21. Seminar Radijske Komunikacije

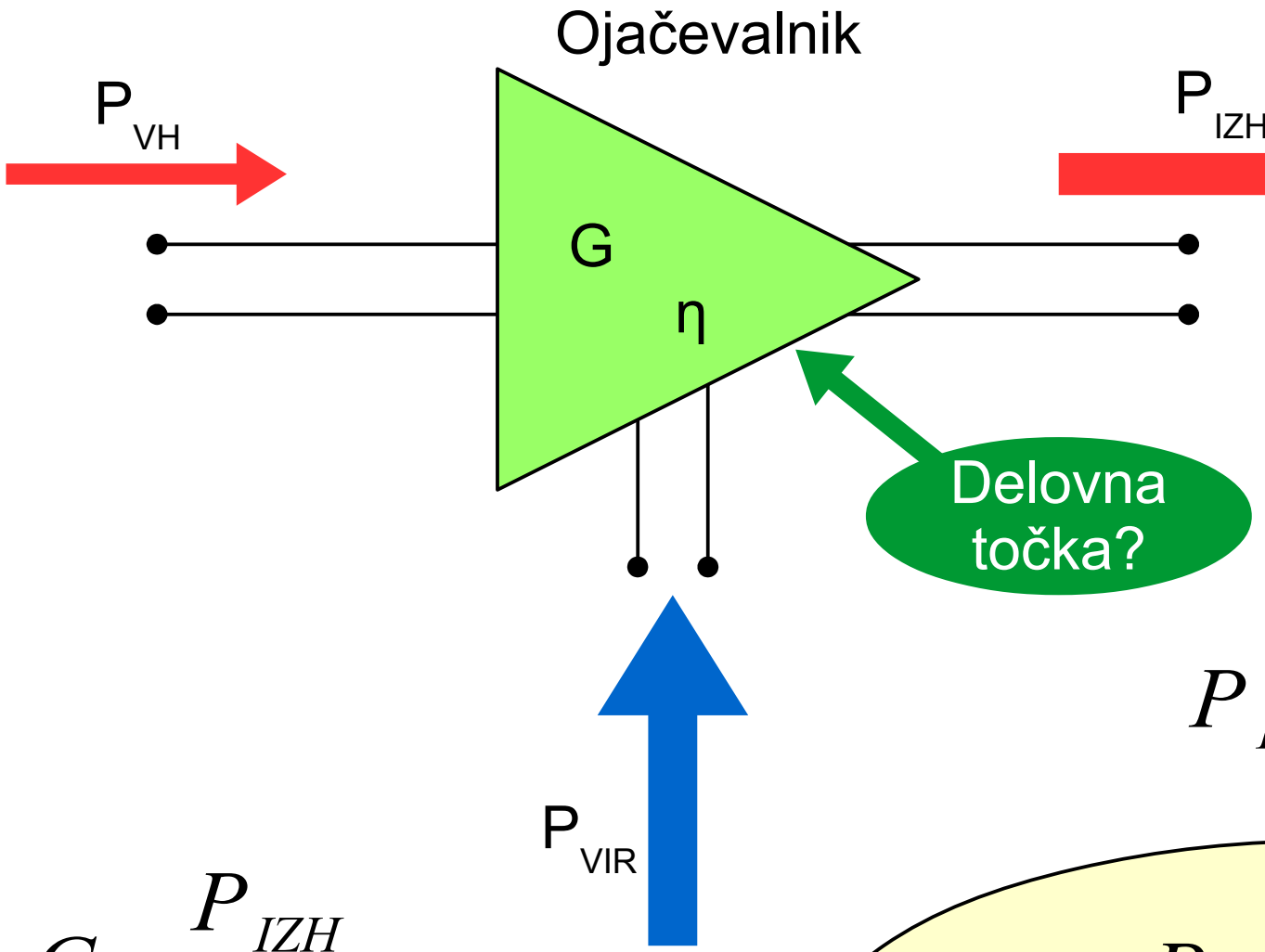
Intermodulacijsko popačenje

Matjaž Vidmar

LSO, FE, Ljubljana, 24-26.9.2014

Seznam prosojnic predavanja: Intermodulacijsko popačenje

1 - Električni izkoristek ojačevalnika
2 - Nasičenje različnih ojačevalnikov
3 - Popačenje v časovnem in v frekvenčnem prostoru
4 - Opis nelinearnosti ojačevalnika s polinomom
5 - Učinek nelinearnosti na spekter popačenja
6 - Spekter popačenja pri sinusnem krmiljenju
7 - Spekter popačenja pri dvotonskem krmiljenju
8 - Intermodulacijsko popačenje ozkopasovnega ojačevalnika
9 - Spekter intermodulacijskega popačenja
10 - Moč intermodulacijskih produktov tretjega reda
11 - Izračun moči IMD3 pri malih signalih (izven nasičenja)
12 - Moč presečne točke IP3 bipolarnega tranzistorja
13 - Moč presečne točke IP3 poljskega tranzistorja
14 - Moči intermodulacijskih produktov višjih redov
15 - Izračun moči IMD višjih redov izven nasičenja
16 - Zgled: načrtovanje izhodne stopnje analognega TV oddajnika
17 - Spekter IMD3 pri tritonskem krmiljenju
18 - Izračun ojačanja in popačenja verige ojačevalnikov
19 - Napačno načrtovanje verige ojačevalnikov
20 - Presečna točka na vhodu ojačevalnika (sprejemnika)
21 - Popačenje sprejemne verige
22 - Zgled: popačenje v radiodifuznem sprejemniku
23 - Nasičenje in IMD balančnega diodnega mešalnika
24 - Dinamično področje sprejemnika
25 - Meritev intermodulacijskega popačenja ojačevalnika
26 - Pasivna intermodulacija (PIM)
27 - Intermodulacijsko popačenje v svetlobnem vlaknu
28 - Razredi delovanja in izkoristki ojačevalnikov
29 - Popačenje idealnega ojačevalnika v razredu B
30 - Popačenje in izkoristek resničnega ojačevalnika v razredu B
31 - Uporaba ojačevalnika v razredu C
32 - Znižanje IMD s predpopačenjem
33 - Ojačevalnik „feedforward“
34 - Ojačevalnik „Doherty“
35 - AM/PM pretvorba
36 - Povprečna in vršna moč večtonskega signala
37 - Relativna vektorska napaka (EVM)

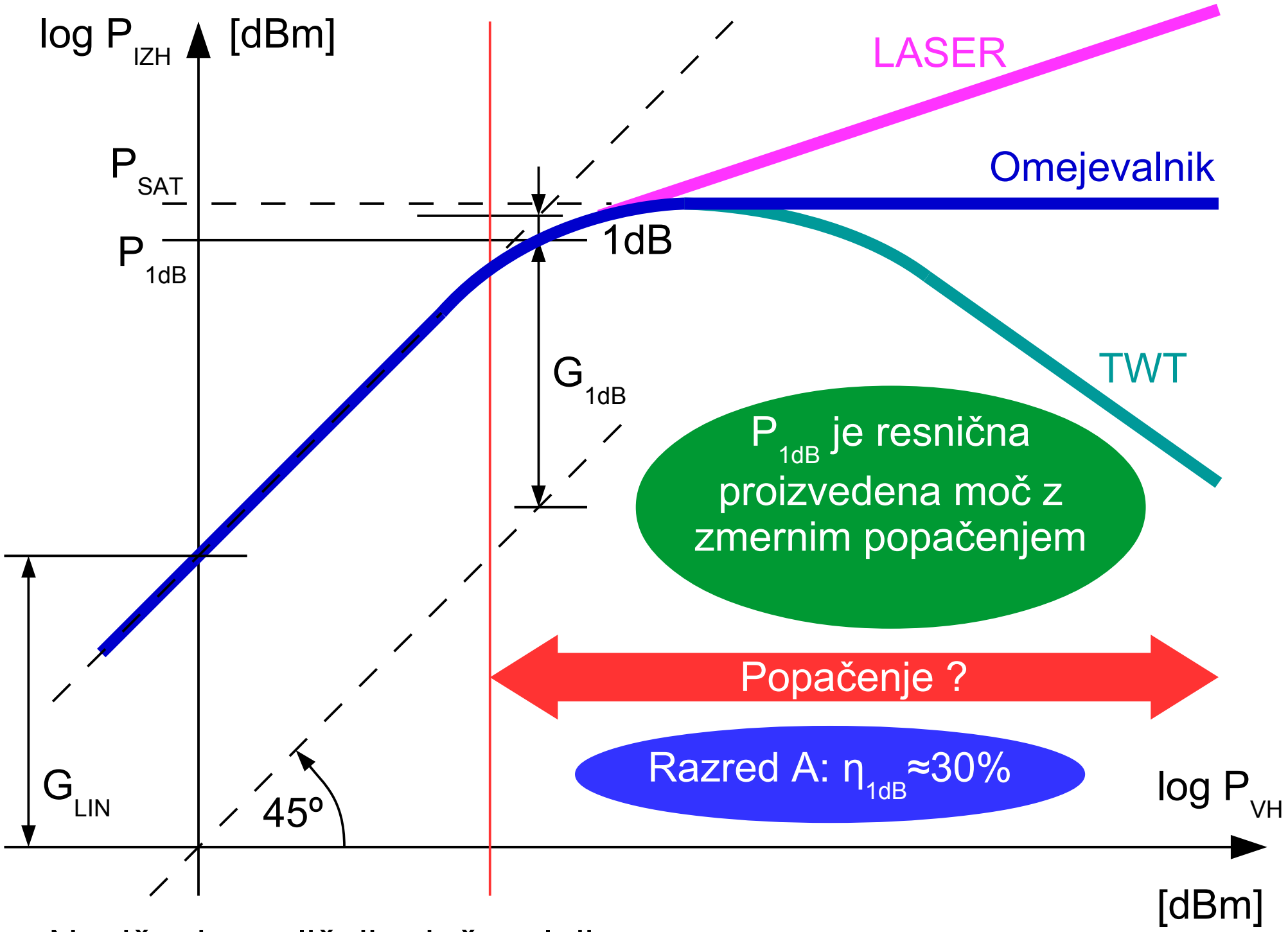


$$P_{IZH} \leq P_{VIR} + P_{VH}$$

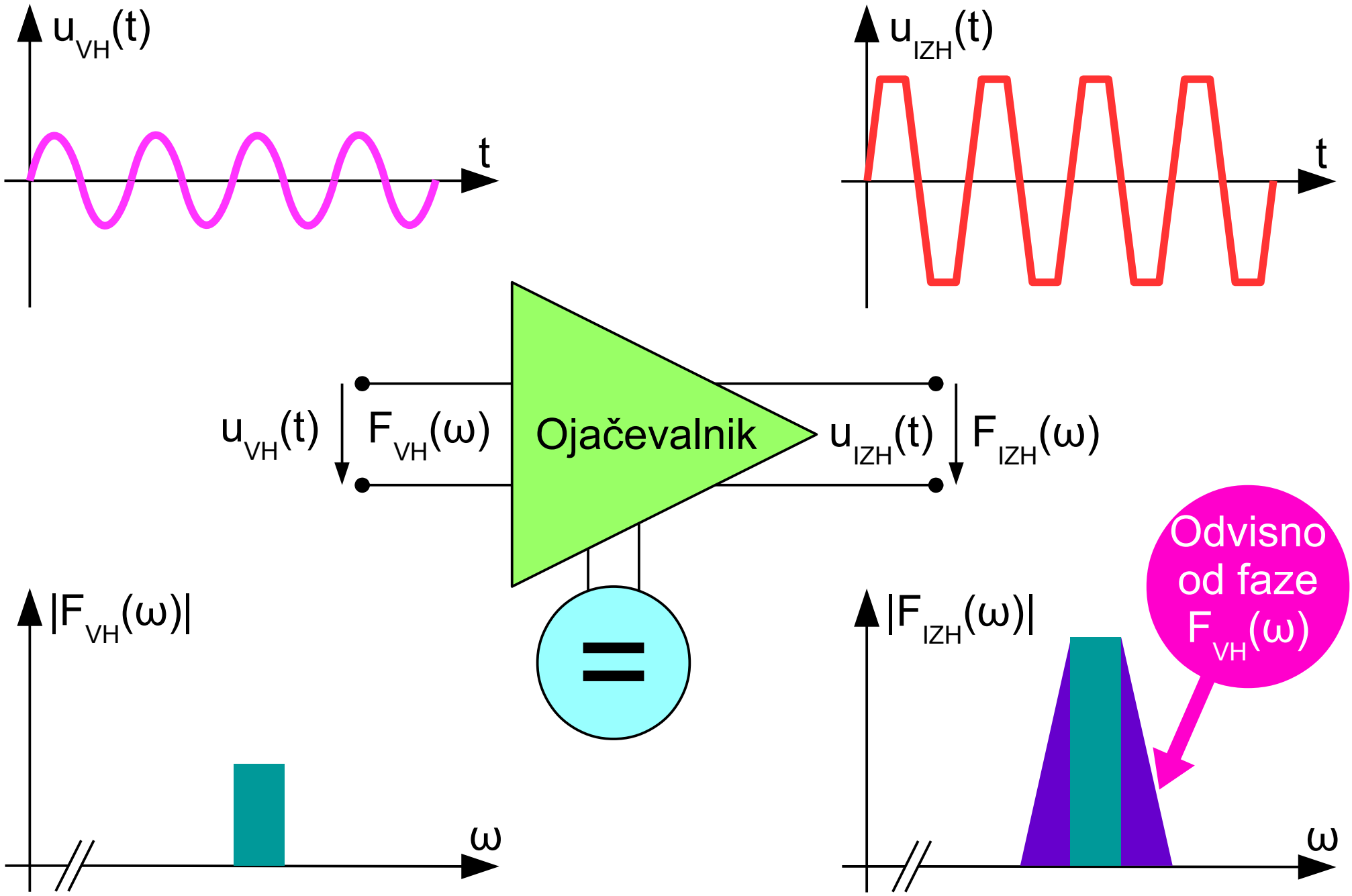
$$G = \frac{P_{IZH}}{P_{VH}}$$

$$\eta = \frac{P_{IZH}}{P_{VIR} + P_{VH}} \approx \frac{P_{IZH}}{P_{VIR}} \leq 1$$

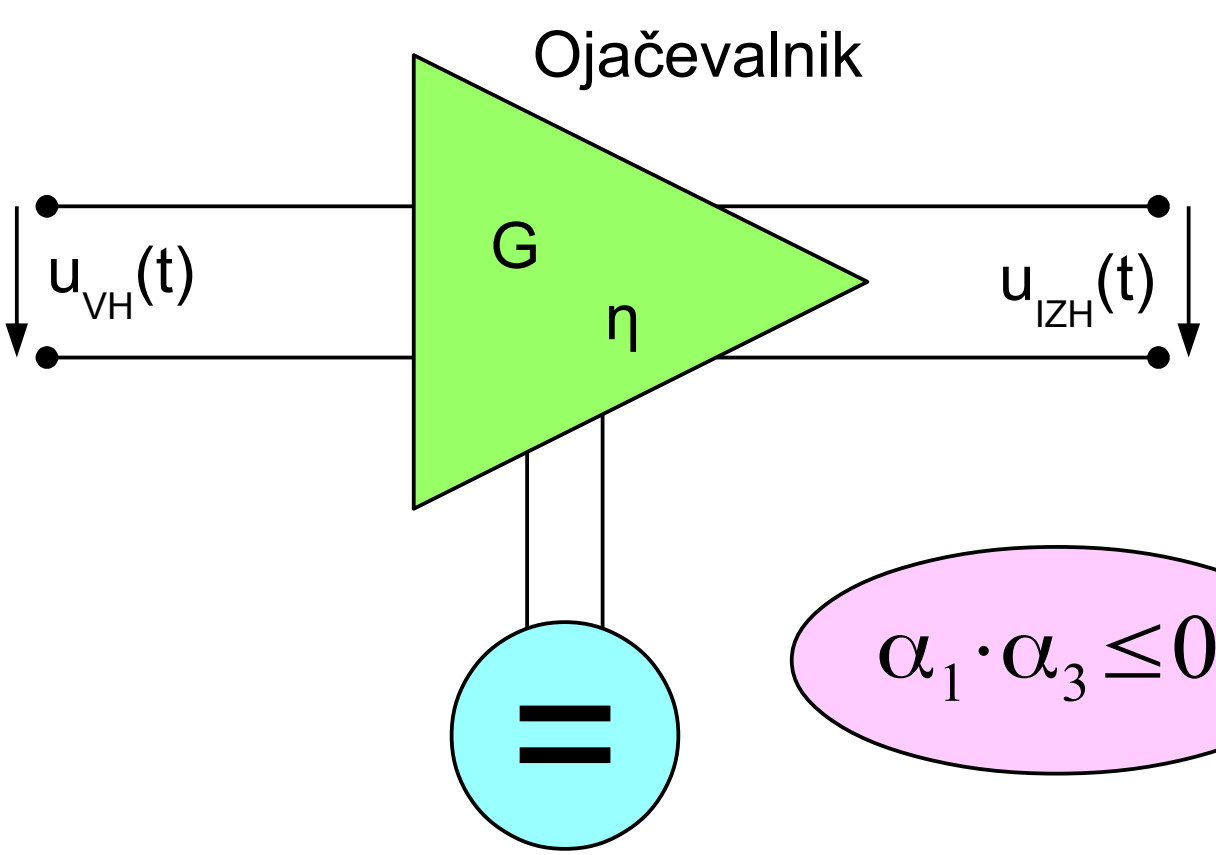
1 - Električni izkoristek ojačevalnika

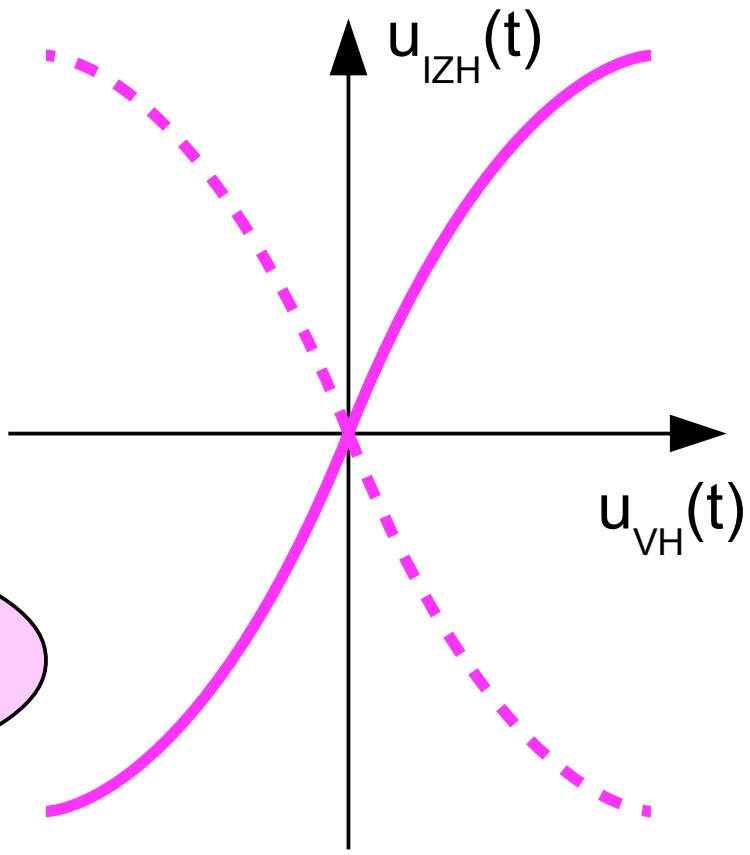


2 – Nasičenje različnih ojačevalnikov



3 – Popačenje v časovnem in v frekvenčnem prostoru





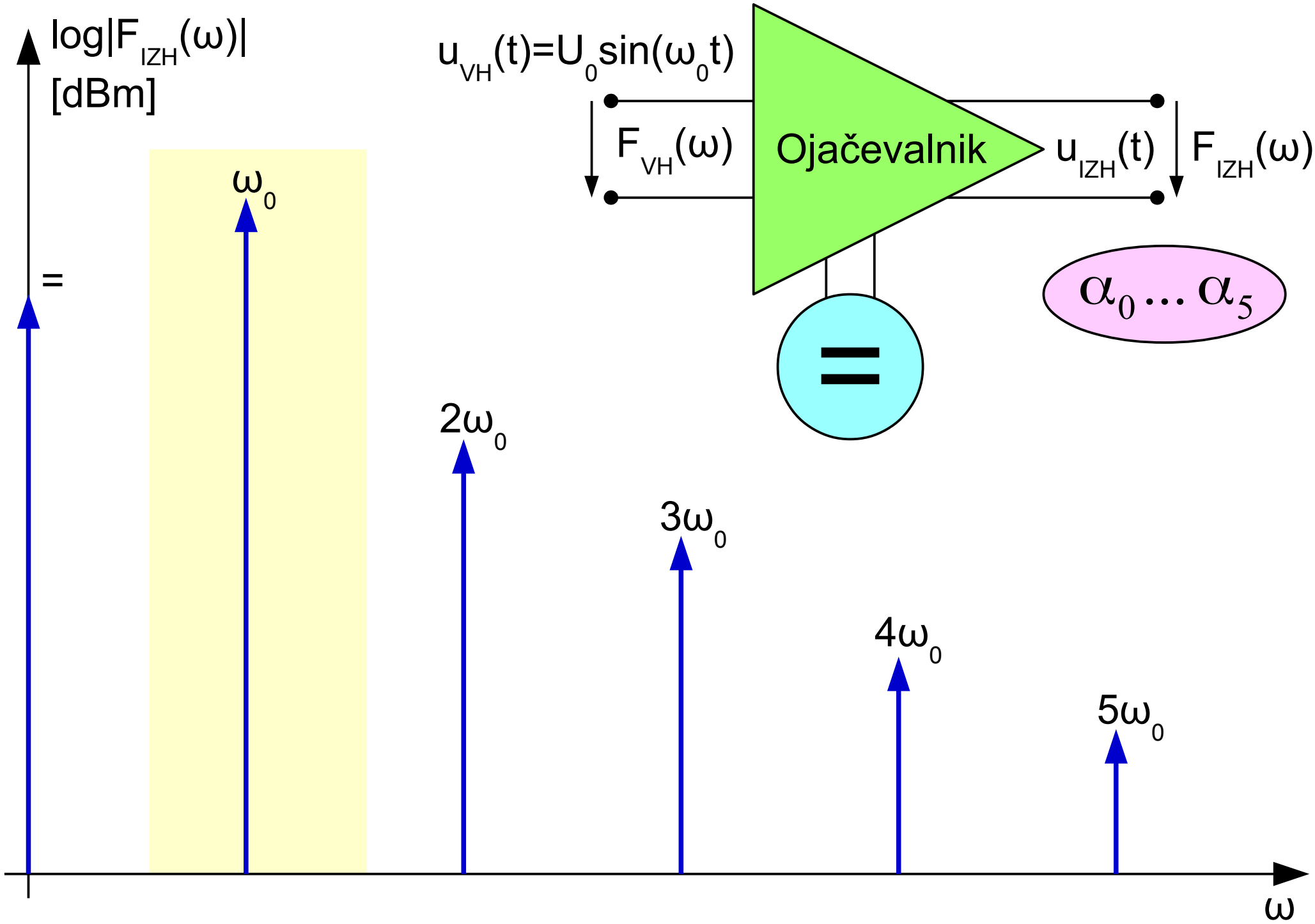
$$\alpha_1 \cdot \alpha_3 \leq 0$$

$$u_{IZH} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot u_{VH} + \alpha_2 \cdot u_{VH}^2 + \alpha_3 \cdot u_{VH}^3 + \alpha_4 \cdot u_{VH}^4 + \ldots$$

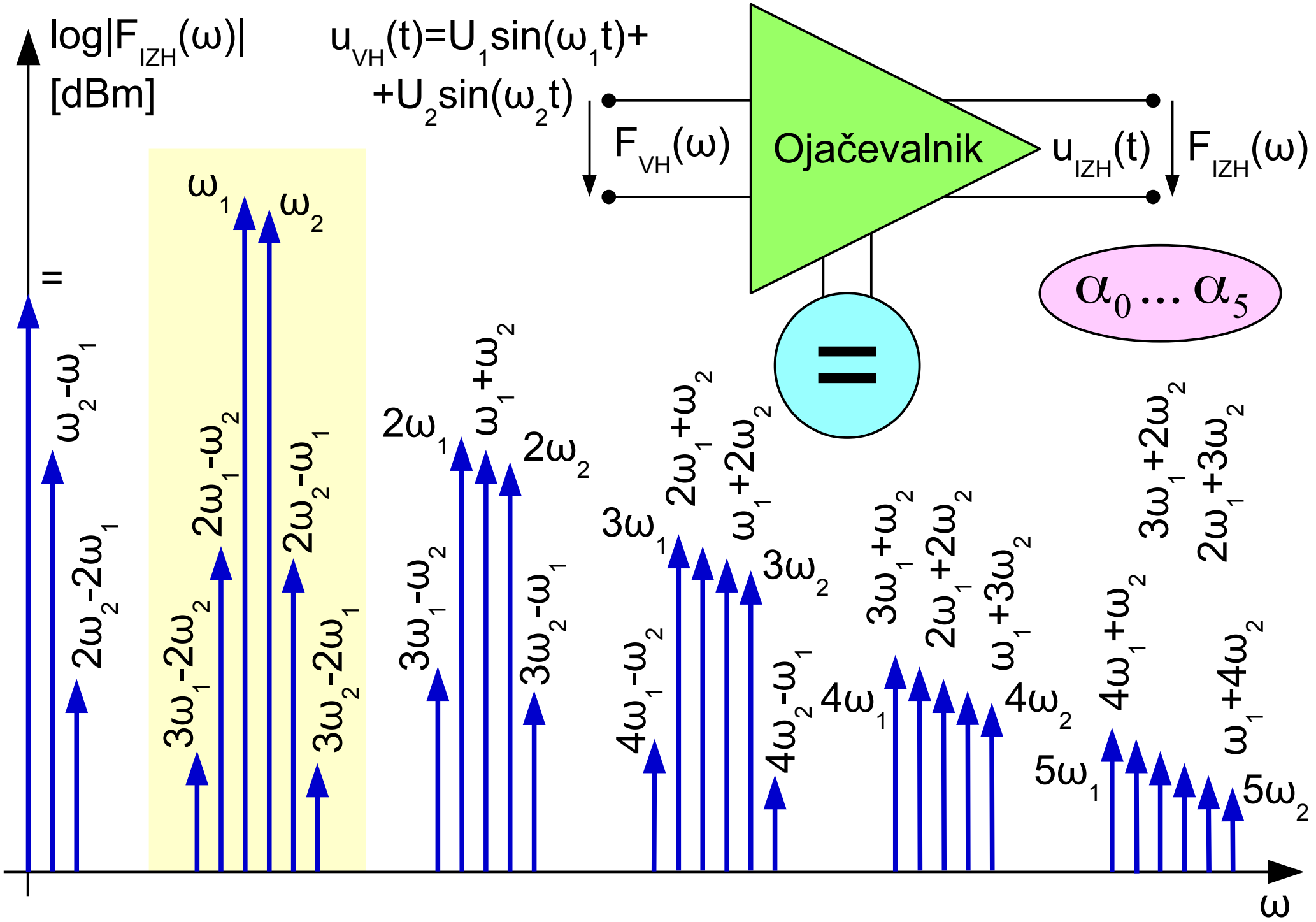
4 – Opis nelinearnosti ojačevalnika s polinomom

Člen	$u_{VH}(t)=U_0\sin(\omega_0 t)$	$u_{VH}(t)=U_1\sin(\omega_1 t)+U_2\sin(\omega_2 t)$
α_0	=	=(delovna točka)
α_1	ω_0	ω_1,ω_2(linearno ojačanje)
α_2	=(usmernik),$2\omega_0$	=,$2\omega_1$,$2\omega_2$,$\omega_1+\omega_2$,$\omega_2-\omega_1$(mešanje)
α_3	ω_0(nasičenje),$3\omega_0$	$\omega_1,\omega_2,3\omega_1,3\omega_2,2\omega_1+\omega_2,\mathbf{2\omega_1-\omega_2},\omega_1+2\omega_2,\mathbf{2\omega_2-\omega_1}$
α_4	=,$2\omega_0$,$4\omega_0$	=,$2\omega_1$,$2\omega_2$,$\omega_1+\omega_2$,$\omega_2-\omega_1$,$4\omega_1$,$4\omega_2$,$3\omega_1+\omega_2$, $2\omega_1+2\omega_2$,$\omega_1+3\omega_2$,$3\omega_1-\omega_2$,$2\omega_2-2\omega_1$,$3\omega_2-\omega_1$
α_5	$\omega_0,3\omega_0,5\omega_0$	$\omega_1,\omega_2,3\omega_1,3\omega_2,5\omega_1,5\omega_2$...$\mathbf{3\omega_1-2\omega_2}$...$\mathbf{3\omega_2-2\omega_1}$...
α_6	=,$2\omega_0$,$4\omega_0$,$6\omega_0$	=...$6\omega_1$,$6\omega_2$,$5\omega_1+\omega_2$,$5\omega_1-\omega_2$,$4\omega_1+2\omega_2$,$4\omega_1-2\omega_2$...
α_7	$\omega_0,3\omega_0,5\omega_0,7\omega_0$	ω_1,ω_2...$7\omega_1$,$7\omega_2$...$\mathbf{4\omega_1-3\omega_2}$...$\mathbf{4\omega_2-3\omega_1}$...

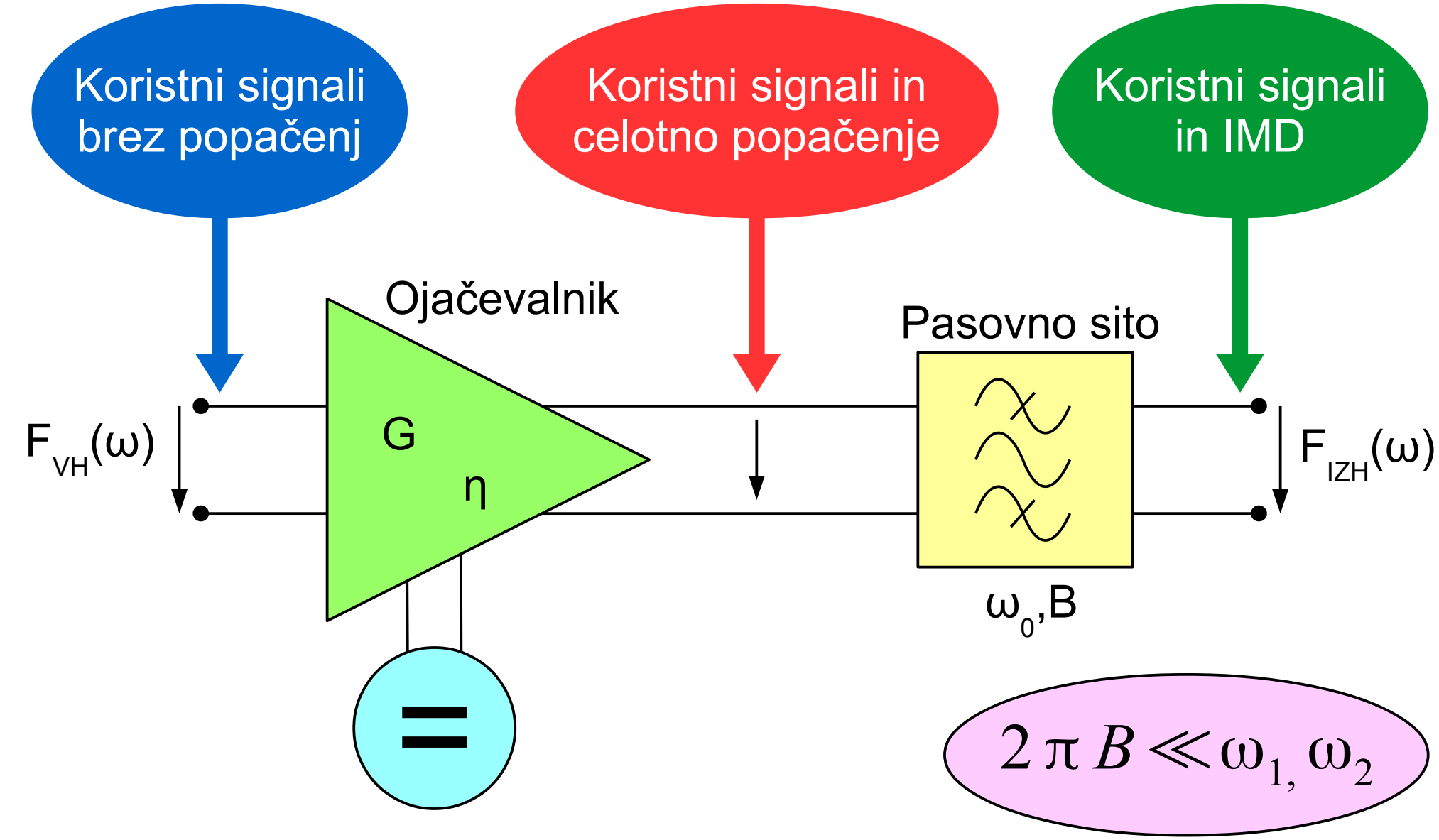
<u>5 – Učinek nelinearnosti na spekter popačenja</u>



6 – Spekter popačenja pri sinusnem krmiljenju

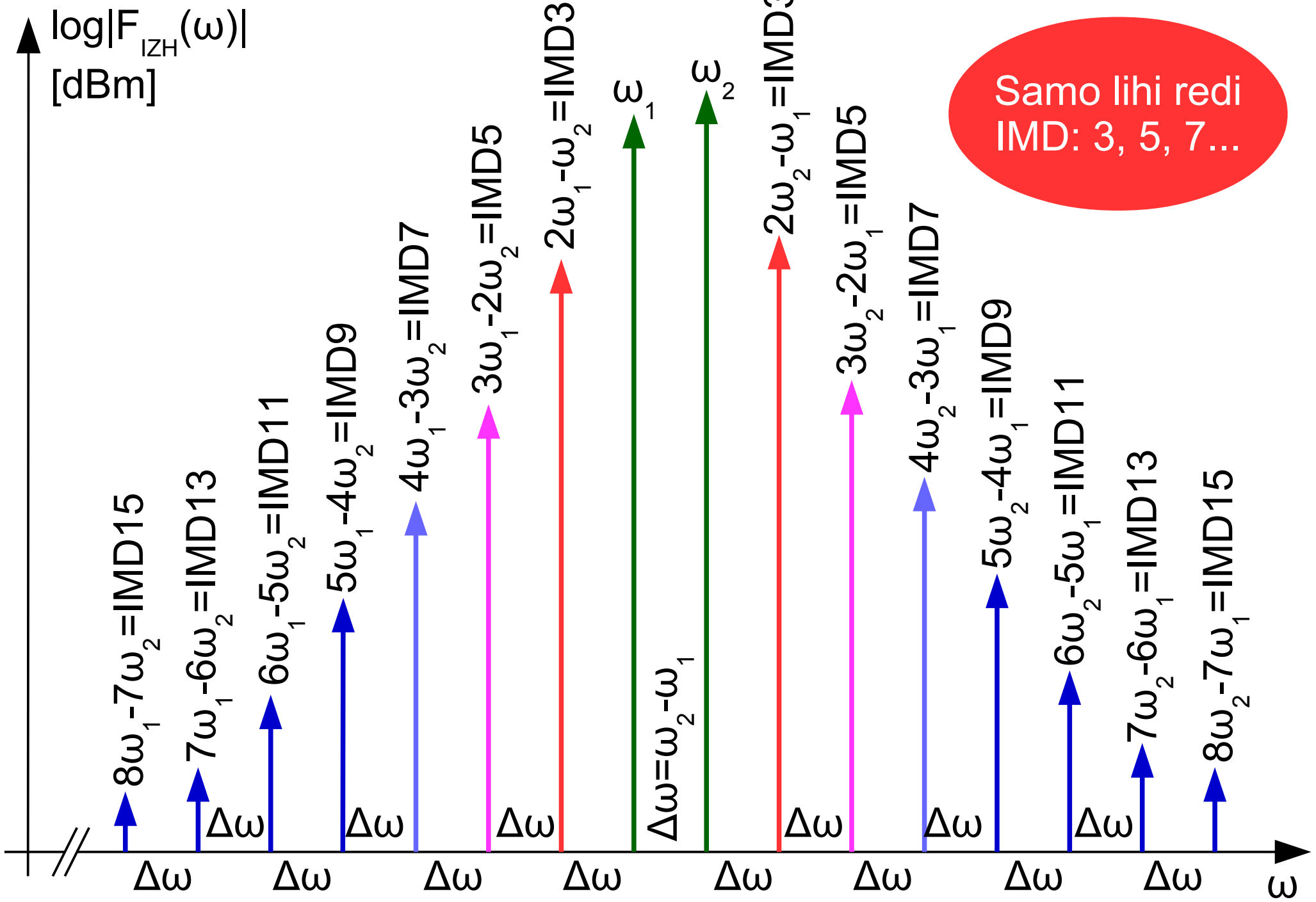


7 – Spekter popačenja pri dvotonskem krmiljenju

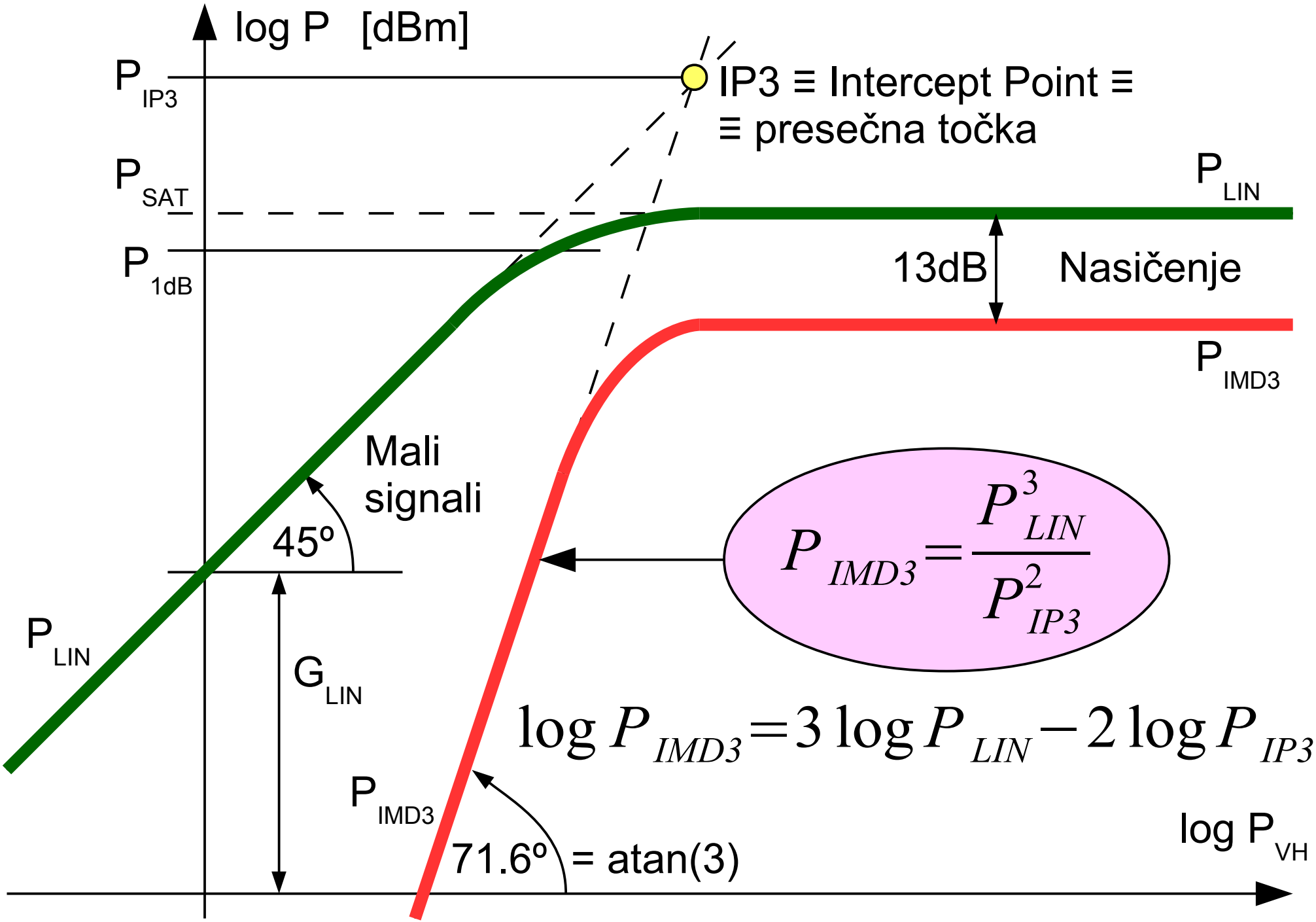


Intermodulacijsko popačenje ≡ Inter-Modulation Distortion ≡ IMD

<u>8 – Intermodulacijsko popačenje ozkopasovnega ojačevalnika</u>



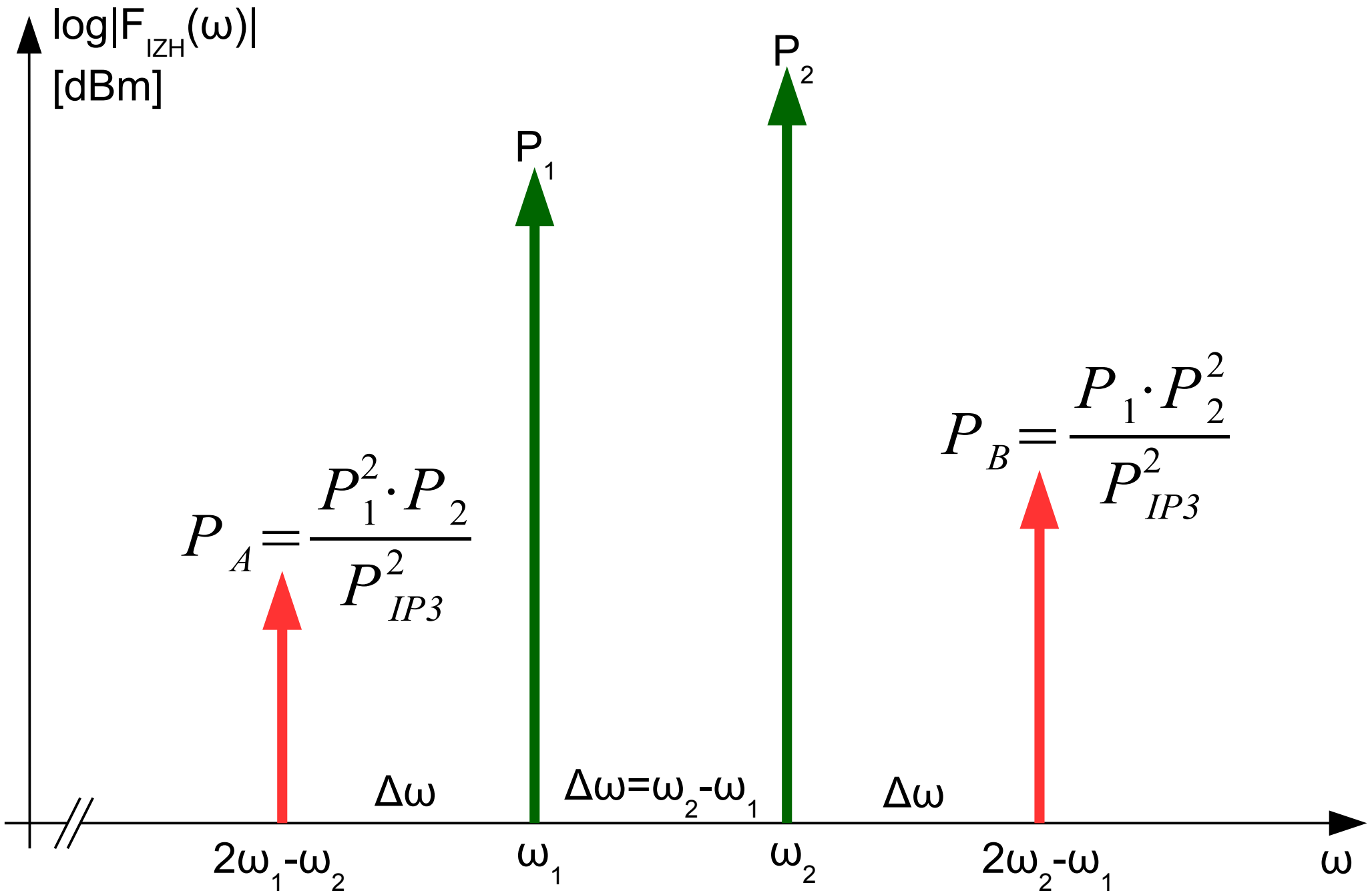
9 – Spekter intermodulacijskega popačenja



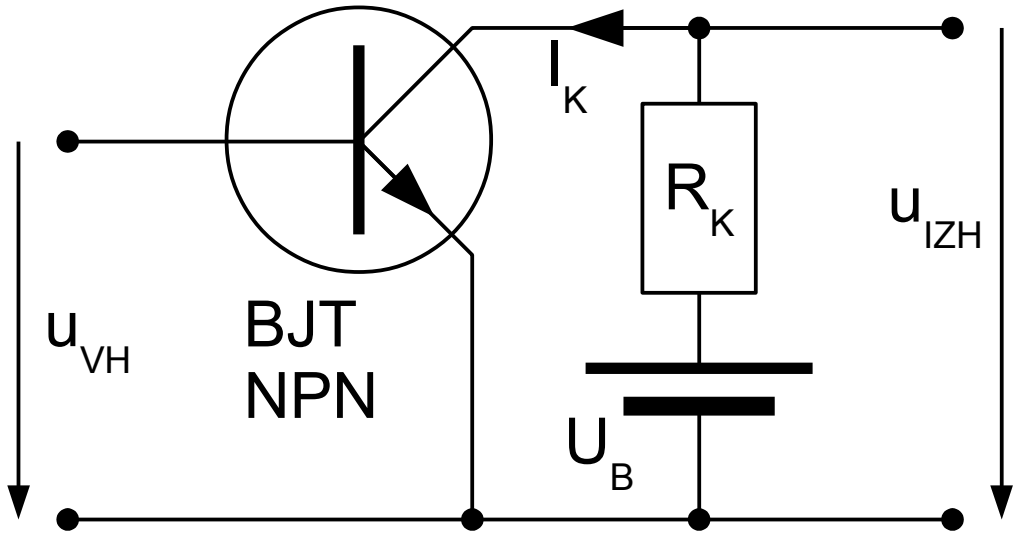
$$P_{IMD3} = \frac{P_{LIN}^3}{P_{IP3}^2}$$

$$\log P_{IMD3} = 3 \log P_{LIN} - 2 \log P_{IP3}$$

10 – Moč intermodulacijskih produktov tretjega reda



11 – Izračun moči IMD3 pri malih signalih (izven nasičenja)

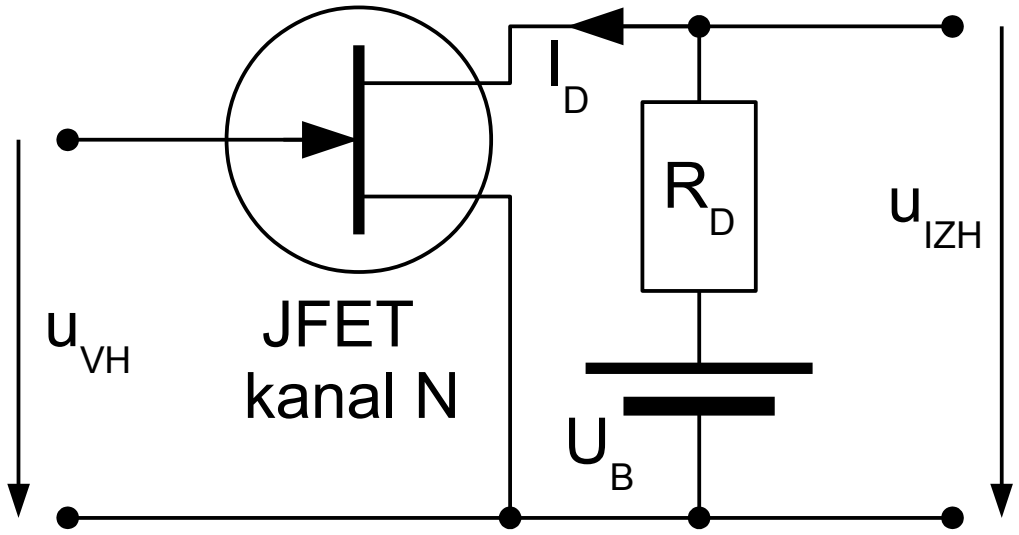


$$I_K = \beta \cdot I_S \cdot \left(e^{\frac{|Q_e|}{k_B T} \cdot U_{BE}} - 1 \right)$$

$$u_{IZH} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot u_{VH} + \alpha_2 \cdot u_{VH}^2 + \alpha_3 \cdot u_{VH}^3 + \alpha_4 \cdot u_{VH}^4 + \ldots$$

$$\log P_{IP3} \approx \log P_{1\mathrm{dB}} + 10\mathrm{dB}$$

Ocena velja za ojačevalnike brez negativne povratne vezave!



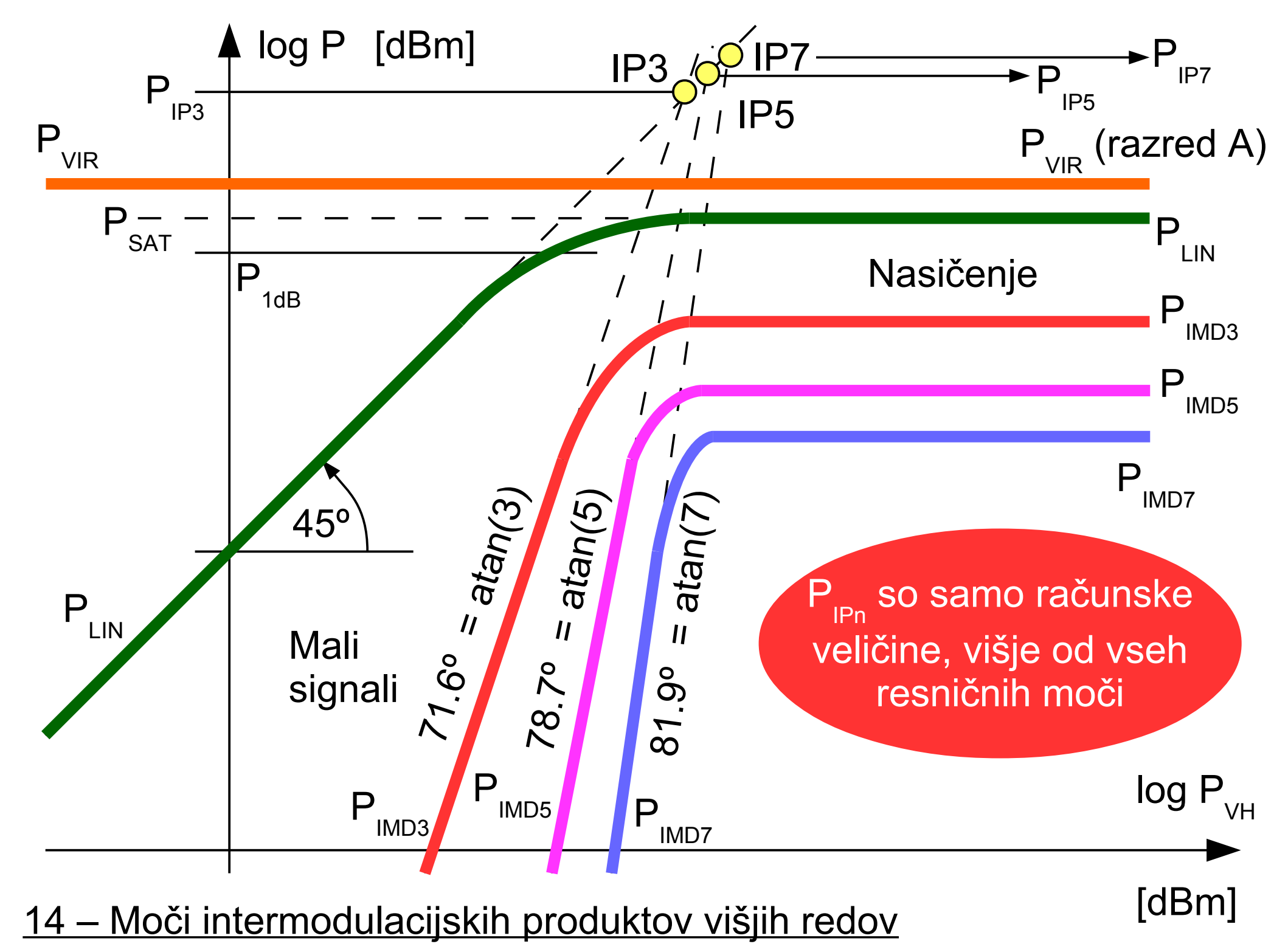
$$I_D = I_{DSS} \cdot \left(\frac{U_{GS} - U_T}{U_T} \right)^2$$

$$u_{IZH} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot u_{VH} + \alpha_2 \cdot u_{VH}^2$$

Višjih členov ni!

$$\log P_{IP3} \approx \log P_{1\mathrm{dB}} + 20\mathrm{dB}$$

Ocena velja tudi za ojačevalnike z močno negativno povratno vezavo!



14 – Moči intermodulacijskih produktov višjih redov

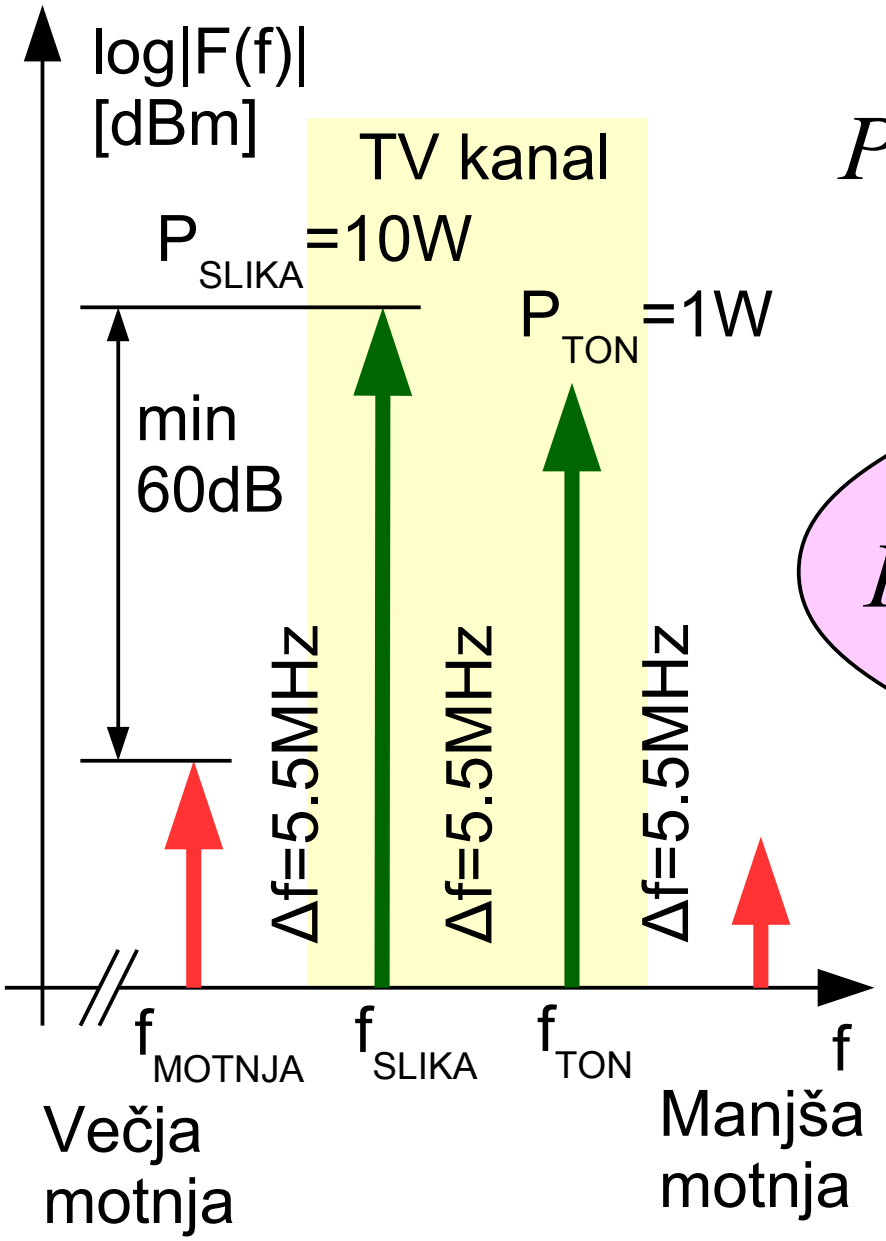
$$P_{IMD5} = \frac{P_{LIN}^5}{P_{IP5}^4} \qquad \log P_{IMD5} = 5\log P_{LIN} - 4\log P_{IP5}$$

$$P_{IMD7} = \frac{P_{LIN}^7}{P_{IP7}^6} \qquad \log P_{IMD7} = 7\log P_{LIN} - 6\log P_{IP7}$$

$$P_{IMDn} = \frac{P_{LIN}^n}{P_{IPn}^{n-1}}$$

Do katerega reda je smiselno računati IMD?

$$\log P_{IMDn} = n\log P_{LIN} - (n-1)\log P_{IPn}$$

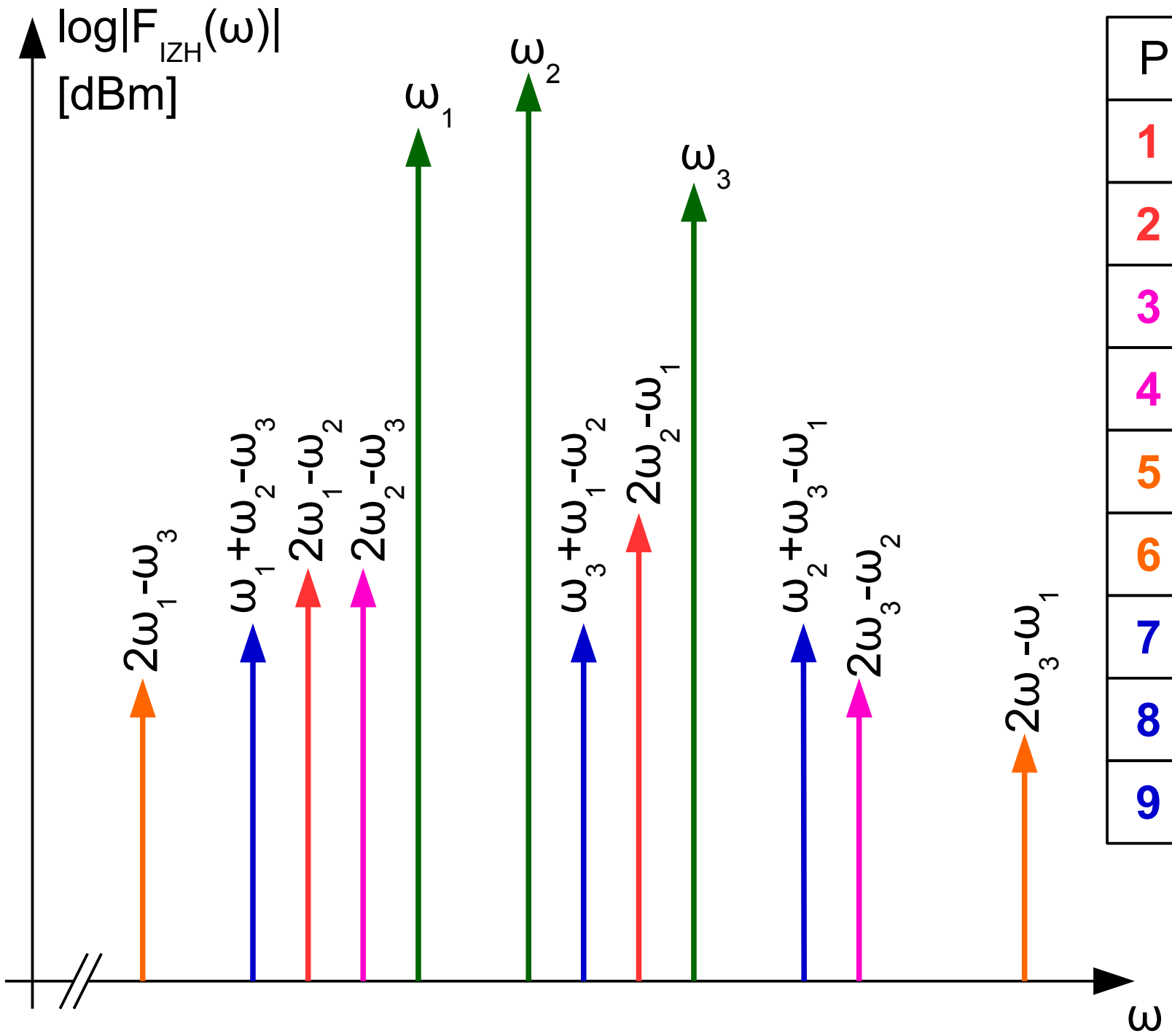


$$P_{MOTNJA} = \frac{P_{SLIKA}^2 \cdot P_{TON}}{P_{IP3}^2} \leq 10\,\mu W$$

$$P_{IP3} = \sqrt{\frac{P_{SLIKA}^2 \cdot P_{TON}}{P_{MOTNJA}}} = 3.16\,kW$$

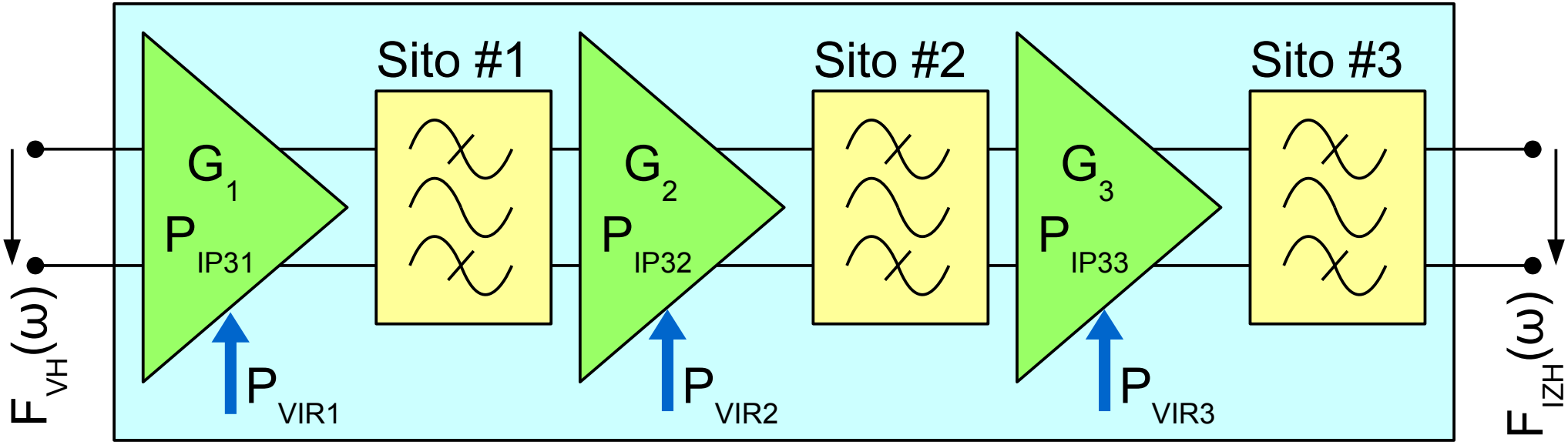
Polprevodnik	P_{1dB}	P_{VIR}
BJT	316W	1.05kW
FET	31.6W	105W

Razred A: $\eta_{1dB} \approx 30\%$



Produkti IMD3	
1	$2\omega_1-\omega_2$
2	$2\omega_2-\omega_1$
3	$2\omega_2-\omega_3$
4	$2\omega_3-\omega_2$
5	$2\omega_1-\omega_3$
6	$2\omega_3-\omega_1$
7	$\omega_1+\omega_2-\omega_3$
8	$\omega_3+\omega_1-\omega_2$
9	$\omega_2+\omega_3-\omega_1$

17 – Spekter IMD3 pri tritonskem krmiljenju

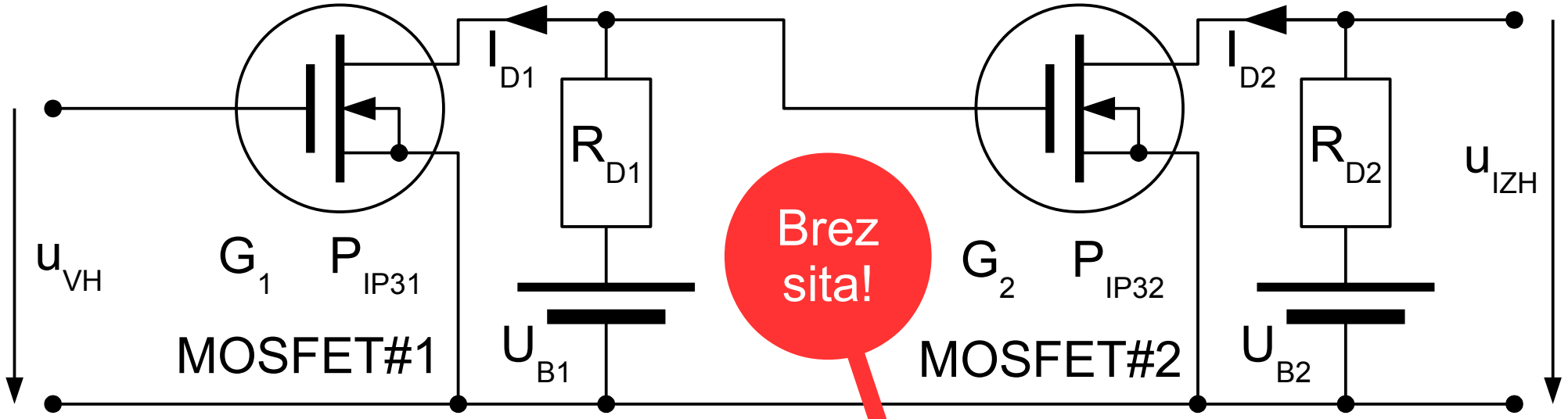


Kazalčna vsota (sofazna)

$$G_{verige} = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3$$

$$\sqrt{P_{IMD3verige}} = \sqrt{P_{IMD33}} + \sqrt{G_3 \cdot P_{IMD32}} + \sqrt{G_3 \cdot G_2 \cdot P_{IMD31}}$$

$$P_{IP3verige} = \frac{1}{\frac{1}{P_{IP33}} + \frac{1}{P_{IP32} \cdot G_3} + \frac{1}{P_{IP31} \cdot G_2 \cdot G_3}}$$

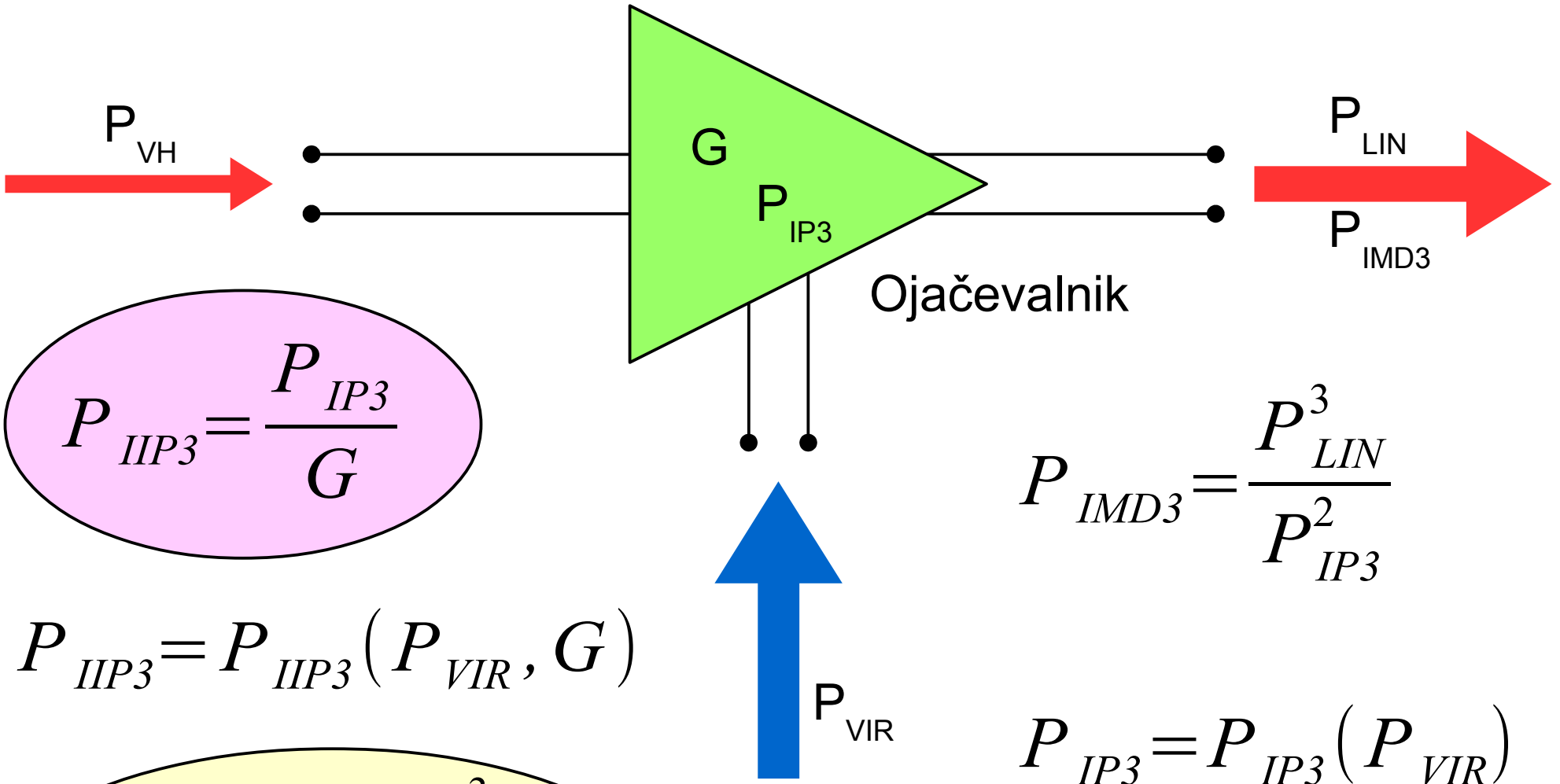


$$u_{IZH} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot u_{VH} + \alpha_2 \cdot u_{VH}^2 + \alpha_3 \cdot u_{VH}^3 + \alpha_4 \cdot u_{VH}^4$$

Enačba za verigo brez sit NE velja!

$$P_{IP3verige} = \frac{1}{\frac{1}{P_{IP32}} + \frac{1}{P_{IP31} \cdot G_2}}$$

IIP3 ≡ Input Intercept Point ≡ vhodna presečna točka



$$P_{IIP3} = \frac{P_{IP3}}{G}$$

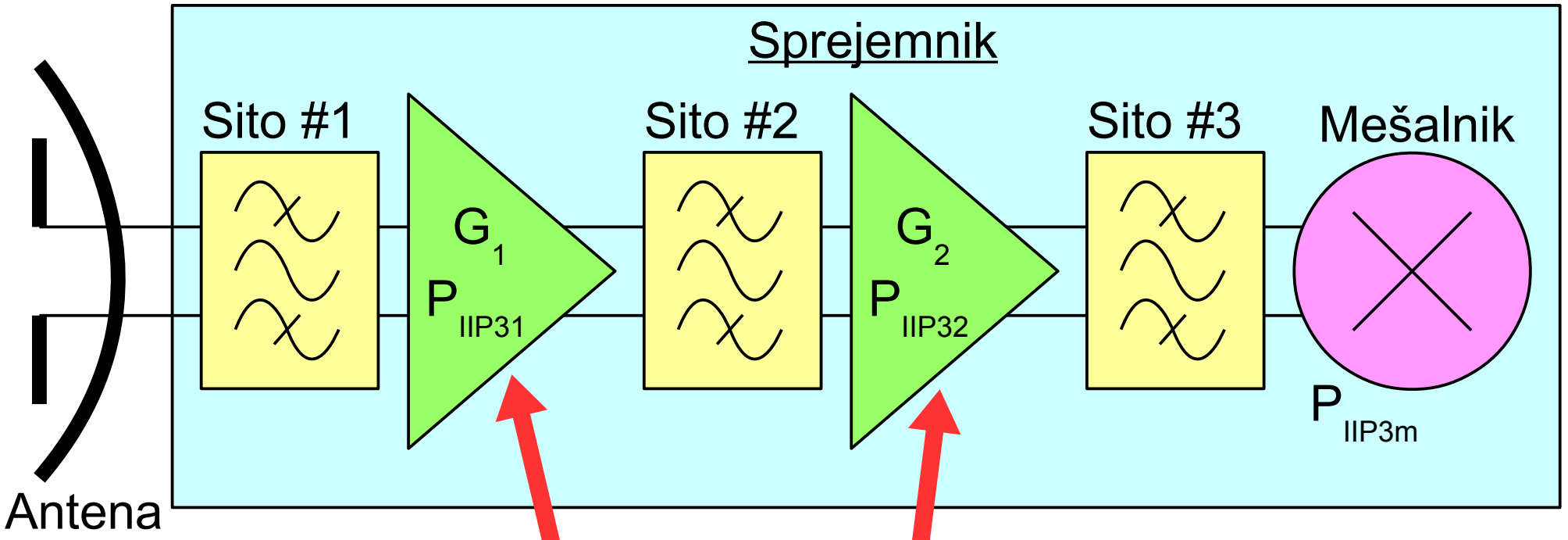
$$P_{IMD3} = \frac{P_{LIN}^3}{P_{IP3}^2}$$

$$P_{IIP3} = P_{IIP3}(P_{VIR}, G)$$

$$P_{IP3} = P_{IP3}(P_{VIR})$$

$$P_{IMD3vhod} = \frac{P_{VH}^3}{P_{IIP3}^2}$$

Na vhodu lahko presežemo P_{IIP3}!



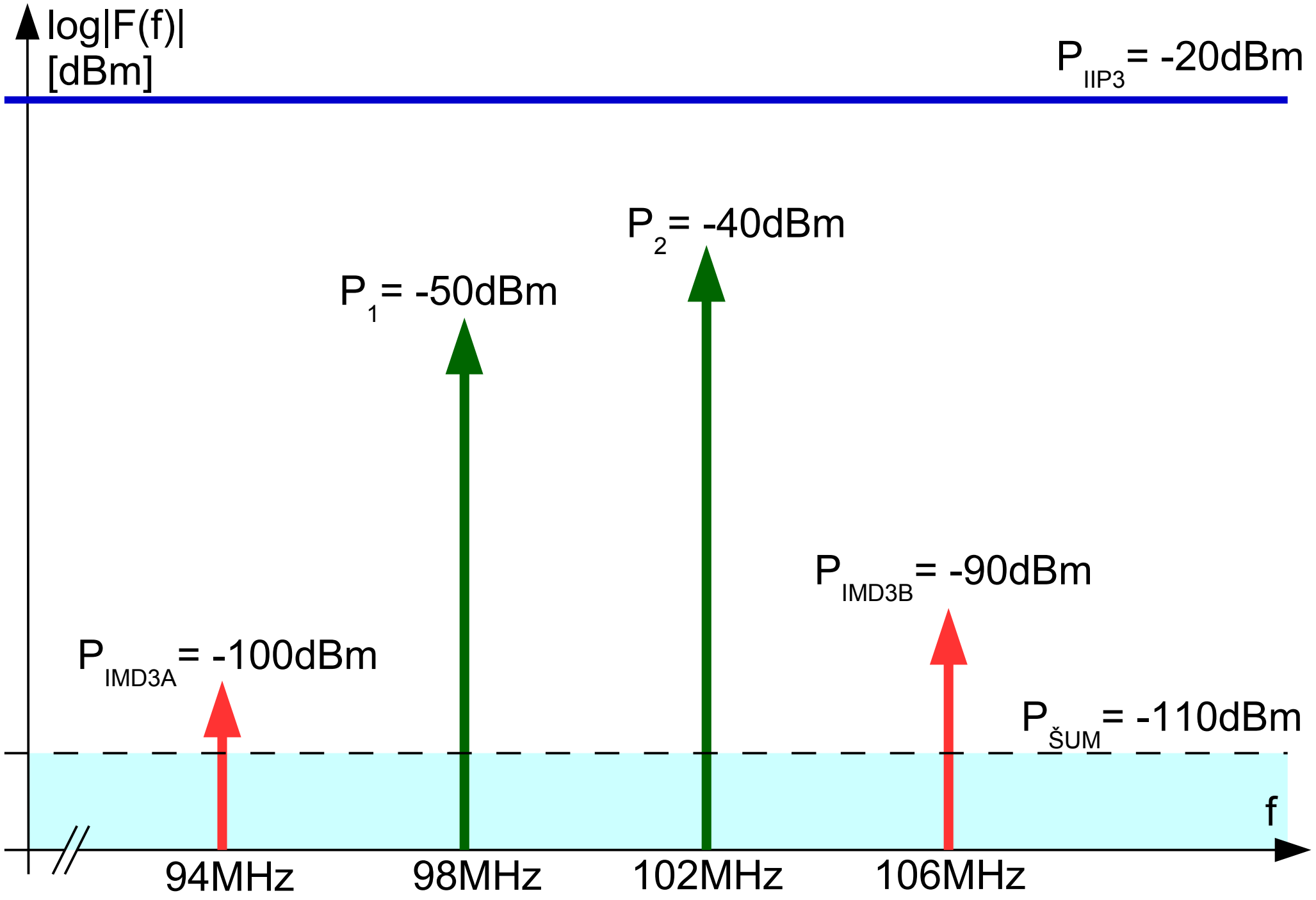
Škodljivo ojačanje?

$$P_{IIP3verige} = \frac{1}{\frac{1}{P_{IIP31}} + \frac{G_1}{P_{IIP32}} + \frac{G_1 \cdot G_2}{P_{IIP3m}}}$$

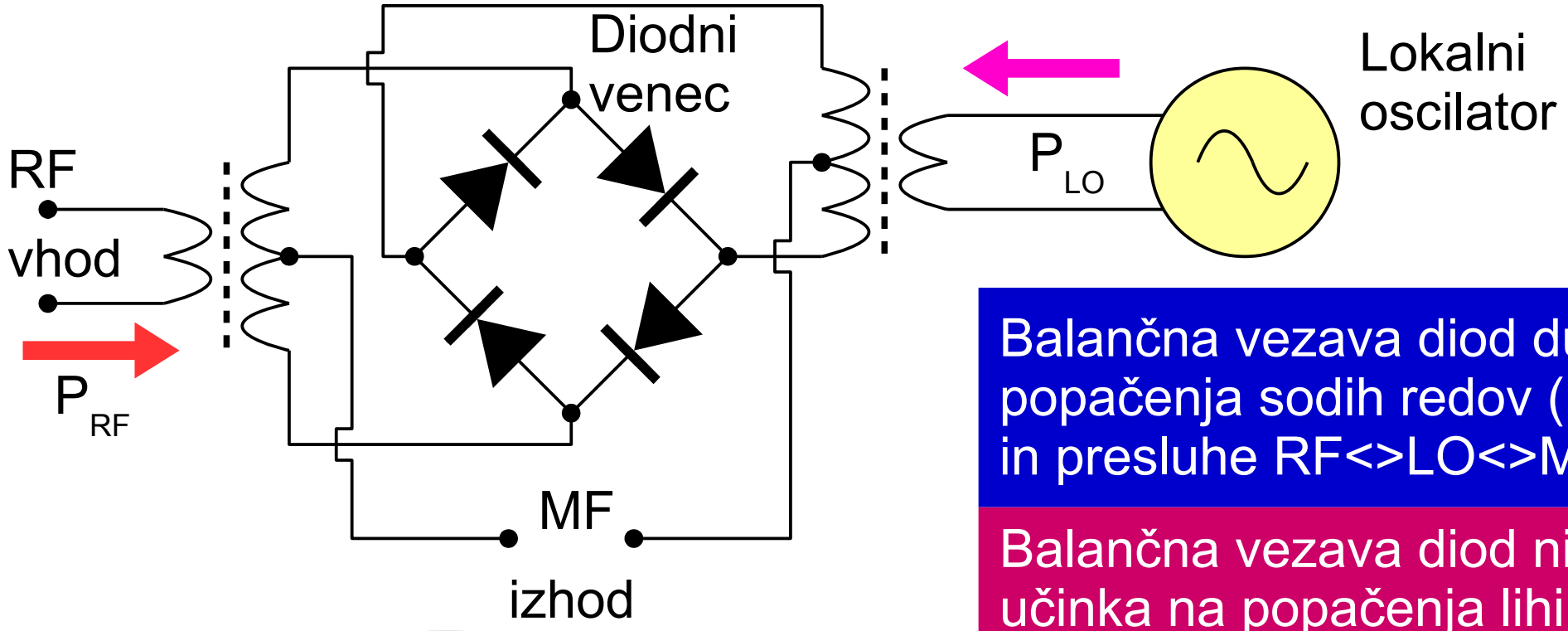
Nasprotujoči zahtevi za mešalnik:

1) NELINEAREN za mešanje in

2) LINEAREN za visok P_{IIP3m}



22 – Zgled: popačenje v radiodifuznem sprejemniku



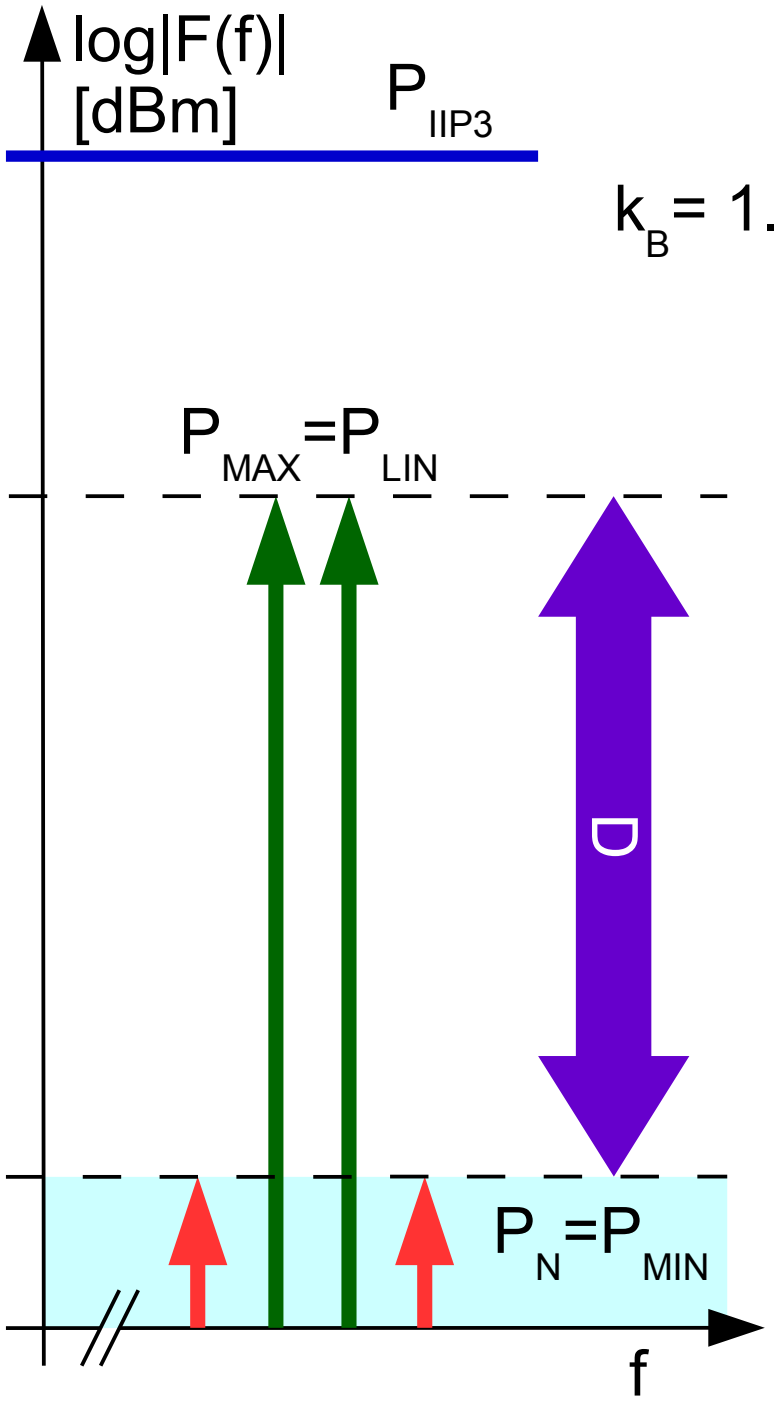
Balančna vezava diod duši popačenja sodih redov (IP2) in presluhe RF<>LO<>MF

Balančna vezava diod nima učinka na popačenja lihih redov niti na P_{IIP3} (IMD3)

$$\log P_{1dB} \approx \log P_{LO} - 6dB$$

$$\log P_{IIP3} \approx \log P_{1dB} + 15dB$$

P_{LO}	P_{1dB}	P_{IIP3}
+7dBm	+1dBm	+16dBm
+17dBm	+11dBm	+26dBm
+25dBm	+19dBm	+34dBm



$$P_N = B \cdot k_B \cdot T_0 \cdot F = P_{MIN} = P_{IMD3}$$

$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K $T_0 = 290$K $k_B \cdot T_0 = -174$dBm/Hz

$$P_{MAX} = \sqrt[3]{P_{IMD3} \cdot P_{IIP3}^2}$$

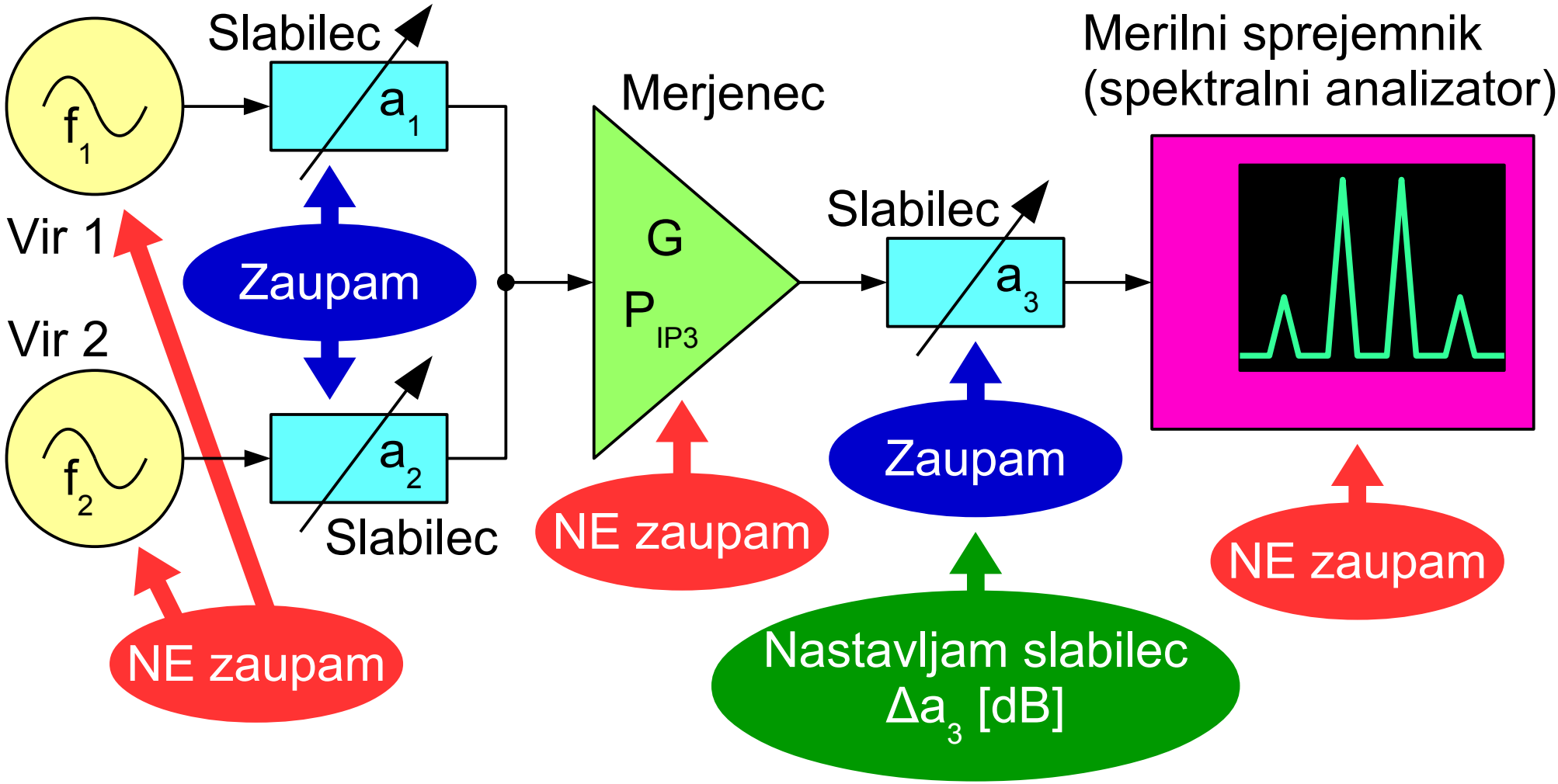
$$D = \frac{P_{MAX}}{P_{MIN}} = \sqrt[3]{\frac{P_{IIP3}^2}{P_N^2}} = \left(\frac{P_{IIP3}}{P_N} \right)^{2/3}$$

Zgled: RF SPEKTRALNI ANALIZATOR

F = 20dB = 100 P_{IIP3} = +30dBm

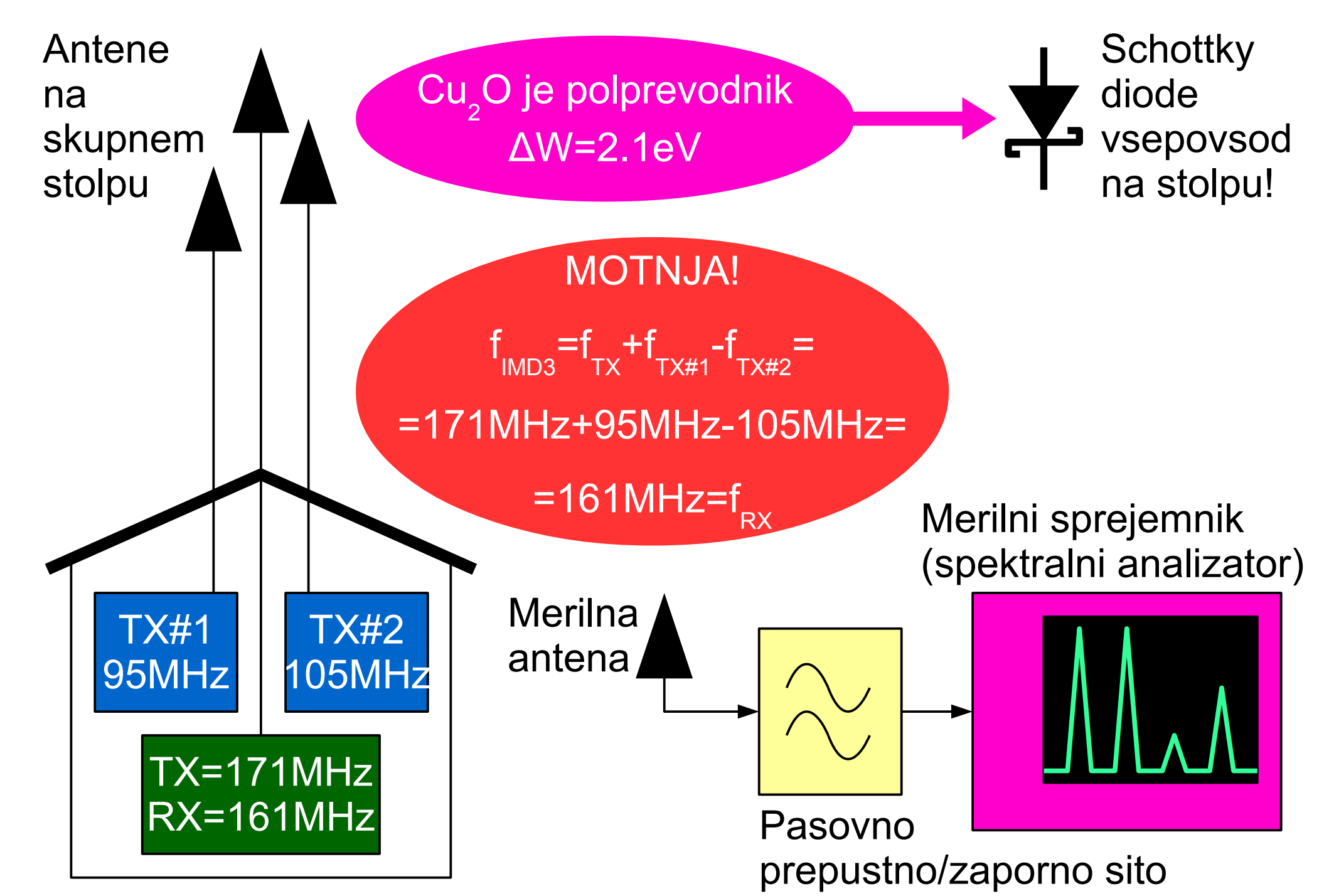
B = 10kHz >>> $P_N = P_{MIN}$ = -114dBm

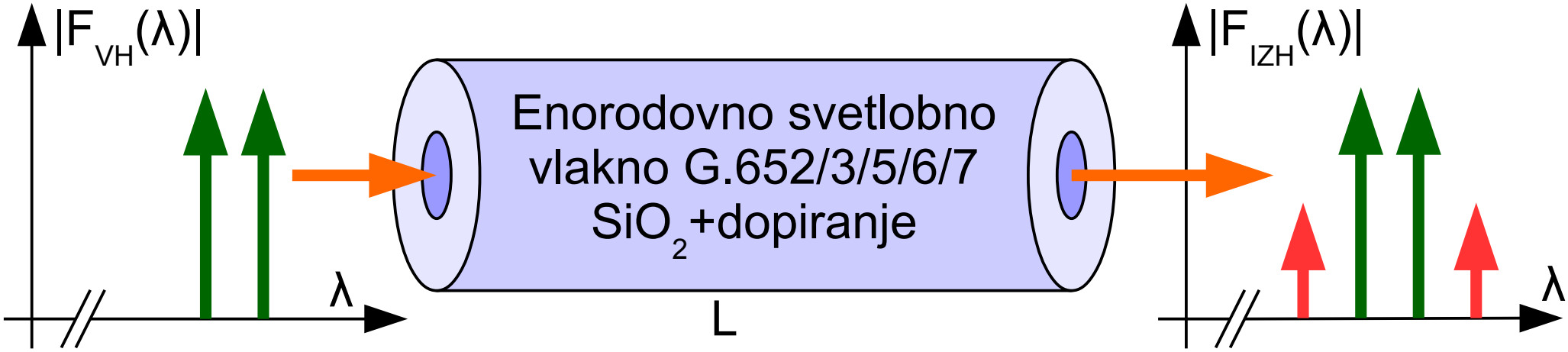
D = 2/3•log(P_{IIP3}/P_N) = 2/3•144dB = 96dB



$\Delta \log P_{IMD3} \approx \Delta a_3$[dB]	Izvor IMD3 je PRED slabilcem (merjenec)
$\Delta \log P_{IMD3} \approx 3\Delta a_3$[dB]	Izvor IMD3 je ZA slabilcem (napaka merilnika)

25 – Meritev intermodulacijskega popačenja ojačevalnika


Antene na skupnem stolpu
Cu_2O je polprevodnik
ΔW=2.1eV
Schottky diode vsepovsod na stolpu!
MOTNJA!
$f_{IMD3}=f_{TX}+f_{TX\#1}-f_{TX\#2}=$
=171MHz+95MHz-105MHz=
=161MHz=f_{RX}
TX#1 95MHz
TX#2 105MHz
TX=171MHz RX=161MHz
Merilni sprejemnik (spektralni analizator)
Merilna antena
Pasovno prepustno/zaporno sito



Elektrostrikcija povzroča nelinearen lomni količnik: $n(S)=n_0+n_2S$

Kremenovo steklo SiO_2 je zelo linearna snov: $n_2\approx3.2\cdot10^{-20}m^2/W$

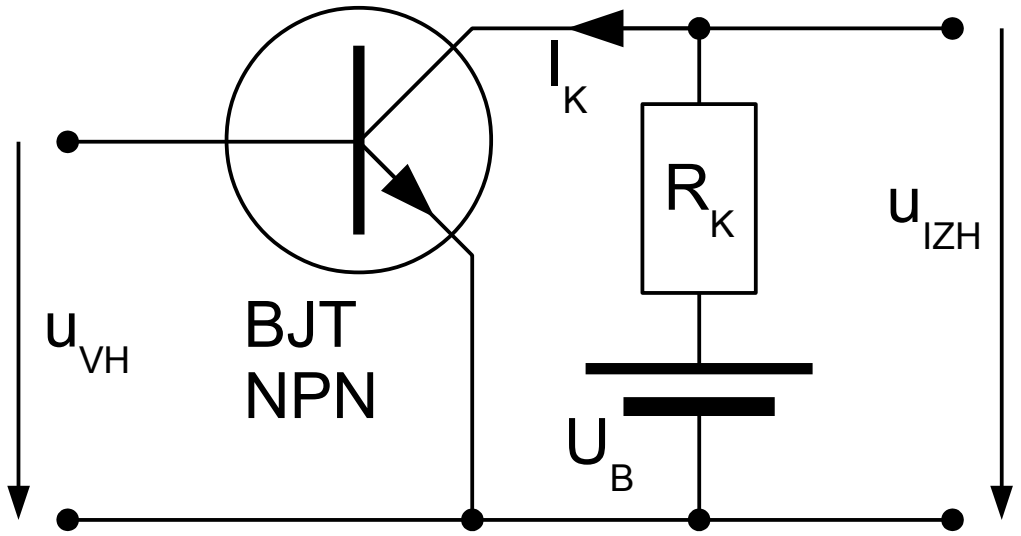
Gostota moči je zelo visoka: $S=P/A_{eff}\approx100mW/70\mu m^2=1.4\cdot10^9W/m^2$

Dolžina vlakna je zelo velika: $L=10km\approx10^{10}\lambda$ $(\lambda=\lambda_0/n_0\approx1.55\mu m/1.46)$

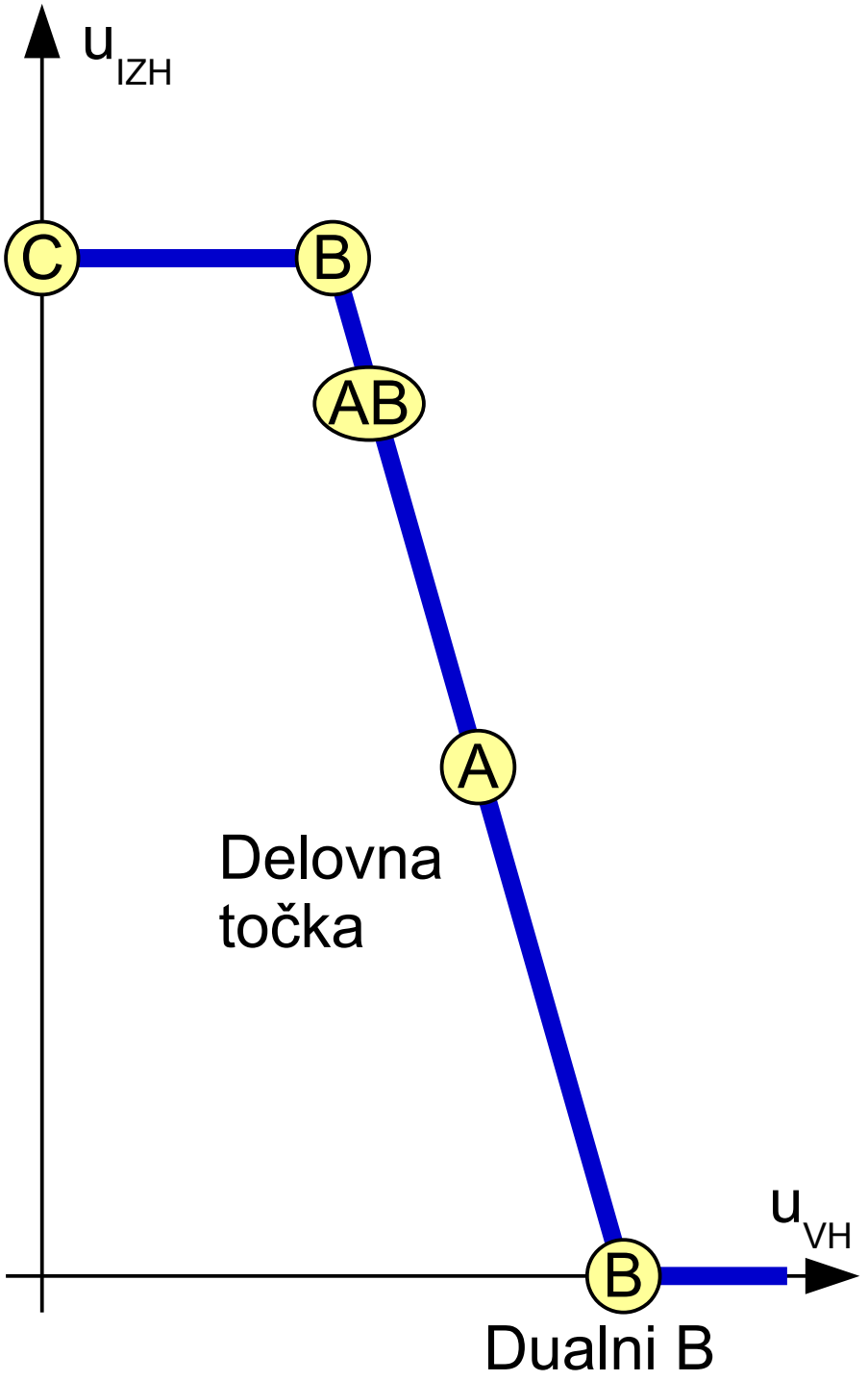
Neprimerno ime: FWM ≡ Four-Wave Mixing ≡ štirivalovno mešanje?

Fazna neusklajenost Δβ znižuje kazalčno vsoto porazdeljene IMD3!

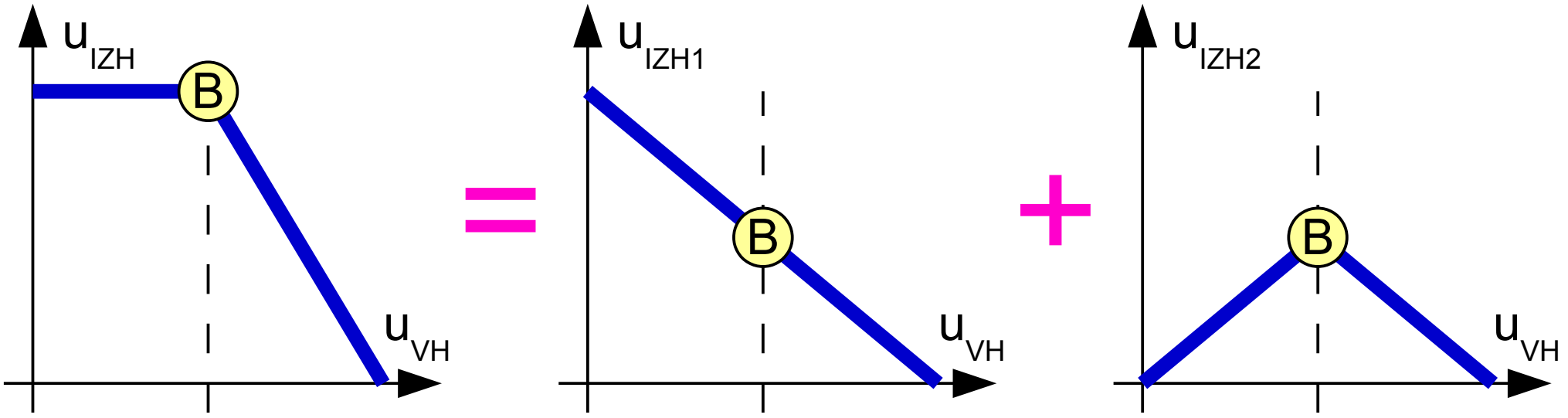
Protiukrep: $D=5ps/nm\cdot km$, $\Delta f=f_2-f_1=100GHz \rightarrow \Delta\beta\approx -2.5rd/km$



Razred	Popačenje	Teorija η	Izvedljiv η_{1dB}
A	nizko	50%	30%
B	zmerno	78.5%	50%
C	visoko	100%	70%



28 – Razredi delovanja in izkoristki ojačevalnikov



Premica

Soda funkcija

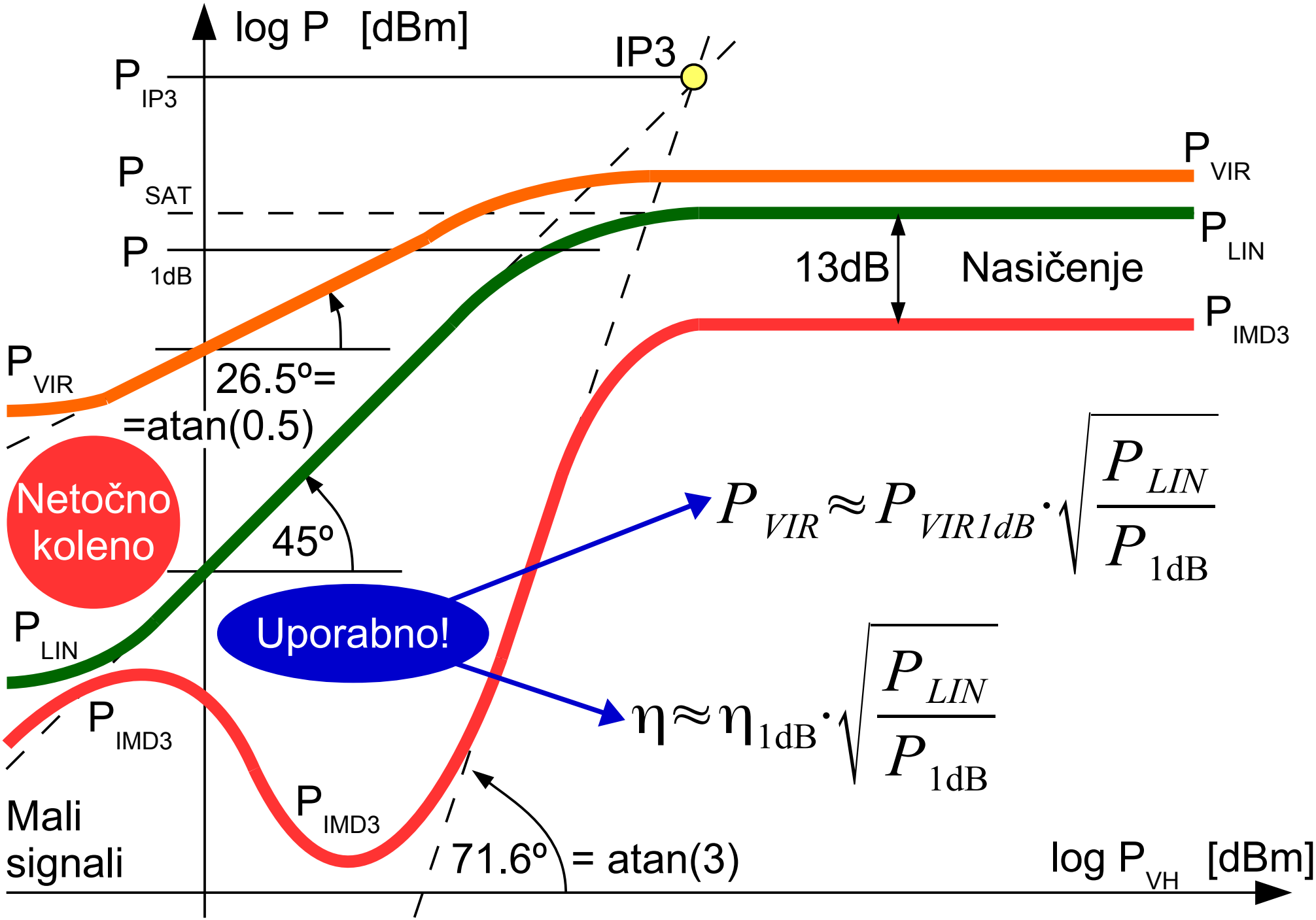
$$u_{IZH1} = \alpha_0' + \alpha_1 \cdot u_{VH}$$

$$u_{IZH2} = \alpha_0'' + \alpha_2 \cdot u_{VH}^2 + \alpha_4 \cdot u_{VH}^4 + \alpha_6 \cdot u_{VH}^6 + \alpha_8 \cdot u_{VH}^8 + \ldots$$

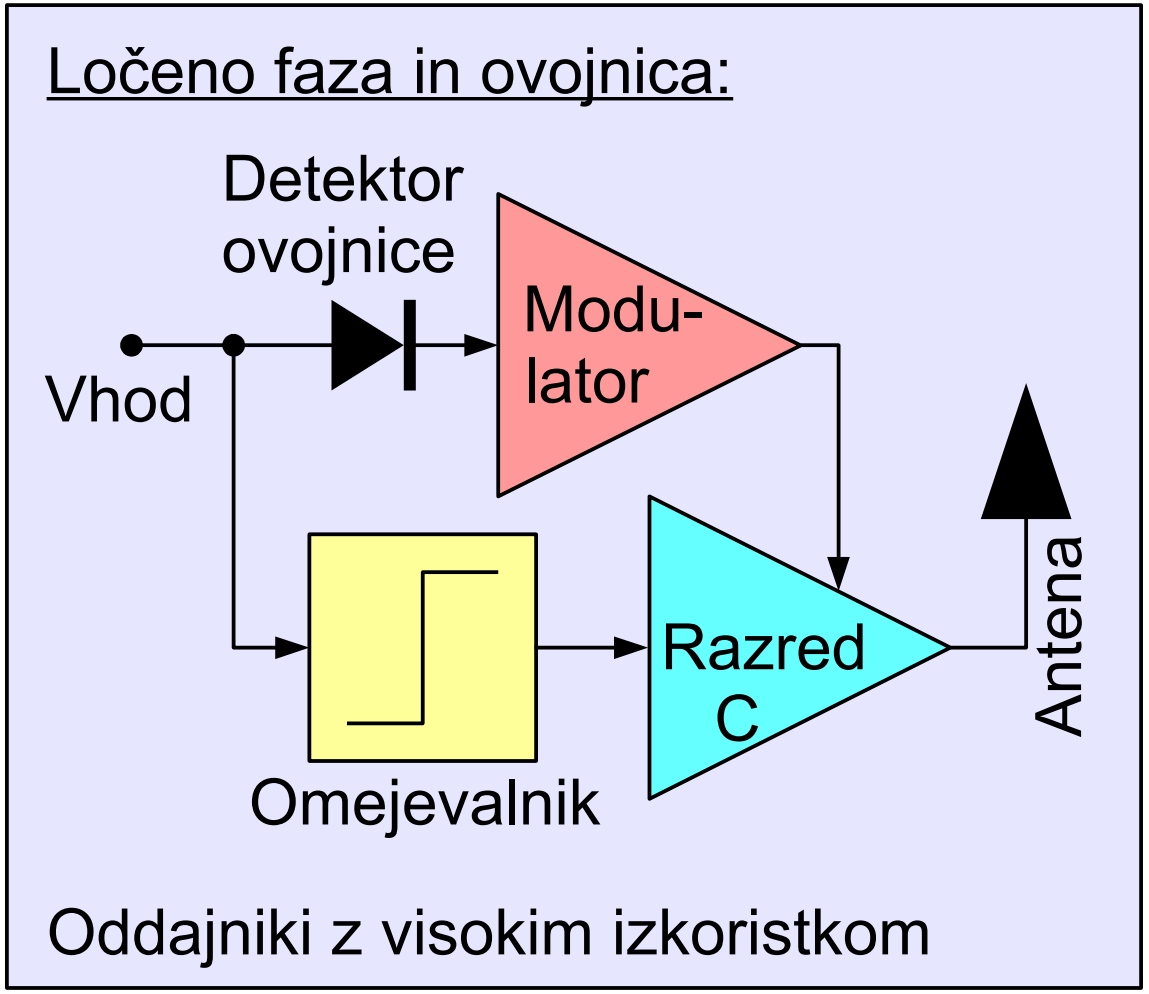
$$u_{IZH} = u_{IZH1} + u_{IZH2}$$

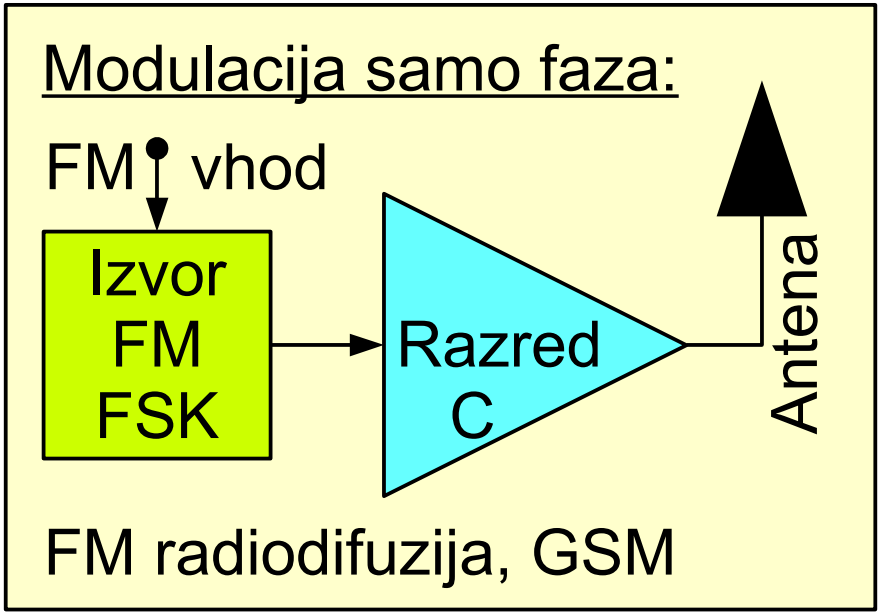
Ni lihih členov 3,5,7,9... !!!
Idealni razred B NIMA IMD!

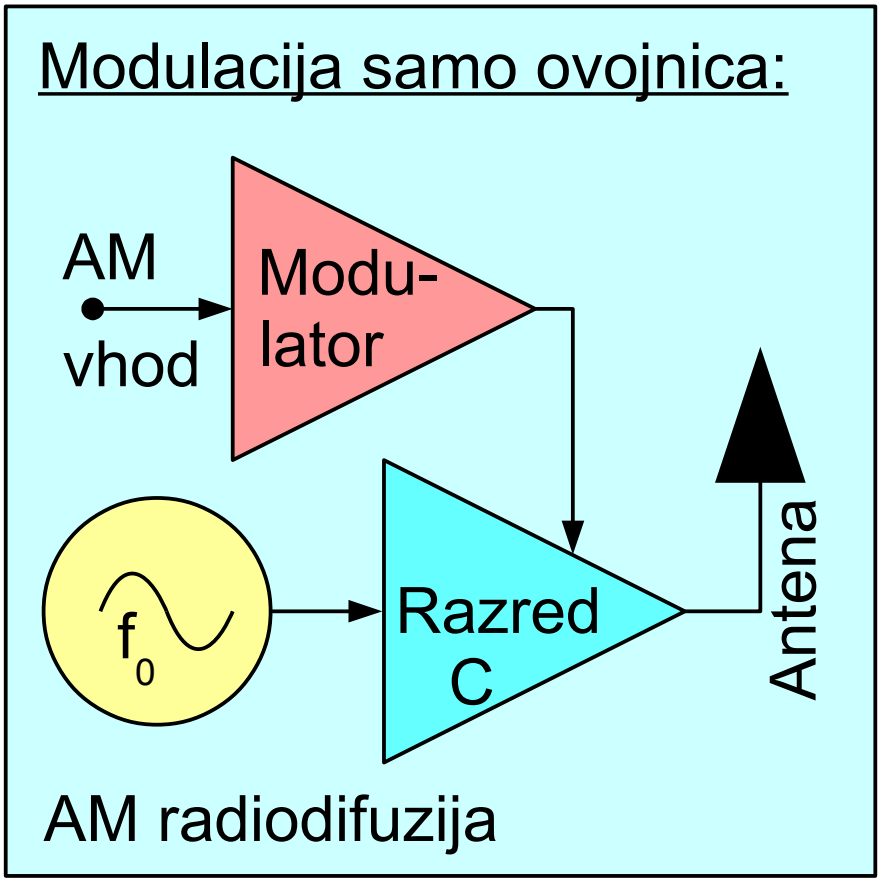
$$u_{IZH} = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot u_{VH} + \alpha_2 \cdot u_{VH}^2 + \alpha_4 \cdot u_{VH}^4 + \alpha_6 \cdot u_{VH}^6 + \ldots$$

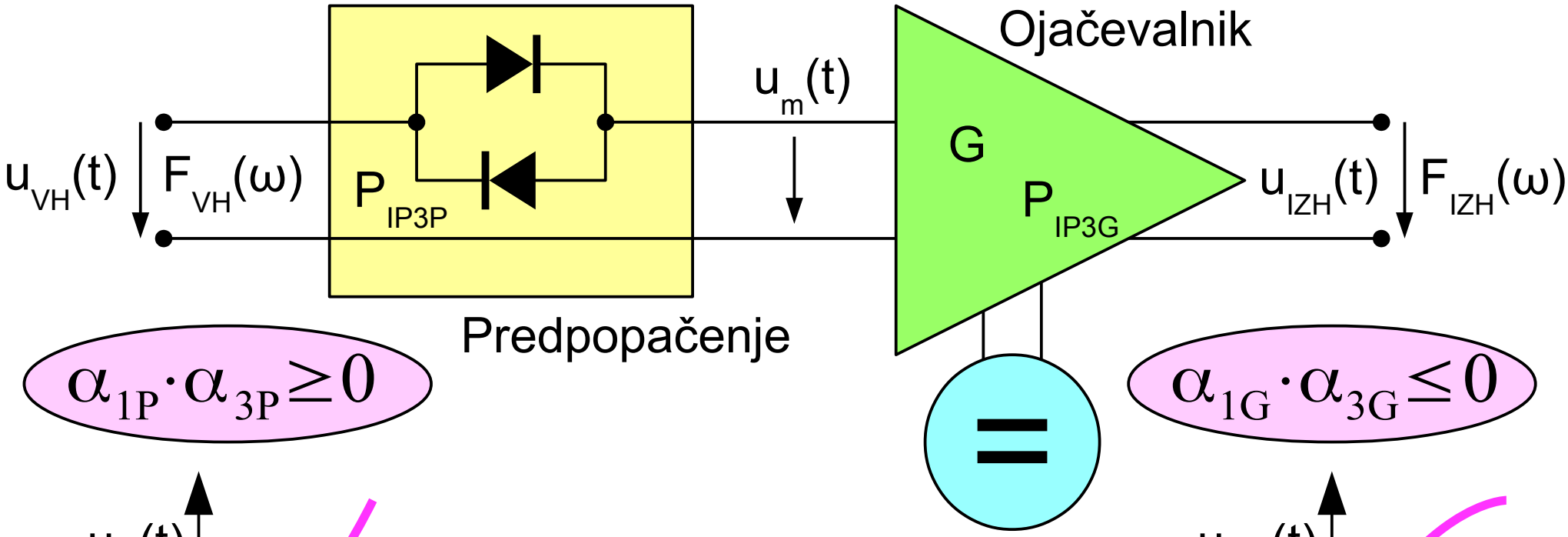


30 – Popačenje in izkoristek resničnega ojačevalnika v razredu B


Ločeno faza in ovojnica:
Detektor ovojnice
Vhod
Modu-lator
Omejevalnik
Razred C
Antena
Oddajniki z visokim izkoristkom

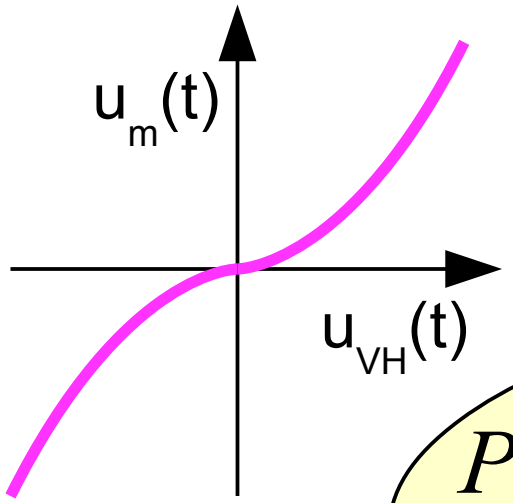

Modulacija samo faza:
FM vhod
Izvor FM FSK
Razred C
Antena
FM radiodifuzija, GSM

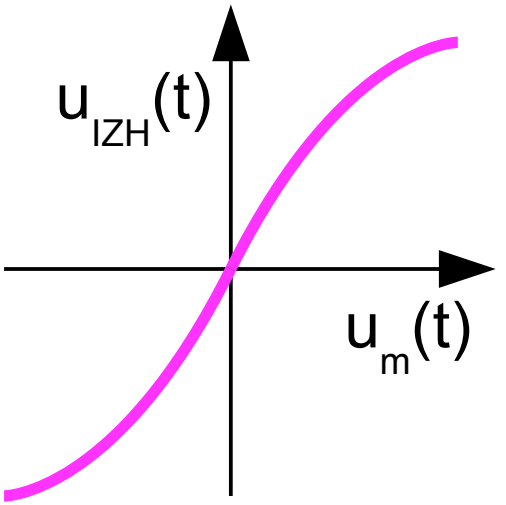

Modulacija samo ovojnica:
AM vhod
Modu-lator
f_0
Razred C
Antena
AM radiodifuzija



$\alpha_{1P} \cdot \alpha_{3P} \geq 0$

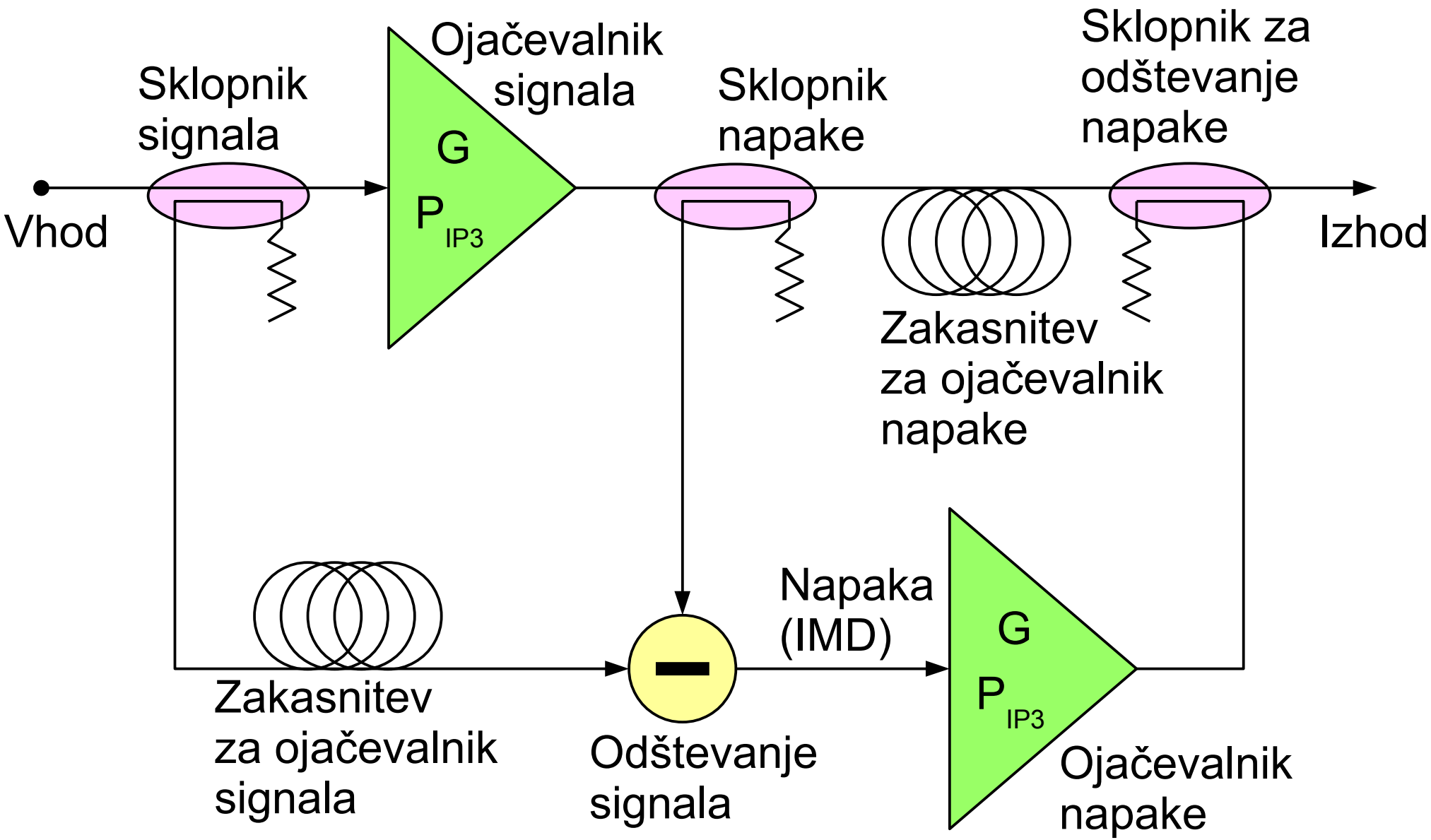
$\alpha_{1G} \cdot \alpha_{3G} \leq 0$



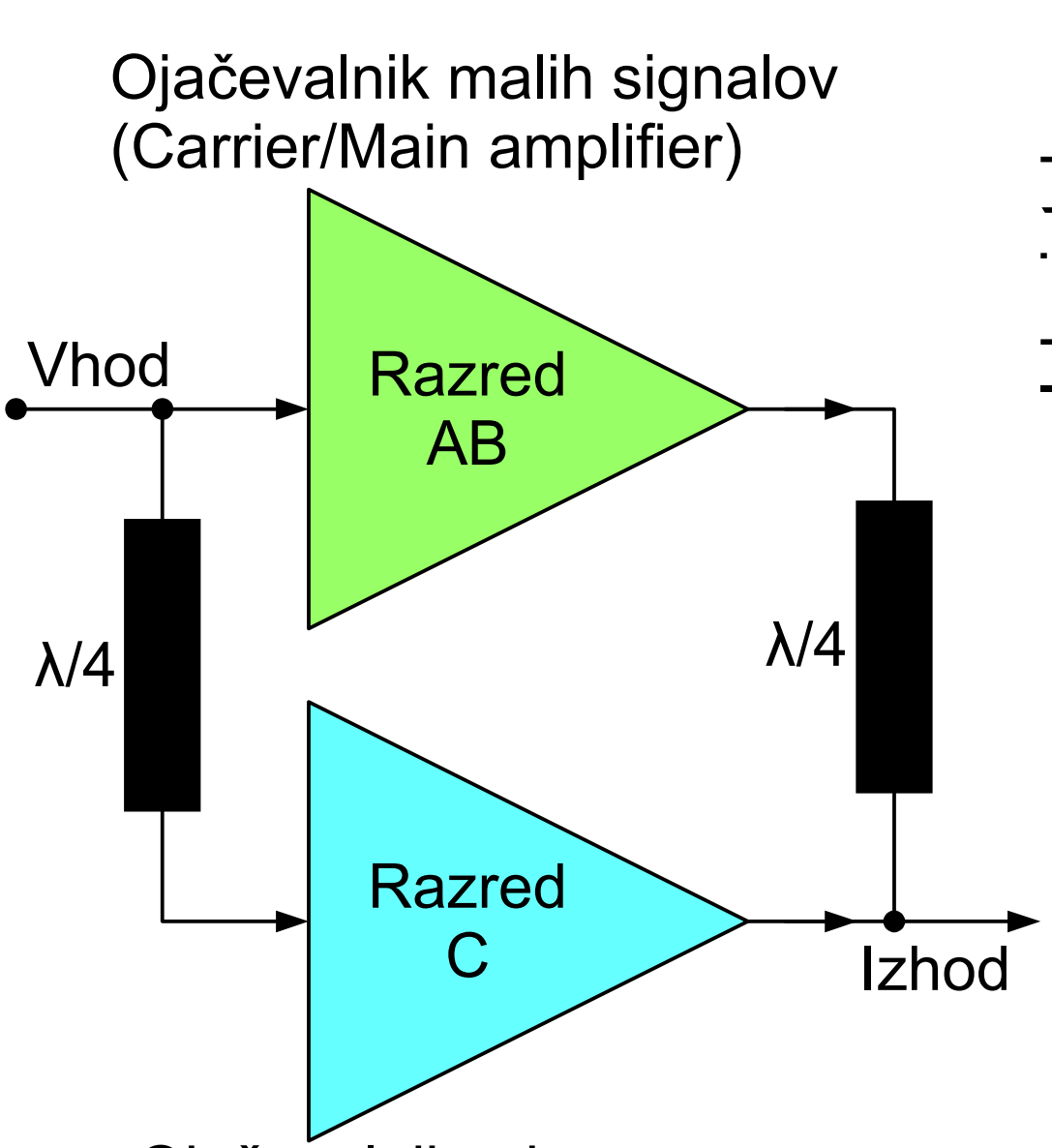


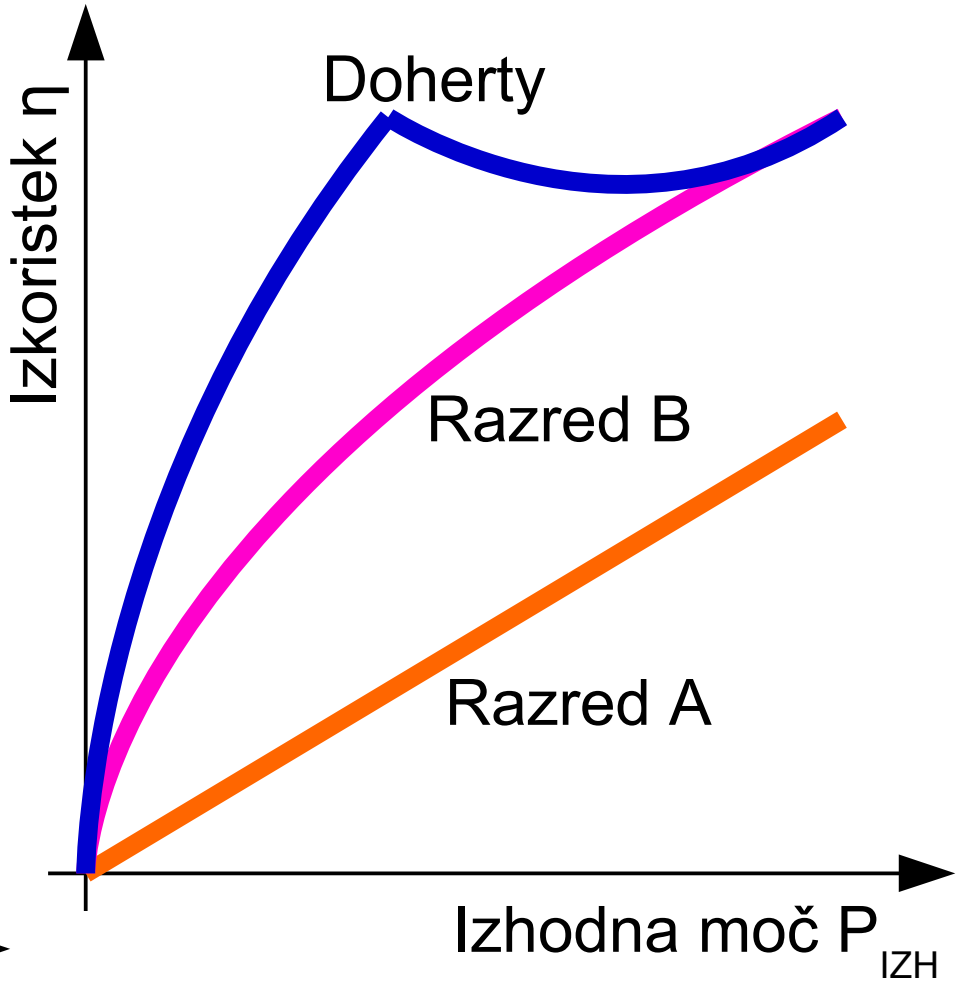
$$P_{IP3} = \frac{1}{\frac{1}{P_{IP3G}} - \frac{1}{P_{IP3P} \cdot G}}$$

Odštevanje kazalcev IMD3

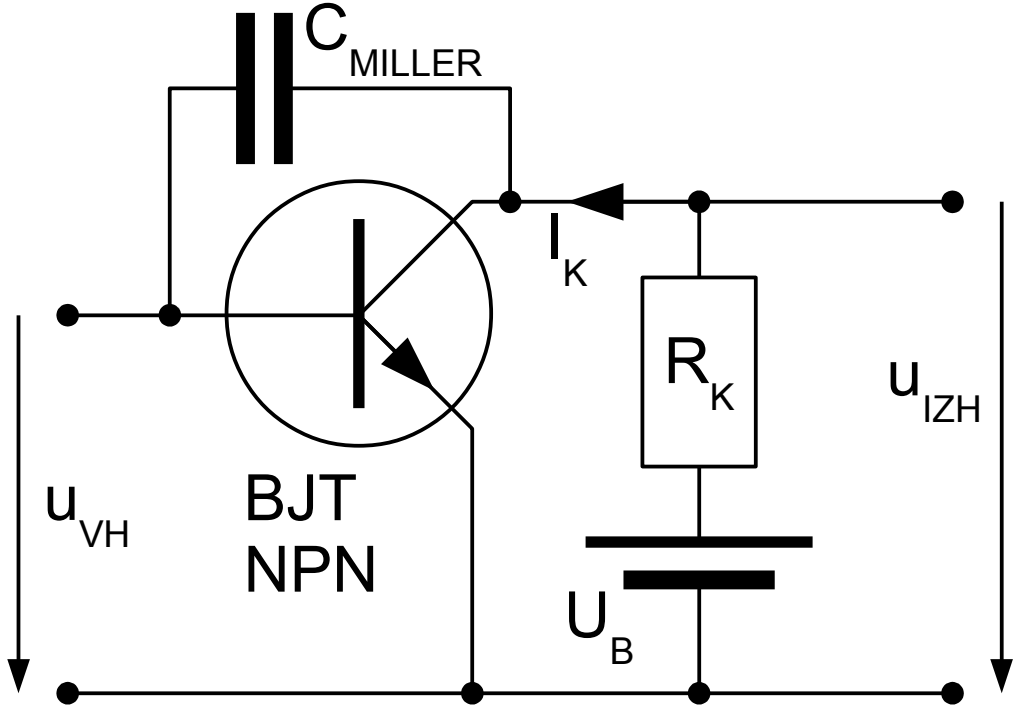


33 – Ojačevalnik „feedforward“



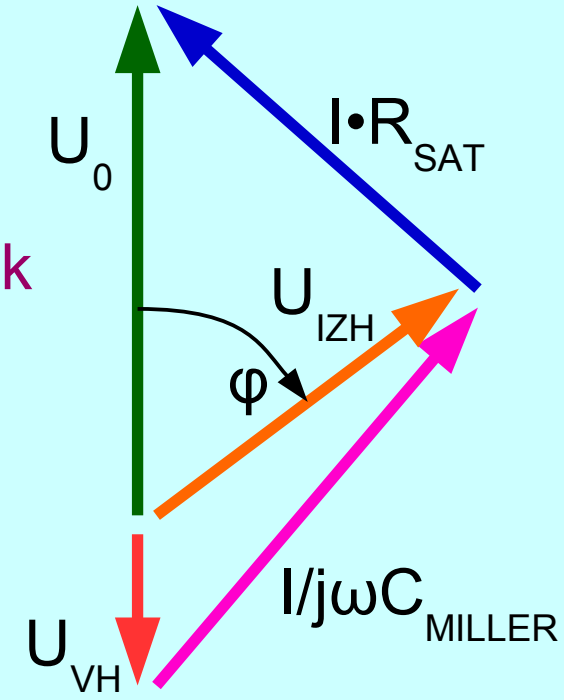


William H. Doherty 1936

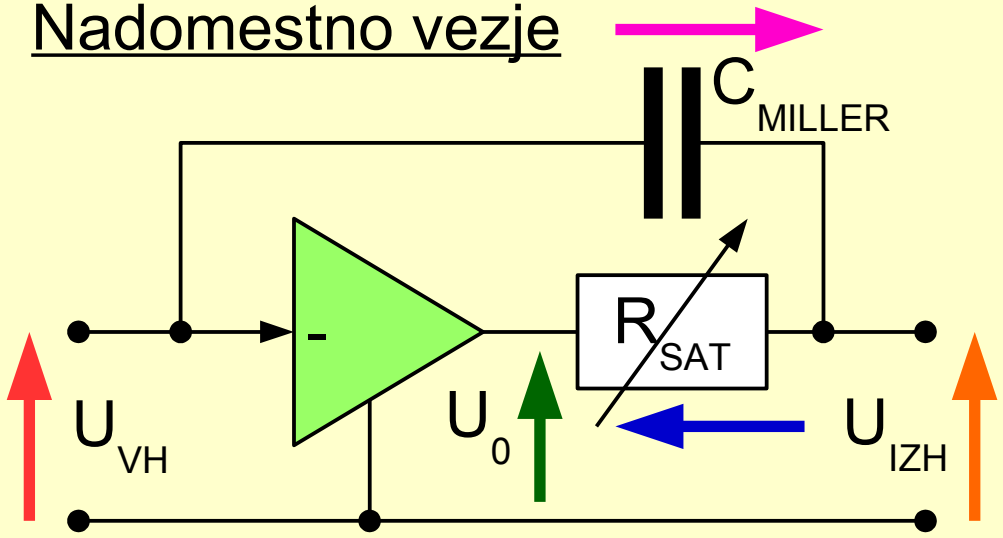


Kazalčni diagram

Fazni zasuk
φ=φ(|U VH|)
odvisen od
amplitude!

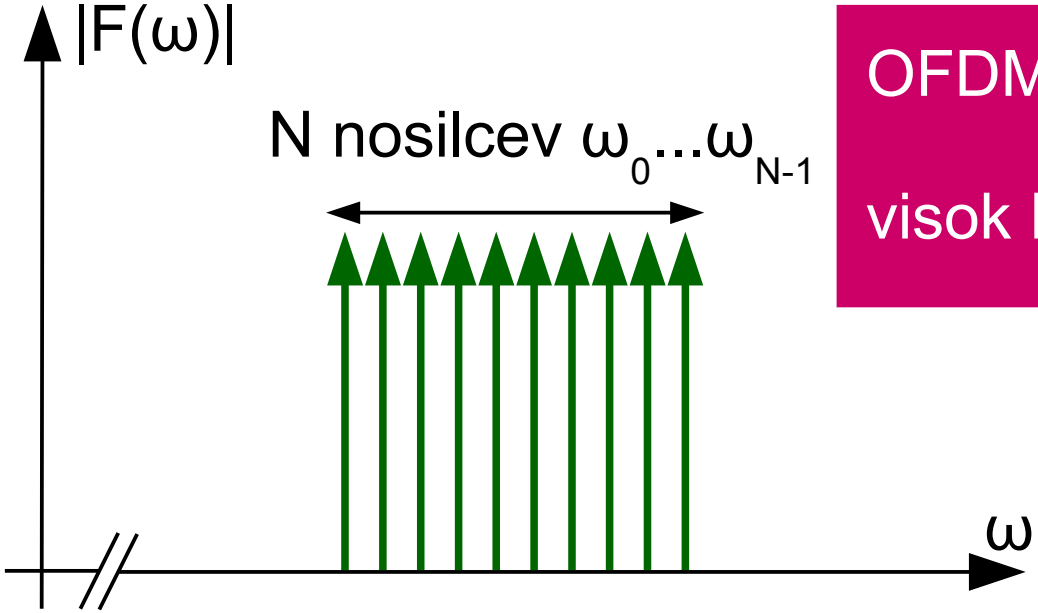


Nadomestno vezje



AM/PM pretvorba ne ustvarja novih frekvenčnih komponent niti ne spreminja amplitude spektra |F(ω)| IMD3

FWM v svetlobnem vlaknu je samo modulacija faze φ(P) brez sprememb amplitude



OFDM običajno N = 48...27265 nosilcev:

visok PAPR = N → slab izkoristek η_{TX}

Veliko število neodvisnih nosilcev → Gauss-ova statistika

Moč enega nosilca ≡ P_0

Povprečna moč signala ≡ <P> = N•P_0

Vršna moč signala ≡ $P_{MAX} = N^2 \bullet P_0$

Razmerje vršna/povprečna moč ≡

≡ Peak-to-Average Power Ratio ≡

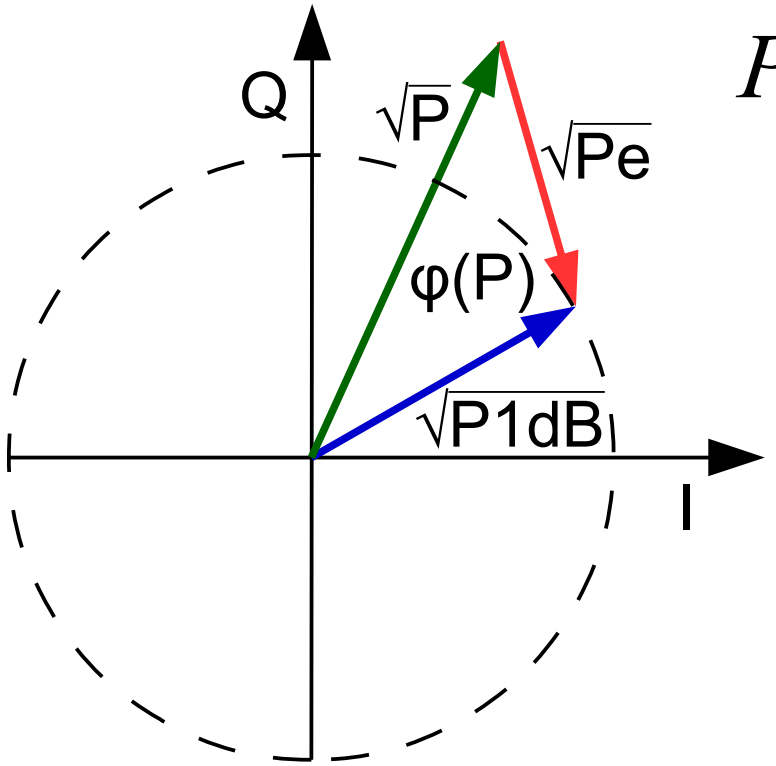
≡ PAPR = P_{MAX} /<P> = $(N^2 \bullet P_0)/(N \bullet P_0) = N$

Rayleigh-ova porazdelitev gostote verjetnosti moči:

$$p(P) = \frac{1}{\langle P \rangle} \cdot e^{-\frac{P}{\langle P \rangle}}$$

Pogostnost zelo velikih moči nad <P> je zelo majhna!

Smiselna moč $P_{MAX} \approx P_{1dB}$=?



$$P_e = P + P_{1dB} - 2\sqrt{P \cdot P_{1dB}} \cos\phi(P)$$

$$\langle P_e \rangle = \int_0^{\infty} P_e \cdot p(P)\, dP$$

Groba ocena Pe>0 samo pri $P > P_{1dB} \approx P_{SAT}$

$$P_e \approx P \rightarrow \langle P_e \rangle \approx \int_{P_{1dB}}^{\infty} \frac{P}{\langle P \rangle} \cdot e^{-\frac{P}{\langle P \rangle}} dP$$

Error Vector Magnitude

$$EVM = \sqrt{\frac{\langle P_e \rangle}{\langle P \rangle}}$$

$$EVM \approx \sqrt{\left(\frac{P_{1dB}}{\langle P \rangle} + 1\right) \cdot e^{-\frac{P_{1dB}}{\langle P \rangle}}}$$

$\log(P_{1dB}/\langle P \rangle)$	EVM
0dB	86%
5dB	42%
10dB	2.2%
15dB	0.000078%
20dB	1.9E-19%