

# Měření nelineárních parametrů

### A. Popis nelineárních jevů

- Přenosové charakteristiky obvodů mohou být z mnoha důvodu nelineární.
- Použité komponenty vykazují závislosti některých parametrů na napětí nebo proudu (např.  $C = f(u)$ ,  $R = f(i)$ ,  $g_m = f(u)$ , apod.), mají nelineární VA charakteristiky.
- Nejčastěji VF a mikrovlonné obvody používající jakékoliv diody nebo tranzistory.
- Ale i vlivy nelinearity vznikajících na styků 2 nevhodně použitých kovů v konektorech.
- Aktivní použití nelineárních jevů - detektory, násobiče frekvence, směšovače.
- Často ale způsobují nemalé a někdy jen velmi nákladně řešitelné problémy.
  - Každý nelineární obvod generuje více nebo méně všechny nelineární produkty.
  - Jednotlivé typy nelineárních obvodů (zesilovače, směšovače, násobiče frekvence, detektory, apod.) se přitom v podstatě liší jen tím, na který produkt je ten určitý obvod optimalizován.
  - Obvody jsou navrhovány tak, aby požadovaný produkt nebo produkty byly dominantní a všechny ostatní byly co nejlépe potlačeny.
- V nelineárních obvodech vzniká často obrovské množství nelineárních produktů, a to tím více, čím širší je pracovní pásmo a kolik spektrálních čar je na vstupu.
- Například v systému CATV (rozvod kabelové TV) s cca 40 analogovými TV kanály spadá do 1 kanálu až několik set IM produktů 2. řádu a až několik tisíc produktů 3. řádu.
- Příliš vysoké IM produkty jsou v případě analogových TV kanálů viditelné jako velmi nepříjemné šikmé proužky na obraze. V případě digitálně přenášené TV zvyšují chybovost přenosu.

Typy produktů:

- nevznikají nové frekvence - komprese, křížová modulace
- vznikají nové frekvence - intermodulační produkty, vyšší harmonické
- ss produkt = detekce

Popis nelinearity pomocí polynomiální aproximace:

$$u_{out}(t) = k_1 u_{in}^1(t) + k_2 u_{in}^2(t) + k_3 u_{in}^3(t) + \dots \quad \text{B.1}$$

Vstupní signál - součet 3 spektrálních čar, použito zjednodušení:

$$a = \omega_a t + \varphi_a, \quad b = \omega_b t + \varphi_b, \quad c = \omega_c t + \varphi_c \quad \text{B.2}$$

$$u_{in}(t) = A \cos(\omega_a t + \varphi_a) + B \cos(\omega_b t + \varphi_b) + C \cos(\omega_c t + \varphi_c) = A \cos a + B \cos b + C \cos c \quad \text{B.3}$$

### Produkty 1. řádu

$$k_1 u_{in}^1(t) = k_1 (A \cos a + B \cos b + C \cos c) \quad \text{B.4}$$

### Produkty 2. řádu

$$k_2 u_{in}^2(t) = \frac{k_2}{2} (A^2 + B^2 + C^2) + \quad \text{detekce} \quad \text{B.5}$$

$$+ k_2 [AB \cos(\pm a \pm b) + AC \cos(\pm a \pm c) + BC \cos(\pm b \pm c)] + \quad \text{IM pr. typu } a \pm b \quad \text{B.6}$$

$$+ \frac{k_2}{2} (A^2 \cos 2a + B^2 \cos 2b + C^2 \cos 2c) \quad \text{2. harm., typ 2a} \quad \text{B.7}$$

### Produkty 3. řádu

$$k_3 u_{in}^3(t) = \frac{k_3}{4} (A^3 \cos 3a + B^3 \cos 3b + C^3 \cos 3c) + \quad \text{3. harm., typ 3a} \quad \text{B.8}$$

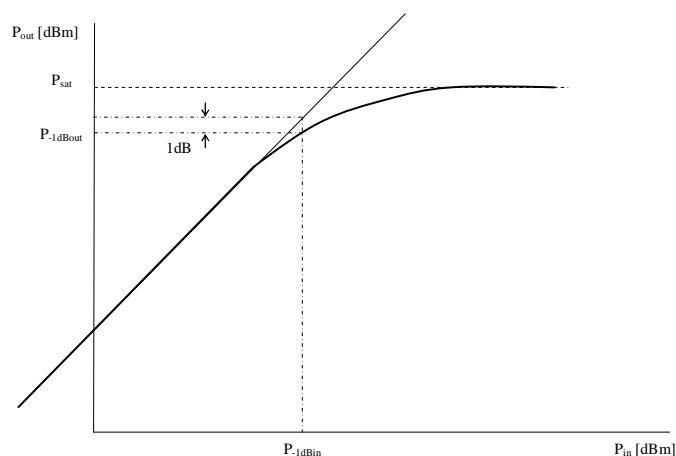
$$+ \frac{3k_3}{4} \left[ A^2 B \cos(2a \pm b) + A^2 C \cos(2a \pm c) + B^2 A \cos(2b \pm a) + B^2 C \cos(2b \pm c) + \right. \\ \left. + C^2 A \cos(2c \pm a) + C^2 B \cos(2c \pm b) \right] + \quad \text{IM pr. 3. ř. typu } 2a \pm b \quad \text{B.9}$$

$$+ \frac{3k_3}{4} ABC \cos(\pm a \pm b \pm c) + \quad \text{IM pr. 3. ř. typu } \pm a \pm b \pm c \quad \text{B.10}$$

$$+ \frac{3k_3}{4} (A^3 \cos a + B^3 \cos b + C^3 \cos c) + \quad \text{komprese zisku} \quad \text{B.11}$$

$$+ \frac{3k_3}{2} (AB^2 \cos a + AC^2 \cos a + BA^2 \cos b + BC^2 \cos b + CA^2 \cos c + CB^2 \cos c) \\ \text{křížová modulace} \quad \text{B.12}$$

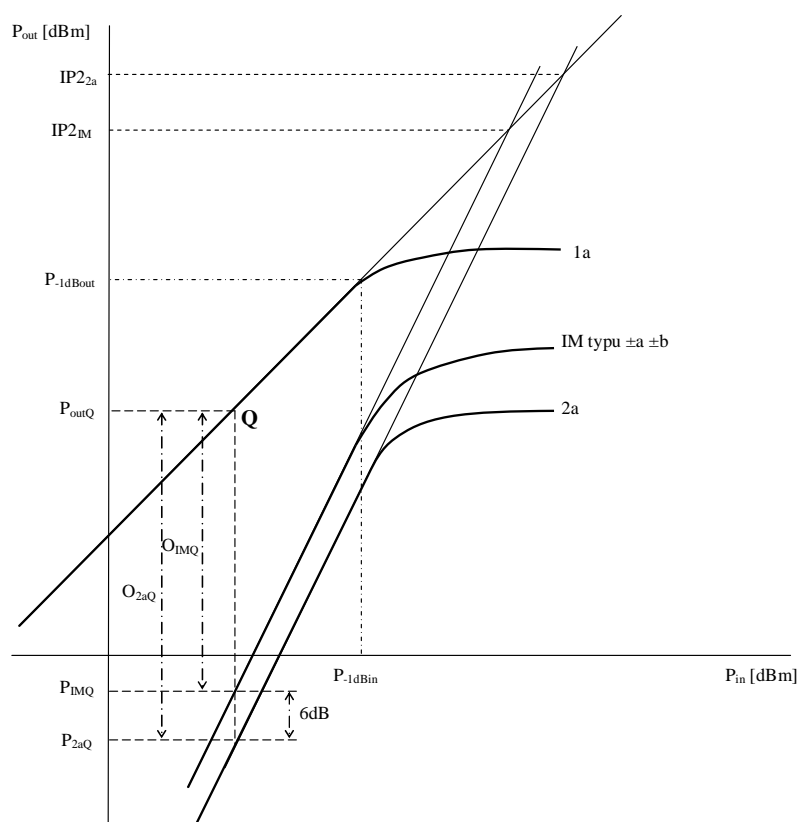
## Definice bodů -1dB komprese



Obr. B.1 Definice bodů -1dB komprese

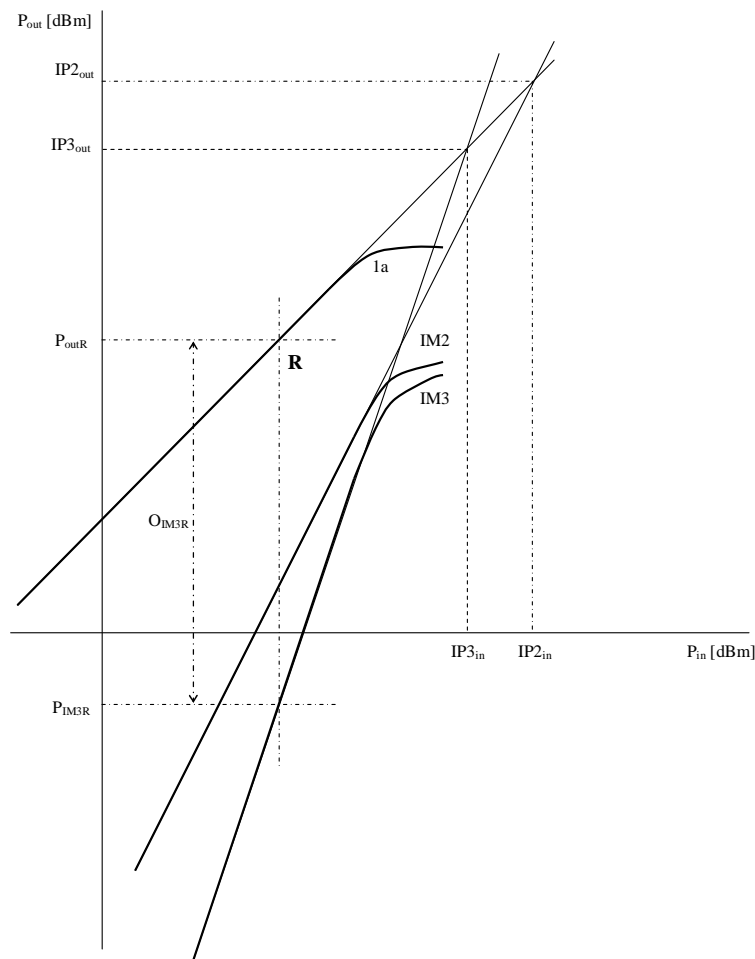
- U obvodů s kladným ziskem (zejména u zesilovačů) obvykle vztaženy k výstupu.
- U obvodů se záporným ziskem (např. směšovače) obvykle vztaženy ke vstupu.

## Definice bodů zahrazení IP



Obr. B2 Definice bodů zahrazení IP2 vztažených k výstupu

- Průsečíky extrapolovaného průběhu signálu 1. harmonické 1a s extrapolovanými průběhy příslušných IM nebo harmonických produktů.



Obr. B.3 Porovnání bodů zahrazení IP2 a IP3

- Pro funkci VF systémů jsou důležité dostatečné hodnoty odstupů nelineárních produktů vůči pracovním výstupním výkonům obvodů.

$$P_{IM2} = IP2 - 2(IP2 - P_{out}) = 2P_{out} - IP2 \quad B.13$$

$$P_{IM3} = IP3 - 3(IP3 - P_{out}) = 3P_{out} - 2IP3 \quad B.14$$

$$O_{IM2} = P_{out} - P_{IM2} = P_{out} - (2P_{out} - IP2) = IP2 - P_{out} \quad B.15$$

$$O_{IM3} = P_{out} - P_{IM3} = P_{out} - (3P_{out} - 2IP3) = 2IP3 - 2P_{out} \quad B.16$$

*Příklad:* Mikrovlnný zesilovač má změřené hodnoty  $IP2 = 17 \text{ dBm}$  a  $IP3 = 15 \text{ dBm}$ , obě měření byla provedena pro IM produkty a vzhledem k výstupu zesilovače. Jaké budou výkony IM a harmonických produktů a odstupy těchto produktů při pracovním výstupním výkonu zesilovače  $P_{out} = -8 \text{ dBm}$ ?

Výsledky byly získány dosazením do vztahů B.13 až B.16 při použití výše uvedené korekce pro produkty typů 2a a 3a, vypočtené hodnoty jsou v Tab.B.1.

$$P_{out} = -8 \text{ dBm}, IP2 = 17 \text{ dBm}, IP3 = 15 \text{ dBm}$$

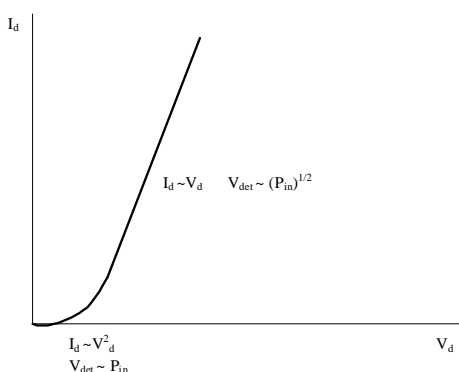
	$P_{IMx} \text{ [dBm]}$	$O_{IMx} \text{ [dBm]}$	$P_{xa} \text{ [dB]}$	$O_{xa} \text{ [dB]}$
IMx x=2	-33	25	-39	31
IMx x=3	-54	46	-63,5	55,5

Tab. B.1 Vypočtené hodnoty výkonů a odstupů IM produktů

## B. Měření nelineárních produktů

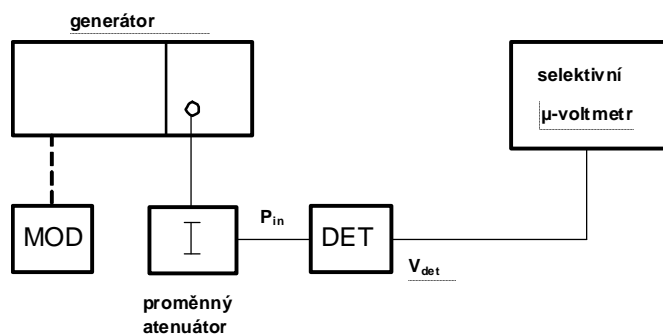
### a) Měření detektorů

Jednoduché měření, konstanta  $k_2$  ale není konstantní, s rostoucími amplitudami A, B, C klesá. Důvodem je průběh VA charakteristiky použitých detekčních diod, viz. Obr. B.4.

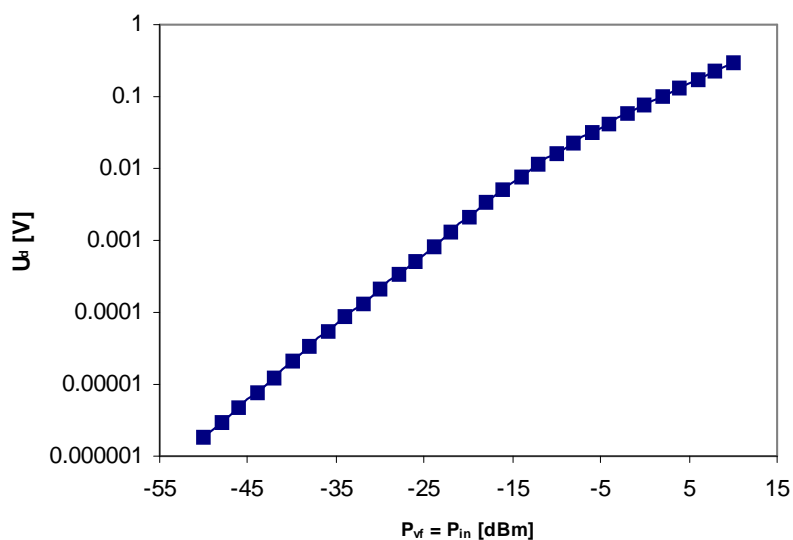


Obr. B.4 VA charakteristika detekční diody ZBS

- Převodní charakteristiky detektorů  $U_{det} = f(P_{in})$  je nutné měřit v širokém rozsahu vstupních výkonů - od šumového prahu v okolí  $P_{in} \approx -50 \text{ dBm}$  až k horní mezi  $P_{in} \leq +20 \text{ dBm}$ .



Obr. B.5 Zapojení pro měření převodních charakteristik VF detektorů



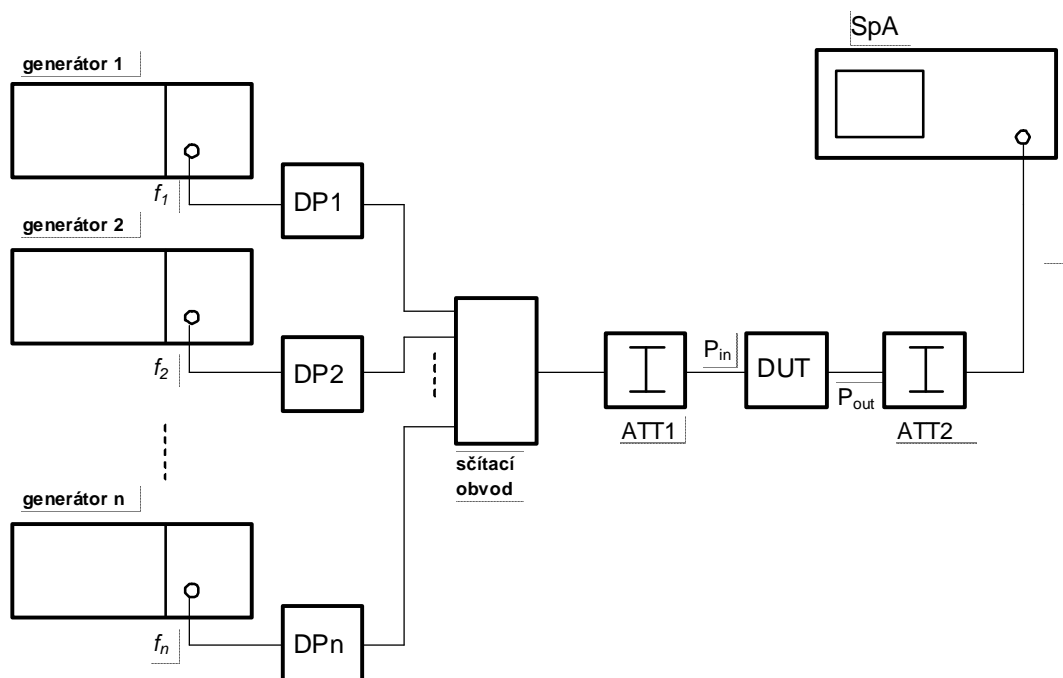
Obr. B.6 Typická naměřená převodní charakteristika VF detektoru

**b) Měření vyšších harmonických a odpovídajících IP**

Dle Obr. B7 s tím, že je zapojen jen 1 generátor.

**c) Měření IM produktů a odpovídajících IP**

Základem těchto měření jsou vždy 2 a více generátorů, jejichž výstupy jsou sloučeny do 1 výstupu, viz. Obr. B.7.



Obr. B.7 Zapojení pro měření IM parametrů

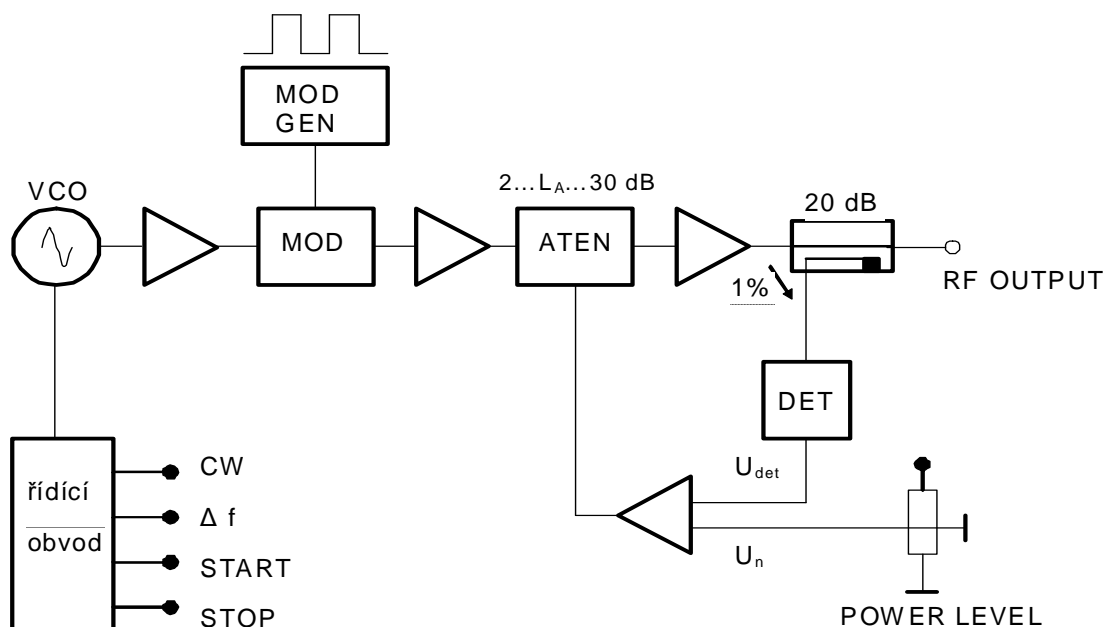
- ### d) Měření komprese zisku

[illegible]

### e) Měření křížové modulace

7

## f) Měření nelineárních parametrů generátorů



Obr. B.9 Blokové schéma VF a mikrovlnných generátorů

- Všechny výstupní obvody generují nelineární produkty, zejména vyšší harmonické, obvod ALC má omezený dynamický rozsah.
- Nutné měřit závislost jednotlivých harmonických složek (minimálně 1., 2. a 3.) na nastaveném výstupním výkonu  $P_{out}$ .

## g) Měření směšovačů

Funkce optimalizována na generaci produktů 2. řádu typu  $\pm a \pm b$  s tím, že jsou co nejvíce potlačeny všechny ostatní produkty. Důležité parametry:

$$L_k = P_{RF} / P_{IF}$$

Konverzní ztráty

$$L_k = f(P_{LO})$$

Závislost  $L_k$  na výkonu místního oscilátoru

$$L_{LO-RF} = P_{LO} / P_{LORF}$$

Izolace mezi branou LO a RF,  $P_{LORF}$  je výkon na frekvenci  $f_{LO}$  měřený na bráně RF

$$L_{LO-IF} = P_{LO} / P_{LOIF}$$

Izolace mezi branami LO a IF,  $P_{LOIF}$  je výkon na frekvenci  $f_{LO}$  měřený na bráně IF

$$L_{RF-IF} = P_{RF} / P_{RFIF}$$

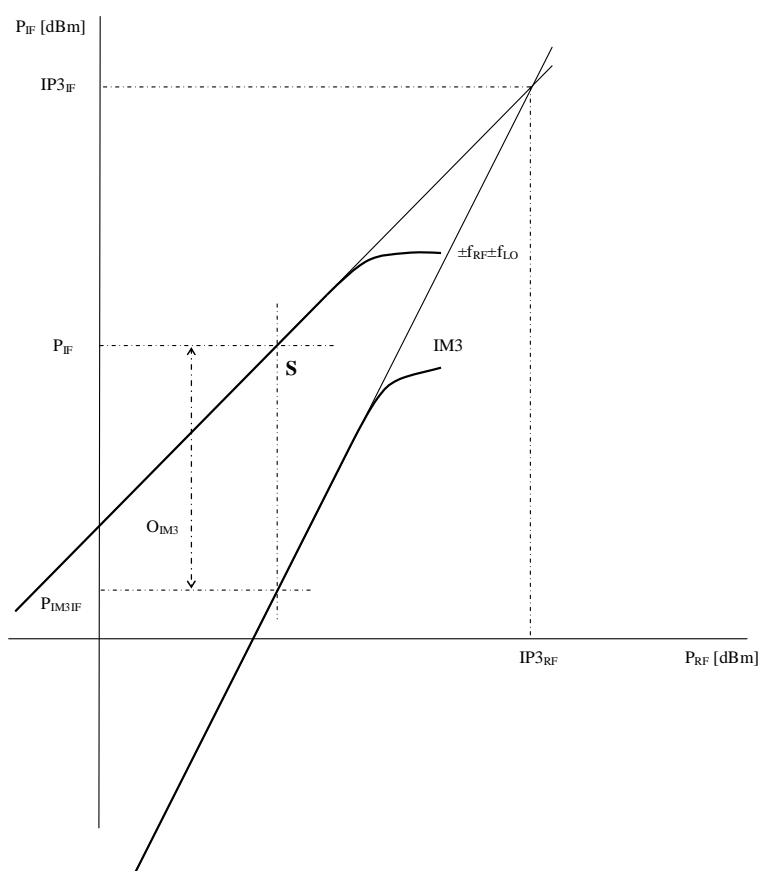
Izolace mezi branami RF a IF,  $P_{RFIF}$  je výkon na frekvenci  $f_{RF}$  měřený na bráně IF

$$P_{IF} = f(P_{RF})$$

Umožňuje určit závislost  $L_k$  na vstupním výkonu



$P_{-1dB}$	Bod -1dB komprese, lze určit z $L_k = f(P_{RF})$ jako hodnotu $P_{RF}$ , pro kterou vzrostou konverzní ztráty o 1dB
$P_{IM3IF}$	Parazitní IM produkty 3. řádu $(2f_{RF2} - f_{RF1}) \pm f_{LO}$ nebo $(2f_{RF1} - f_{RF2}) \pm f_{LO}$ jsou definovány na výstupu IF pro 2 vstupní signály s frekvencemi $f_{RF1}$ a $f_{RF2}$
$IP3_{RF}, IP3_{IF}$	Jsou dány průnikem extrapolované závislosti produktu $\pm f_{RF} \pm f_{LO}$ na výkonu vstupního signálu $P_{RF1}$ nebo $P_{RF2}$ s extrapolovanou závislostí výkonu IM složek 3. řádu $(2f_{RF2} - f_{RF1}) \pm f_{LO}$ nebo $(2f_{RF1} - f_{RF2}) \pm f_{LO}$ . Hodnota $IP3_{RF}$ je vztažena ke vstupu směřovače, hodnota $IP3_{IF}$ je vztažena k jeho IF výstupu. Tyto hodnoty se navzájem liší o $L_k$ .



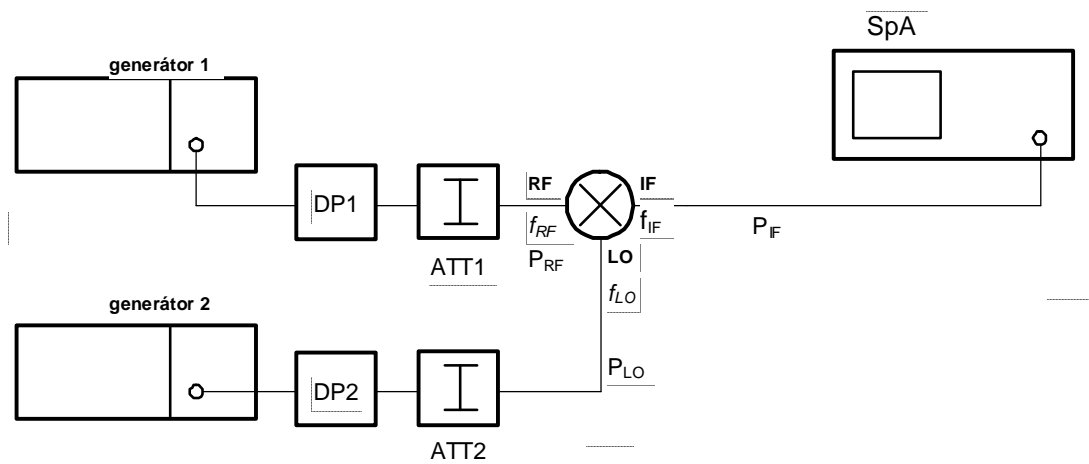
Obr. B.10 Měření  $IP3$  směšovačů

Při znalosti  $IP3$  lze vypočítat výkony nežádoucích IM složek a jejich odstupy na výstupu IF:

$$IP3_{IF} = IP3_{RF} - L_k \quad \text{B.17}$$

$$P_{IM3IF} = IP3_{IF} - 3(IP3_{RF} - P_{RF}) = 3P_{RF} - 2IP3_{RF} - L_k \quad \text{B.18}$$

$$O_{IM3IF} = P_{IF} - P_{IM3IF} = P_{IF} - (3P_{RF} - 2IP3_{RF} - L_k) \quad \text{B.19}$$

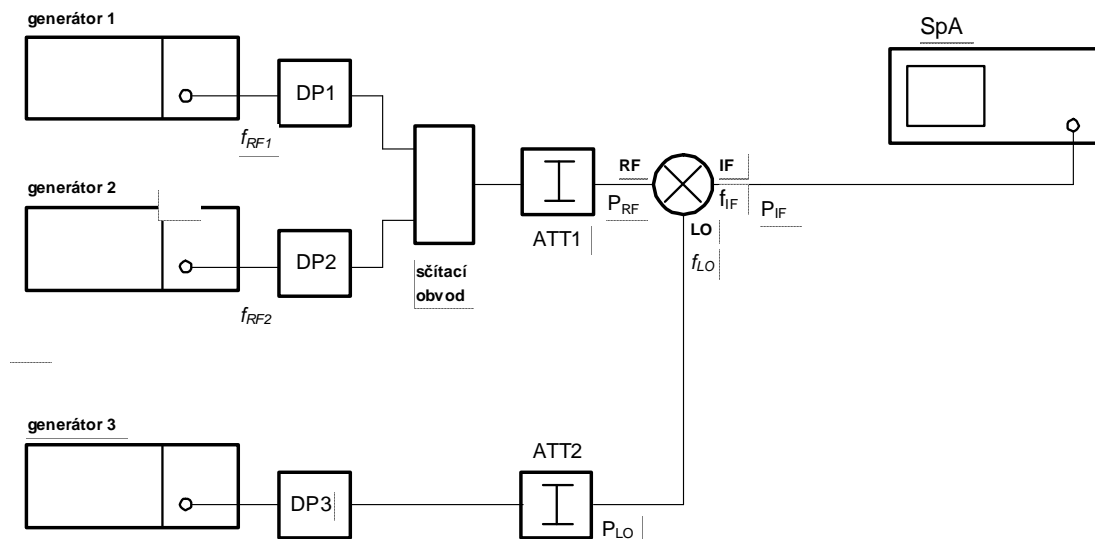


B.11 Zapojení pro základních parametrů měření směšovačů

### Měření bodu -1dB komprese směšovačů $P_{RF-1dB}$

- Měření závislosti  $P_{IF} = f(P_{RF})$ , popřípadě  $L_k = f(P_{RF})$  - z nich lze určit bod -1dB komprese směšovače, vztažený ke vstupnímu výkonu  $P_{RF}$ .

### Měření IM3, IP3 směšovačů



Obr. B.12 Zapojení pro měření IM3 a IP3 směšovačů

*Poznámka:* Vzhledem k tomu, že obě složky  $P_{RF-1dB}$  a  $IP3$  jsou stejného 3. řádu, lze použít aproximaci:

$$IP3 \cong P_{RF-1dB} + 15 \text{ dB}$$

pro diodové směšovače na nízkých frekvencích

$$IP3 \cong P_{RF-1dB} + 10 \text{ dB}$$

pro diodové směšovače na vysokých frekvencích

$$IP3 \cong P_{RF-1dB} + 10 \text{ dB}$$

pro směšovače na bázi FET