće vrijednosti faktora izobličenja:

$$D_2 = \frac{I_{dm2}}{I_{dm1}} = \frac{4}{9} = 44,5\%$$

$$D_3 = \frac{I_{dm3}}{I_{dm1}} = \frac{1}{9} = 11,1\%$$

$$D_4 = \frac{I_{dm4}}{I_{dm1}} = \frac{1}{36} = 2,78\%$$

$$D = \sqrt{D_2^2 + D_3^2 + D_4^2} = 46\%$$



Nelinearna izobličenja (4)

- Što se događa ukoliko se u statičku radnu točku diode dovede signal sastavljen od dvije komponente različitih frekvencija ω_1 i ω_2 i različitih amplituda U_{dm1} i U_{dm2} ?

$$u_d = U_{dm1} \sin \omega_1 t + U_{dm2} \sin \omega_2 t$$

- Uz aproksimaciju i - u karakteristike diode s prva dva člana struja i_D se može izraziti kao:

$$\begin{aligned} i_D &= I_{DQ} + (I_{DQ} + I_S)(a_1 u_d + a_2 u_d^2) = \\ &= I_{DQ} + (I_{DQ} + I_S) \left[a_1 (U_{dm1} \sin \omega_1 t + U_{dm2} \sin \omega_2 t) + a_2 (U_{dm1} \sin \omega_1 t + U_{dm2} \sin \omega_2 t)^2 \right] \end{aligned}$$

- Korištenjem adicijskih teorema i izraza dvostrukog kuta prethodni izraz glasi:



Nelinearna izobličenja (5)

$$\begin{aligned} i_D = & I_{DQ} + \frac{a_2}{2} (I_{DQ} + I_S) (U_{dm1}^2 + U_{dm2}^2) + a_1 (I_{DQ} + I_S) U_{dm1} \sin \omega_1 t + \\ & + a_1 (I_{DQ} + I_S) U_{dm2} \sin \omega_2 t + \frac{a_2}{2} (I_{DQ} + I_S) U_{dm1}^2 \cos 2\omega_1 t - \\ & - \frac{a_2}{2} (I_{DQ} + I_S) U_{dm1}^2 \cos 2\omega_2 t + a_2 (I_{DQ} + I_S) U_{dm1} U_{dm2} \cos(\omega_1 - \omega_2) t - \\ & - a_2 (I_{DQ} + I_S) U_{dm1} U_{dm2} \cos(\omega_1 + \omega_2) t \end{aligned}$$

- Svi nelinearni efekti opisani kod nelinearnih harmoničkih izobličenja javljaju se i u ovom slučaju (prirast istosmjerne komponente, pojava viših harmonika uz osnovnu komponentu)
- Osim navedenih, uočava se novi efekt: pojava komponenata s kružnim frekvencijama $\omega_1 - \omega_2$ i $\omega_1 + \omega_2$, dakle s frekvencijama jednakima razlici i zbroju osnovnih frekvencija.



Nelinearna izobličenja (6)

- Ako se karakteristika diode aproksimira s više od dva člana reda, tada se u izrazu za struju i_D uz prethodno prisutne komponente javljaju i komponente s kružnim frekvencijama $3\omega_1$, $3\omega_2$, $2\omega_1 + \omega_2$, $2\omega_1 - \omega_2$, $2\omega_2 + \omega_1$, $2\omega_2 - \omega_1$.
- Općenito, može se očekivati pojava komponenata kojima su frekvencije jednake zbrojevima i razlikama ne samo osnovnih frekvencija nego i zbrojevima i razlikama različitih kombinacija njihovih viših harmonika frekvencija.
- **Izobličenja izazvana pojavom komponenata s frekvencijama $\omega_1 + \omega_2$, $\omega_1 - \omega_2$, $2\omega_1 + \omega_2$, $2\omega_1 - \omega_2$, $2\omega_2 + \omega_1$, $2\omega_2 - \omega_1$ nazivaju se nelinearna neharmonička izobličenja.**



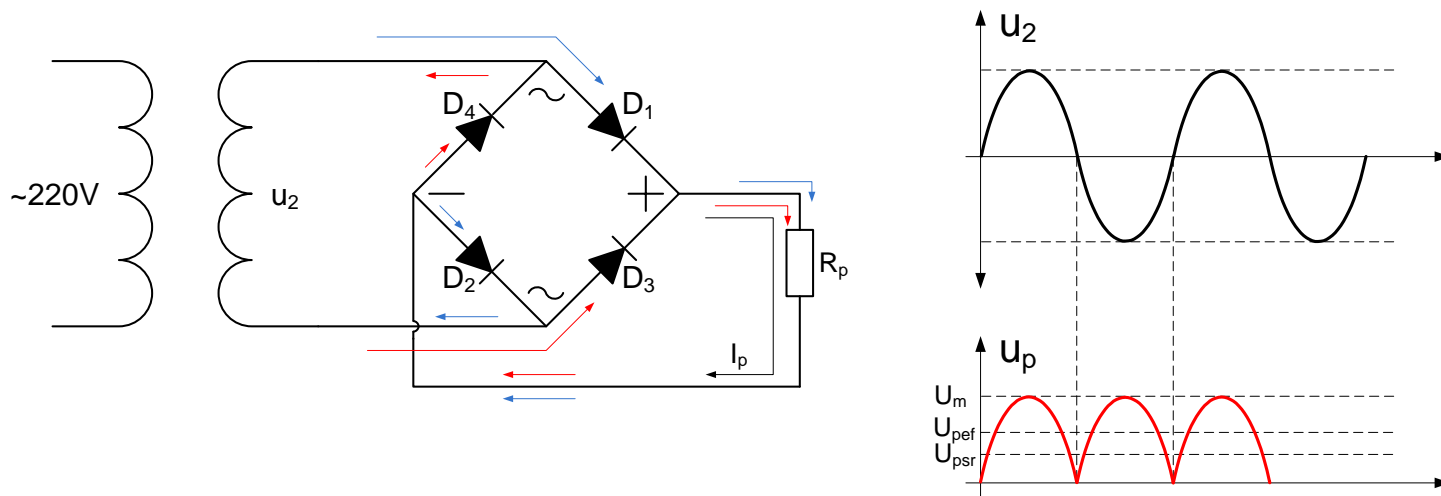
Nelinearna izobličenja (7)

- **Primjene nelinearnih izobličenja:**
- U većini se elektroničkih primjena prijenos i obrada signala želi izvršiti bez promjene valnog oblika npr. linearna elektronička pojačala (uz propisani dozvoljeni stupanj nelinearnih izobličenja).
- Zbog nelinearnosti elektroničkih komponenata i konačnog iznosa ulaznog signala nelinearna izobličenja nije moguće izbjeći.
- U određenom broju primjena nelinearna izobličenja se ne izbjegavaju nego se namjerno izazivaju za obavljanje određenih elektroničkih funkcija kao što su:
 - ispravljanje izmjeničnih signala,
 - multipliciranje frekvencija,
 - miješanje ili transponiranje frekvencija,
 - moduliranje signala (amplitudna modulacija).



Nelinearna izobličenja (8)

- Ispravljanje izmjeničnih signala:
- Osnovna karakteristika nelinearnih izobličenja je prirast istosmjerne komponente ΔI_{DQ} kako je prethodno pokazano.
- Ako je istosmjerna struja u statičkoj radnoj točki prije dolaska signala jednaka nuli, dolaskom izmjeničnog signala pojavit će se (zbog nelinearnosti karakteristike diode) istosmjerna komponenta ΔI_{DQ} .
- Upravo ova činjenica je temelj koji se koristi za pretvorbu izmjeničnih veličina u istosmjerne u uređajima koji se nazivaju **ispravljači**.



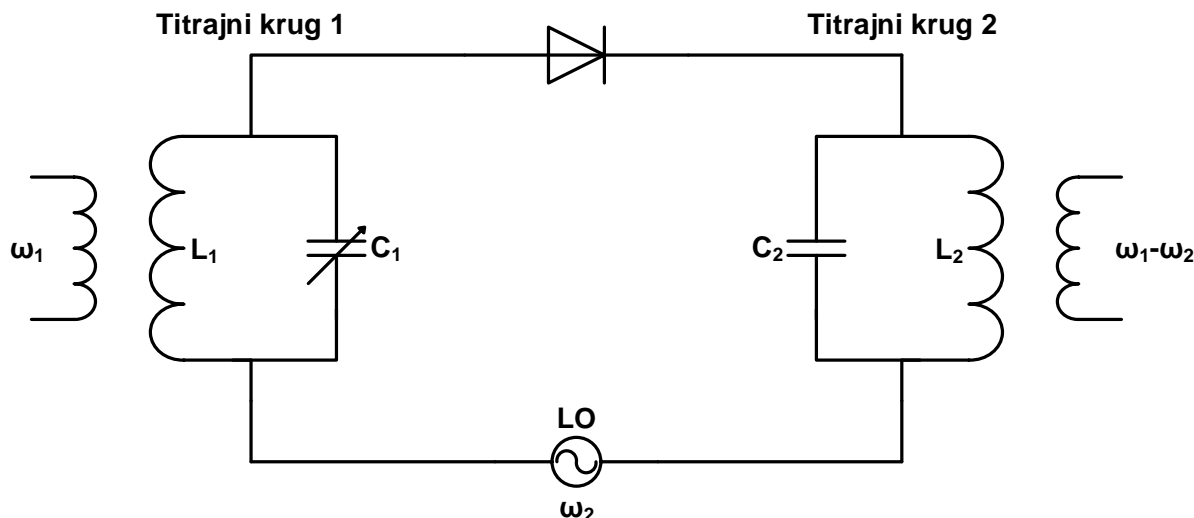
Nelinearna izobličenja (9)

- **Multipliciranje frekvencija:**
- Pojava viših harmonika nastalih dovođenjem izmjeničnog signala na nelinearnu komponentu otvara mogućnost multipliciranja određene frekvencije.
- Ako se izobličeni signal s pripadajućim višim harmonicima propusti kroz selektivni filter podešen na željenu harmoničku frekvenciju na izlazu filtera pojavit će se ta frekvencija dok će ostale frekvencije biti prigušene.
- **Miješanje ili transponiranje frekvencija:**
- Dovođenjem dvaju sinusnih signala različitih frekvencija na nelinearni elektronički element dolazi do pojave nelinearnih neharmoničkih izobličenja uz pojavu neharmoničke komponente $\omega_1 - \omega_2$, (uz pojavu i ostalih frekvencija $\omega_1 + \omega_2$, $2\omega_1 + \omega_2$, $2\omega_1 - \omega_2$, $2\omega_2 + \omega_1$, $2\omega_2 - \omega_1$)



Nelinearna izobličenja (10)

- **Miješanje ili transponiranje frekvencija:**
- Na ulaz sklopa za miješanje frekvencija dovodi se sinusni signal kružne frekvencije ω_1 preko titrajnog kruga 1, a iz lokalnog oscilatora se istodobno dovodi sinusni signal kružne frekvencije ω_2 .
- Podešavanjem titrajnog kruga 2 na frekvenciju $\omega_1 - \omega_2$ na izlazu diodnog sklopa za miješanje pojavit će se sinusni signal frekvencije $\omega_1 - \omega_2$.
- Ako se frekvencija signala iz lokalnog oscilatora ω_2 mijenja u ovisnosti o frekvenciji ω_1 tada je frekvencija izlaznog signala $\omega_1 - \omega_2$ konstantna.



Nelinearna izobličenja (11)

- **Moduliranje signala:**
- Nelinearna neharmonička izobličenja primjenjuju se u postupku amplitudne modulacije koji podrazumijeva utiskivanje signala informacije (niska frekvencija) u amplitudu signala nosioca (visoka frekvencija).
- Korištenjem diodnog sklopa za miješanje uz odabir frekvencija $\omega_1 \gg \omega_2$ te podešavanjem titrajnog kruga 2 na frekvenciju ω_1 dobije se izlazni signal napon proporcionalan članovima s frekvencijama ω_1 , $\omega_1 - \omega_2$, $\omega_1 + \omega_2$.

$$u_{izl} \cong a_1 I_S U_{dm1} \sin \omega_1 t + a_2 I_S U_{dm1} U_{dm2} [\cos(\omega_1 - \omega_2)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t]$$

- Primjenom trigonometrijske relacije:

$$\cos(\omega_1 - \omega_2)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t = 2 \sin \omega_1 t \cdot \sin \omega_2 t$$



Nelinearna izobličenja (12)

- Moduliranje signala:
- Izlazni signal može se prikazati u obliku:

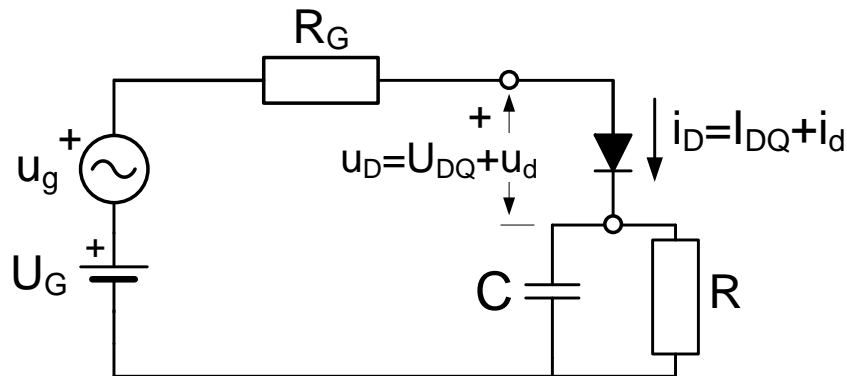
$$u_{izl} \cong a_1 I_S U_{dm1} \left[1 + 2 \frac{a_2}{a_1} U_{dm2} \sin \omega_2 t \right] \sin \omega_1 t$$

- Posljednji izraz opisuje signal visoke frekvencije ω_1 kojem se amplituda mijenja u ritmu niske frekvencije ω_2 .
- Signal niske frekvencije je modulirao amplitudu signala visoke frekvencije pa se ova pojava naziva **amplitudna modulacija**.



Analiza elektroničkih sklopova (1)

- Uz nelinearne elektroničke komponente u elektroničkim sklopovima se koriste i pasivne disipativne te reaktivne komponente.



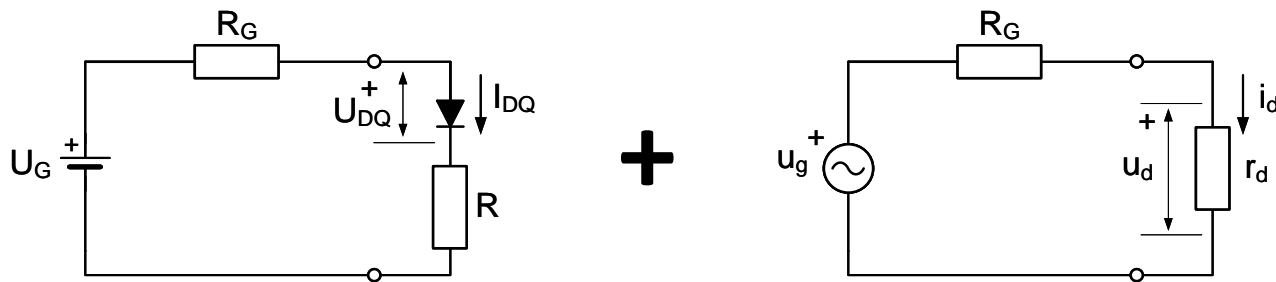
- Pitanje: kako se ponašaju reaktivne komponente (kondenzator) u strujnom krugu?**
- Reaktancija kondenzatora definirana je izrazom:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$



Analiza elektroničkih sklopova (2)

- U statičkim (istosmjernim) uvjetima $f=0$ Hz reaktancija kondenzatora $X_C=\infty$ i kondenzator predstavlja prekid (otvoreni krug).
- U dinamičkim (izmjeničim) uvjetima $f>0$ Hz uz dovoljno veliki iznos kapaciteta kondenzatora C reaktancija kondenzatora $X_C=0$ i kondenzator predstavlja kratki spoj.
- Korištenjem metode superpozicije prethodni elektronički sklop se može rastaviti:

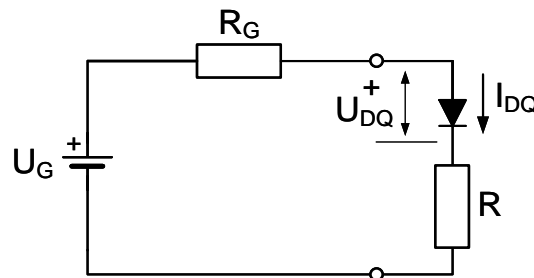


- Elektronički sklop je različit pa je potrebno napraviti analizu rada posebno za statičke i posebno za dinamičke uvjete rada.

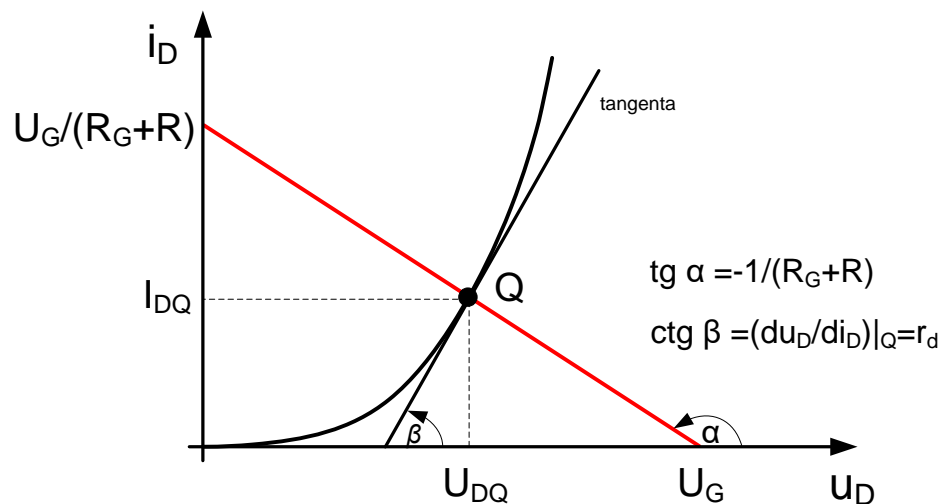


Analiza elektroničkih sklopova (3)

- Statički uvjeti rada:

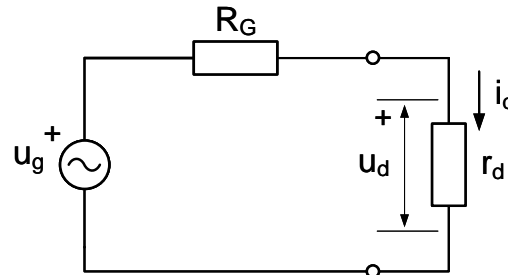


- Vrijedi jednačina radnog pravca: $U_G = I_D(R_G + R) + U_D$



Analiza elektroničkih sklopova (4)

- Dinamički uvjeti rada:



$$i_d = i_D - I_{DQ}$$
$$u_d = u_D - U_{DQ}$$

- Jednadžba strujnog kruga glasi: $u_g = i_d R_G + u_d$
- Uvrštavanjem izmjeničnih veličina prethodni se izraz može zapisati kao:

$$u_g = (i_D - I_{DQ}) R_G + (u_D + U_{DQ})$$

- Odnosno, ako se izrazi struja dobije se jednadžba dinamičkog radnog pravca:

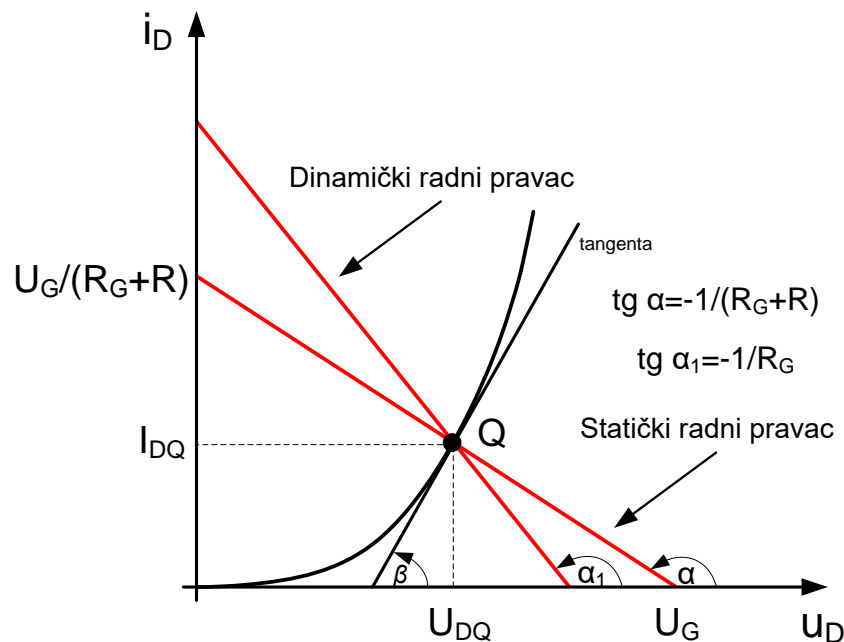
$$i_D - I_{DQ} = -\frac{1}{R_G} (u_D + U_{DQ}) + \frac{1}{R_G} u_g$$

gdje je nagib definiran s: $tg \alpha_1 = -\frac{1}{R_G}$



Analiza elektroničkih sklopova (5)

- Dinamički uvjeti rada:
- Ako je $u_g=0$ tada vrijedi $i_D=I_{DQ}$ i $U_D=U_{DQ}$, odnosno dioda radi u statičkim uvjetima rada što znači da dinamički radni pravac također mora prolaziti kroz statičku radnu točku.
- Struja i napon mogu se analitički izraziti na sljedeći način:



$$i_d = \frac{u_g}{R_G + r_d} = \frac{U_{gm}}{R_G + r_d} \sin \omega t$$

$$u_d = i_d r_d = U_{gm} \frac{r_d}{R_G + r_d} \sin \omega t$$



Analiza elektroničkih sklopova (6)

- Dinamički uvjeti rada:
- Konstrukcija valnih oblika struje i napona:

