

# Laboratorní úloha č. 3

2. ČERVENCE 2023

MARTIN ŠIMÁK

---

**Téma** Měření velkosignálových vlastností mikrovlnných zesilovačů

Cílem této úlohy bylo seznámit se s měřením velkosignálových vlastností mikrovlnných zesilovačů. To zahrnuje pozorování a popis nelineárního chování jako je saturace, bod decibellové komprese a přítomnost intermodulačních produktů při směšování signálů.

## Úkoly měření

1. Bod decibellové komprese  $P_{1\text{dB}}$  zesilovačů.
2. Bod zahrazení IP3 pro složky  $2a + b$  zesilovačů.

## Použité přístroje a komponenty

- Spektrální analyzátor R&S FSP30 (9 kHz až 30 GHz)<sup>1</sup>
- Generátor R&S SMIQ 03B (300 kHz až 3,3 GHz)
- Generátor Agilent E8257D (250 kHz až 50 GHz)
- Elektronicky říditelné atenuátory HP 84904L a 84906L (0 Hz až 40 GHz)
- Koaxiální dolní propust Mini-Circuits RPS-2-30+ (0 Hz až 1050 MHz)
- Dělič výkonu/slučovač Mini-Circuits ZX10-2-20-S+ (200 MHz až 2000 MHz)
- Propojovací SMA kabel Mini-Circuits CBL-2FT-SMSM+
- Dva propojovací kabely Pasternack PE300-36

## Měřené zesilovače

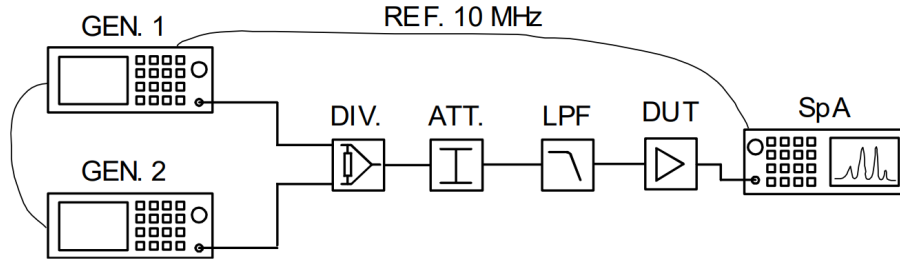
- Mini-Circuits ERA-3SM+
- Nízkošumový zesilovač s tranzistorem NXP BFU-760F

## Postup měření

Zapojení úlohy je patrné z obrázku 1. Spektrální analyzátor je s oběma generátory spojen pomocí BNC kabelů s referenčním signálem o frekvenci 10 MHz za účelem zajištění koherence generovaných signálů a detekce signálu v analyzátoru s přesnou frekvencí. Zdrojem reference je v tomto zapojení spektrální analyzátor R&S a generátory jsou nastaveny tak, aby tento externí signál braly jako referenční místo svého interního zdroje.

---

<sup>1</sup>Zápis jednotek a rozsahů hodnot pomocí slova až (angl. *to*) namísto pomlčky (–) jsem zvolil po vzoru doporučení pro zápis jednotek SI, <https://physics.nist.gov/cuu/pdf/sp811.pdf>, sekce 7.7.



Obrázek 1: Schéma zapojení úlohy

Pro měření intermodulačních produktů zesilovačů je potřeba zajistit co nejčistší výstupní signál generátorů. Na výstup externích attenuátorů je proto připojena koaxiální dolní propust VLFX-1050+. Kaskáda použitých kabelů, slučovače, attenuátorů (s útlumem nastaveným na 0 dB) a filtru je zhruba 6 dB, což kompenzujeme dostavením výkonů obou generátorů.

Jelikož měření decibelové komprese a intermodulačních produktů zesilovačů probíhá v režimu blízko saturace měřeného zesilovače, vyžaduje úloha měření relativně velkých výkonů. Lze předpokládat, že maximální měřený výkon bude 10 dBm. Analyzátor je proto potřeba nastavit tak, aby takový výkon nepřebudil vstupní obvody, zejména první směšovač. V opačném případě by vstupní obvod analyzátoru sám generoval intermodulační produkty nerozeznatelné od těch, které generuje měřený zesilovač. Jelikož všechny externí komponenty jsou obvody lineární a intermodulační produkty na nich tedy nevznikají, utlumíme je pomocí vstupního attenuátoru spektrálního analyzátoru. V tuto chvíli máme jistotu, že i při měření signálů o výkonu 10 dBm bude přijímač spektrálního analyzátoru provozován v lineárním režimu, a tak budeme decibelovou kompresi i intermodulační produkty zesilovačů měřit přesně.

**Bod decibelové komprese zesilovačů** Nejprve je třeba nastavit na obou generátorech výkony tak, aby spektrální analyzátor měřil výkony 0 dBm. Útlum attenuátorů zatím ponecháváme na 0 dB. Jen tak si můžeme být jisti, že na vstup měřených zesilovačů bude přiváděn výkon číselně roven  $-L_{\text{att}}$ , kde  $L_{\text{att}}$  je nastavený útlum externích attenuátorů.

$L_{\text{att}}$ [dB]	30	25	20	15	11	9	8	7	6	5
$P_{\text{out}}$ [dBm]	-10,5	-5,1	-0,2	4,8	8,6	10,4	11,1	11,7	12,3	12,7
$G$ [dB]	19,5	19,9	19,8	19,8	19,6	19,4	19,1	18,7	18,3	17,7

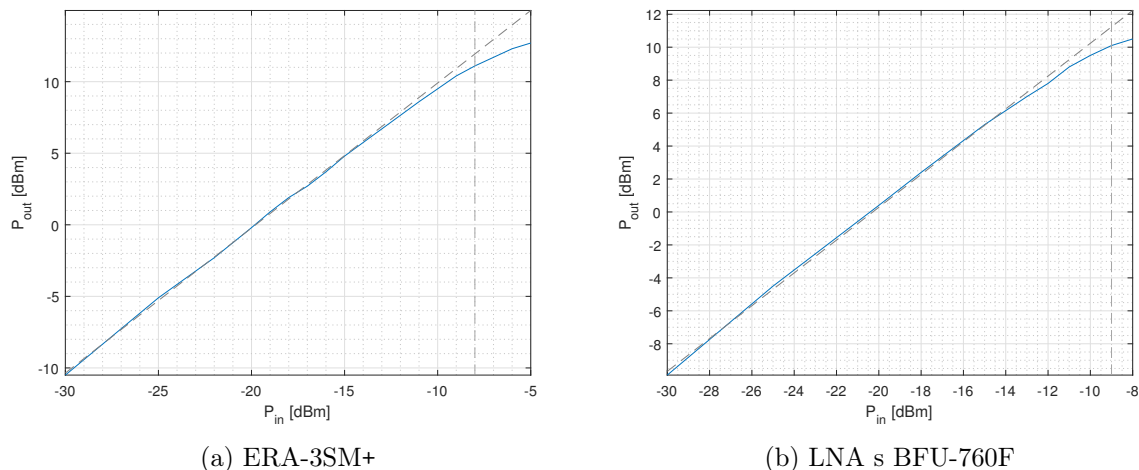
Tabulka 1: Hodnoty pro určení  $P_{\text{1dB}}$  zesilovače ERA-3SM+

$L_{\text{att}}$ [dB]	30	25	20	15	13	12	11	10	9	8
$P_{\text{out}}$ [dBm]	-9,9	-4,5	0,4	5,3	7	7,8	8,8	9,5	10,1	10,5
$G$ [dB]	20,1	20,5	20,4	20,3	20	19,8	19,8	19,5	19,1	18,5

Tabulka 2: Hodnoty pro určení  $P_{\text{1dB}}$  LNA s tranzistorem BFU-760F

Necháme zapnutý pouze generátor s frekvencí 1 GHz a za počátečního útlumu externích attenuátorů 30 dB připojíme jeden z měřených zesilovačů. Napájecí napětí zesilovače je 12 V a proudová pojistka 100 mA. Pomocí markeru na spektrálním analyzátoru s dostatečně širokým nastaveným rozsahem frekvencí (0,5 GHz až 3,5 GHz) čteme hodnoty výkonu výstupního signálu zesilovače na frekvenci 1 GHz a zřetelné jsou i vyšší harmonické složky. Další měření spočívá v

postupném snižování útlumu externích atenutátorů tak, abychom proměřili závislost výstupního výkonu zesilovače  $P_{\text{out}}$  na vstupním výkonu  $P_{\text{in}}$  až k saturaci zesilovače. Naměřené hodnoty jsou zaznamenané v tabulkách 1 a 2 pro jednotlivé zesilovače. Grafické znázornění nejprve lineárního chování zesilovačů i následné body decibelové komprese  $P_{1\text{dB}}$  a saturace jsou znázorněny na obrázcích 2a a 2b.



Obrázek 2: Grafické zpracování dat pro ilustraci decibelové komprese

Vztaženo k výstupu zesilovačů je hodnota  $P_{1\text{dB}} = 11,1 \text{ dBm}$  pro zesilovač ERA-3SM+ a pro nízkošumový zesilovač s tranzistorem BFU-760F je  $P_{1\text{dB}} = 10,1 \text{ dBm}$ .

**Bod zahrazení intermodulačními produkty třetího řádu** Schéma zapojení a nastavení vstupních obvodů spektrálního analyzátoru je ponecháno z předchozího úkolu.

Po zapnutí výstupů z obou generátorů a počátečním nastavení útlumu externích attenuátorů na  $25 \text{ dB}$ <sup>2</sup> lze na obrazovce spektrálního analyzátoru číst hodnoty výkonů základní harmonické  $P_a$  a intermodulačních produktů  $P_{2a\pm b}$ . Z toho lze dále spočítat výkonový odstup intermodulačních produktů od základní harmonické  $O_{2a\pm b}$ . Změřené a výpočtené hodnoty měření jsou zaznamenané v tabulkách 3 a 4 pro jednotlivé zesilovače. Vývoj hodnot výkonů a následný bod zahrazení IP3 pro složky  $2a \pm b$  jsou znázorněny na obrázcích 3a a 3b.

$L_{\text{att}}$ [dB]	23	20	17	15	14	11	8	7	5	2
$P_a$ [dBm]	-3,2	-0,2	2,7	4,6	5,5	7,6	8,9	9,2	9,6	10,1
$P_{2a\pm b}$ [dBm]	-60	-50,6	-40,7	-33,4	-29,7	-17,8	-10,6	-9,4	-7,5	-7,6
$O_{2a\pm b}$ [dBm]	56,8	50,4	43,4	38	35,2	25,4	19,5	18,6	17,1	17,7

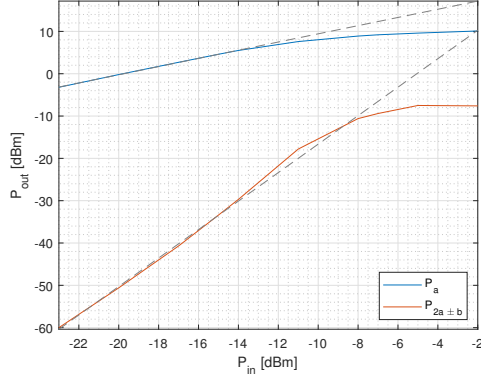
Tabulka 3: Hodnoty pro určení IP3 zesilovače ERA-3SM+

Vztaženo k výstupu zesilovačů je hodnota  $P_{\text{IP3}} = 20 \text{ dBm}$  pro zesilovač ERA-3SM+ a pro nízkošumový zesilovač s tranzistorem BFU-760F je  $P_{\text{IP3}} = 13,4 \text{ dBm}$ .

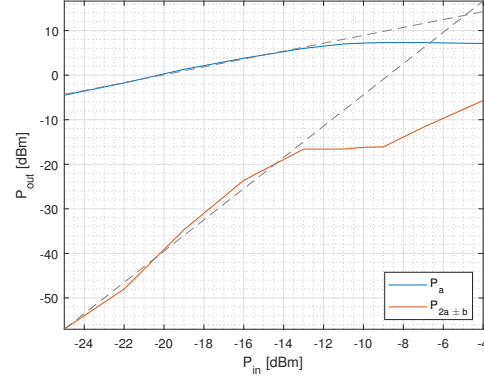
<sup>2</sup>Na doporučených 30 dB nebyly intermodulační produkty ještě dostatečně čitelné z šumového pozadí.

$L_{att}$ [dB]	25	22	19	16	13	11	10	9	7	4
$P_a$ [dBm]	-4,5	-1,75	1,3	3,8	6	7	7,2	7,3	7,3	7,1
$P_{2a\pm b}$ [dBm]	-57	-48	-34,7	-23,6	-16,6	-15,6	-16,2	-16,1	-11,7	-5,7
$O_{2a\pm b}$ [dBm]	52,5	46,25	36	27,4	22,6	23,1	22,8	23,5	19	12,8

Tabulka 4: Hodnoty pro určení IP3 LNA s tranzistorem BFU-760F



(a) ERA-3SM+



(b) LNA s BFU-760F

Obrázek 3: Grafické zpracování dat pro ilustraci zahrazení IM3

## Závěr

V rámci úlohy jsme se seznámili se základy měření velkosignálových vlastností mikrovlnných zesilovačů jako jsou bod decibellové komprese a bod zahrazení IP3. Během úlohy jsme nenarazili na žádné výrazné překážky, a tak se nám podařilo ověřit teoretické poznatky o dynamickém rozsahu mikrovlnných systémů.

Měřením byly zjištěny hodnoty  $P_{1dB} = 11,1$  dBm,  $P_{IP3} = 20$  dBm pro zesilovač ERA-3SM+ a pro LNA s tranzistorem BFU-760F hodnoty  $P_{1dB} = 10,1$  dBm,  $P_{IP3} = 13,4$  dBm.

Dlužno podotknout, že v případě bodu decibellové komprese se jedná přímo o reálné hodnoty výstupního výkonu zesilovačů, zatímco bod IP3 je samozřejmě pouze teoretickou hodnotou, která byla získána jako průsečík extrapolovaných lineárních tendancí zesilovače na cílové frekvenci a na frekvenci intermodulačního produktu 3. řádu před jejich deklinacemi.