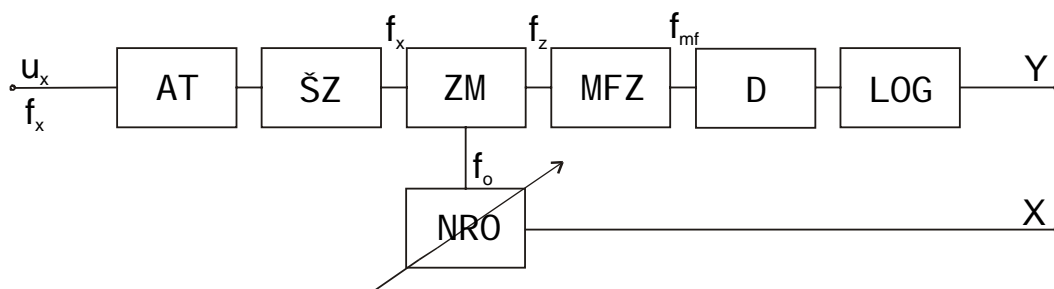


1. Spektrálny analyzátor – frekvenčné spektrá signálov

Spektrálny analyzátor HAMEG

Spektrálny analyzátor je základné meracie zariadenie používané v elektromagnetickej kompatibilite (EMC). Využitím jeho vlastností možno vytvoriť množstvo meraní vlastností elektronických zariadení z pohľadu EMC. V ďalšom texte si rozoberieme princíp a použitie spektrálneho analyzátoru HAMEG, pričom sa predpokladá zvládnutie zásad merania pomocou osciloskopu a základné princípy činnosti osciloskopu.



Obr. 1. Bloková schéma spektrálneho analyzátoru

Analyzovaný vstupný signál s napätovou úrovňou u_x a frekvenciou f_x sa privádza na vstup atenuátora **AT**. Atenuátor je v podstate presný napätový delič nezávislý od frekvencie. Vstupná impedancia atenuátora je 50Ω . Signál sa v atenuátore upraví tak, aby bol vhodný pre ďalšie spracovanie, t.j. utlmí sa v prípade vysokej úrovne vstupného napätia. Naopak, ak zoslabenie nie je potrebné, atenuátor sa môže vyradiť. Môžeme teda povedať, že tlenie atenuátora rozhoduje o vstupnom rozsahu spektrálneho analyzátoru. Pri spektrálnych analyzátoroch HAMEG sa vstupné tlenie môže nastaviť od 0 do 40dB štyrmi prepínačmi, pričom zatlačením každého z nich sa vstupný signál zoslabí o 10dB.

Takto upravený signál postupuje do širokopásmového zosilňovača **ŠZ**, kde sa zosilní na napätie potrebné pre korektnú činnosť zmiešavača **ZM**. Zosilnenie širokopásmového zosilňovača dané úrovňou tohto napätia je v celom frekvenčnom rozsahu ($0 \div 500\text{MHz}$) konštantné a určuje citlivosť spektrálneho analyzátoru.

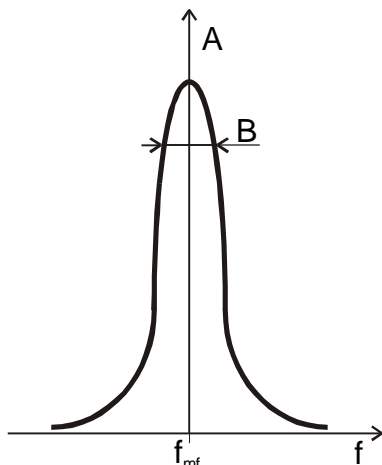
Na druhý vstup zmiešavača prichádza signál s frekvenciou f_o z preladiateľného oscilátora **NRO**. Frekvencia tohto oscilátora závisí od signálu z generátora riadiaceho napätia, t.j. ide o napätím riadený oscilátor. Generátor riadiaceho napätia má podobnú funkciu ako generátor časovej základne pri osciloskope – zabezpečuje pohyb lúča po obrazovke spektrálneho analyzátoru, pričom pri spektrálnych analyzátoroch HAMEG je ich priamou súčasťou.

Zmiešavač je v podstate nelineárny prvok, na výstupe ktorého po privedení signálov s frekvenciami f_x a f_o vznikajú ďalšie signály s frekvenciami odvodenými od vstupných frekvencií :

$$f_z = m.f_x \pm n.f_o,$$

kde m, n sú prirodzené čísla. Najzaujímavejšou kombináciou vstupných frekvencií pre ďalšiu činnosť spektrálneho analyzátoru je $(f_o - f_x)$.

Signál zo zmiešavača ďalej postupuje do medzifrekvenčného zosilňovača **MFZ**. Je to špeciálny úzkopásmový zosilňovač, ktorý by mal zosilniť len signál s frekvenciou f_{mf} . V skutočnosti však zosilňuje aj signály s frekvenciami blízkyimi medzifrekvenčnej, závisí to od šírky pásma tohto zosilňovača (pozri obr. 2). Ak sa teda na vstupe medzifrekvenčného zosilňovača vyskytuje signál s frekvenciou f_{mf} , spolu s blízkyimi frekvenciami sa zosilní, pričom ostatné frekvencie sa potlačia. Šírka pásma spektrálnych analyzátorov HAMEG je štandardne 250kHz, pomocou tlačidla sa však dá prepnúť aj na 12,5kHz.



Obr. 2. Amplitúdovo-frekvenčná charakteristika medzifrekvenčného zosilňovača

Takto upravený vysokofrekvenčný signál sa v demodulátore **D** transformuje na jednosmerný a zlogaritmuje sa v logaritmickom člene **LOG**, aby sme na zvislej osi mohli odčítavať v pomerových jednotkách – decibeloch nad mikrovoltom – dB μ V. Výstup **Y** je pripojený na vstup Y osciloskopu a výstup **X**, na ktorý je pripojený signál z generátora riadiaceho napätia, na vstup X osciloskopu.

Princíp činnosti spektrálneho analyzátoru

Ak na svorku **X** pripojíme napätie pilovitého priebehu, frekvencia oscilátora **NRO** sa mení v tom istom rytme ako vychyľovanie lúča v horizontálnom smere na osciloskope, a teda každej polohe lúča na obrazovke zodpovedá určitá frekvencia generátora. Ak na vstup spektrálneho analyzátoru pripojím signál s ľubovoľným frekvenčným spektrom, v danom čase pri frekvencii f_o oscilátora **NRO** medzifrekvenčný zosilňovač **MFZ** prepustí len frekvenciu :

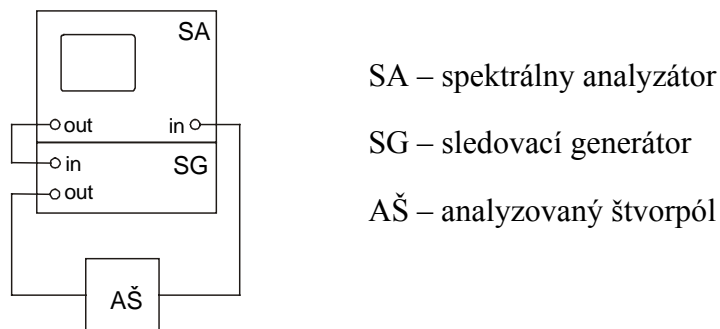
$$f_{mf} = f_o - f_x$$

t.j. na výstup **Y** sa dostane signál prislúchajúci frekvencii :

$$f_x = f_o - f_{mf}$$

Keďže frekvencia f_o sa pri vychyľovaní mení, na obrazovke osciloskopu dostávame frekvenčné spektrum meraného signálu.

Doplňkom spektrálnych analyzátorov HAMEG je aj sledovací (tracking) generátor. Je tvorený zosilňovačom, ktorého vstup tvorí signál s frekvenciou $(f_o - f_{mf})$. Tento signál sa podľa potreby môže zoslabiť sadou štyroch atenuátorov po 10dB.



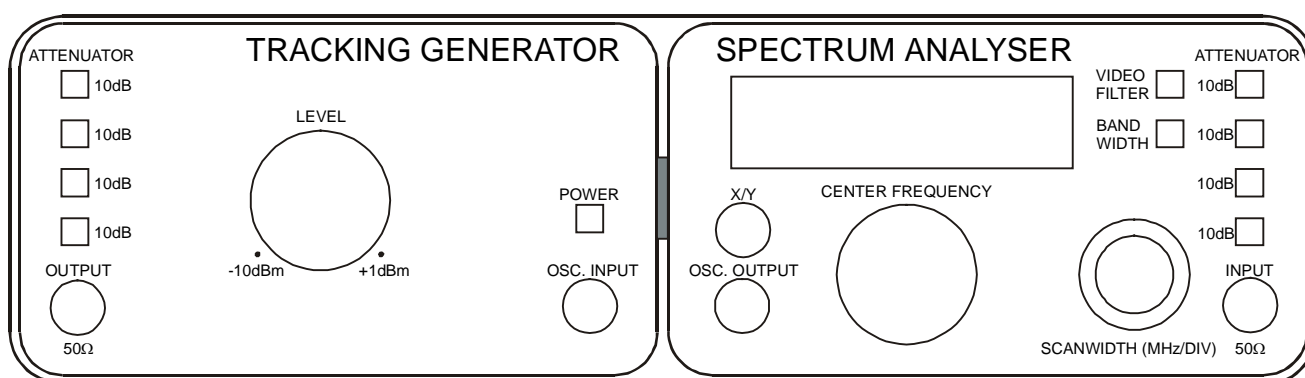
Obr. 3. Bloková schéma pracoviska na meranie frekvenčných charakteristík

Sledovací generátor sa využíva najmä pri zisťovaní frekvenčných charakteristík prvkov (v podstate štvorpólov). Na vstup štvorpólu sa privádza zosilnený rozmiataný signál zo sledovacieho generátora a z výstupu štvorpólu sa odoberá signál na vstup spektrálneho analyzátor. Takýmto spôsobom možno ľahko získať vizuálne zobrazenie frekvenčných charakteristík štvorpólov.

Problémom ostáva už len definovanie referenčných úrovní jednotlivých osí osciloskopu, horizontálnej v MHz (resp. kHz) a vertikálnej v dB μ V.

Ovládanie spektrálneho analyzátor

Existujú dva druhy spektrálnych analyzátorov HAMEG - stavebnica spektrálny analyzátor + osciloskop a spektrálny analyzátor ako samostatné vyhotovenie, pričom obe sú schopné spracovávať signály s maximálnou amplitúdou 120dB μ V t.j. 1V a frekvenciou do 500MHz.



Obr. 4. Predný panel spektrálneho analyzátoru HAMEG so sledovacím generátorom

Základné prvky na ovládacom paneli spektrálneho analyzátoru (pozri obr. 4) sú:

X/Y – výstup stereo BNC konektorom na osciloskop (svorky **X** a **Y**, pozri obr. 1);

OSC OUT – výstup signálu s frekvenciou ($f_o - f_m$) pre potreby sledovacieho generátora;

INPUT 50 Ω – vstup spektrálneho analyzátoru so vstupnou impedanciou 50 Ω ,

CENTER FREQUENCY – potenciometer, ktorým sa nastavuje hodnota frekvencie zobrazovaného spektra v strede tienidla obrazovky; na displeji nad týmto potenciometrom sa číselne zobrazuje hodnota tejto frekvencie;

SCANWIDTH (MHz/DIV) – prepínač, ktorým sa mení frekvenčná mierka na horizontálnej osi, údaje na prepínači sú v MHz/dielik; (v jednej osi s ním sa nachádza potenciometer na plynulú zmenu zosilnenia medzifrekvenčného zosilňovača, pozri **IF-GAIN**);

ATTENUATOR – sada prepínačov na utlmenie vstupného signálu, zatlačením každého z nich dôjde k zoslabeniu úrovne vstupného signálu o 10dB; ak sú všetky štyri tlačidlá stlačené, vstupný rozsah je 40 ÷ 120dB μ V, (v prípade, že atenuátory nie sú zaradené do meracieho reťazca je vstupný rozsah 0 ÷ 80dB μ V);

BANDWIDTH – tlačidlo, stlačením ktorého sa prepína šírka pásma medzifrekvenčného zosilňovača z 250kHz na hodnotu 12,5kHz; pri šírke pásma 12,5kHz však dochádza k chybe merania*;

VIDEOFILTER – tlačidlo, ktorého stlačením sa odstráni šum z meraného priebehu, avšak pri jeho aplikácii dochádza k chybe merania*;

* Chyba merania je spôsobená tým, že pri zmene meracieho reťazca sa tento reťazec stáva nekalibrovaným, čo signalizuje LED-dióda UNCAL.

IF-GAIN – potenciometer slúžiaci k plynulej zmene zosilnenia medzifrekvenčného zosilňovača v rozsahu 10dB, čím posúvame merané spektrum po obrazovke vo vertikálnom smere;

Spektrálne analyzátory ako samostatné vyhotovenie (so zobrazovačom) obsahujú navyše funkciu - **MARKER** – potenciometer, ktorým sa nastavuje poloha značky na obrazovke spektrálneho analyzátora pri aktivovaní tejto funkcie prepínačom **ON/OFF**, v tomto režime sa na displeji zobrazuje frekvencia prislúchajúca polohe značky v MHz.

Základné prvky na ovládacom paneli sledovacieho generátora sú:

OSC. INPUT – vstup do sledovacieho generátora;

OUTPUT 50Ω – výstup zo sledovacieho generátora;

POWER – tlačidlo, ktorým sa zapína sledovací generátor;

ATTENUATOR – sada prepínačov s rovnakou funkciou ako pri spektrálnom analyzátore, utlmuje sa však výstupný signál;

LEVEL – plynulá zmena zoslabenia úrovne výstupného signálu, pri neaktívnych atenuátoroch je v ľavej krajnej polohe nastavená úroveň $-10dBm$ a v pravej krajnej polohe hodnota $+1dBm$.

Nastavenie osciloskopu

Aby spektrálny analyzátor ako stavebnica zobrazoval korektný priebeh meraného spektra je potrebné v prvom rade nastaviť pripojený osciloskop :

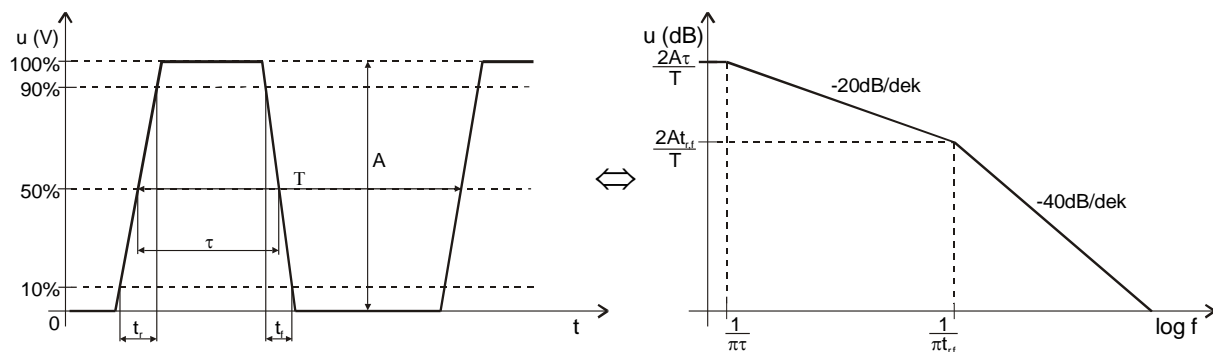
- zapnúť osciloskop a spektrálny analyzátor;
- osciloskop prepnúť do režimu XY;
- oba vstupy (X aj Y) prepnúť na jednosmernú väzbu (DC);
- nastaviť citlivosť oboch kanálov na 0,5 V/dielik;
- skontrolovať aretácie vstupných deličov osciloskopu a v prípade, že nie sú, tak nastaviť do kalibrovannej polohy;
- pri skratovaných vstupoch nastaviť stopu do stredu tienidla obrazovky;
- pripojiť výstup spektrálneho analyzátora (svorka X/Y), modrý vodič na kanál CH1, červený vodič na kanál CH2;
- zapnúť spektrálny analyzátor;
- merať.

Pri meraní samostatným spektrálnym analyzátorom sa vynechajú všetky úkony až na zapnutie spektrálneho analyzátora a samotné meranie.

Spektrá číslicových signálov

Z teórie šírenia elektromagnetických vln vieme, že intenzita elektrického poľa (a teda aj magnetického poľa) je nepriamo úmerná *vlnovej dĺžke* a vzdialenosti. To znamená, že so zvyšujúcou sa frekvenciou signálu sa zvyšuje aj hodnota intenzity elm. poľa v danej vzdialenosti a zvyšuje sa aj riziko ovplyvňovania okolitých elektrických zariadení.

V číslicovej technike, kde sa snažíme dosahovať čo najvyššie rýchlosti, mnohokrát zabúdame na tieto zákonitosti. Ak si časové priebehy číslicového signálu pretransformujeme pomocou Fourierovej transformácie do frekvenčnej oblasti (pozri *obr. 5*), dostávame obálku frekvenčného spektra daného signálu. Táto obálka spektra obsahuje dva zlomy – frekvencia f_1 prvého zlomu je nepriamo úmerná trvaniu impulzu t_i a frekvencia f_2 druhého zlomu je nepriamo úmerná trvaniu nábežnej t_r resp. dobežnej t_f hrany, pričom sa uplatňuje rýchlejšia hrana. Z *obrázku 5* vidíme, že pri veľmi rýchlych nábežných resp. dobežných hranách číslicového signálu majú vyššie harmonické pomerne vysokú amplitúdu, a teda riziko vyžiarovania nežiaducej energie sa zvyšuje.



Obr. 5. Typický číslicový signál a jeho frekvenčné spektrum

Preto, ak nie je nevyhnutné, používame signály s nižšou frekvenciou, a snažíme sa o spomalenie hrán signálu, či už použitím pomalších obvodov alebo prídavných filtrov.

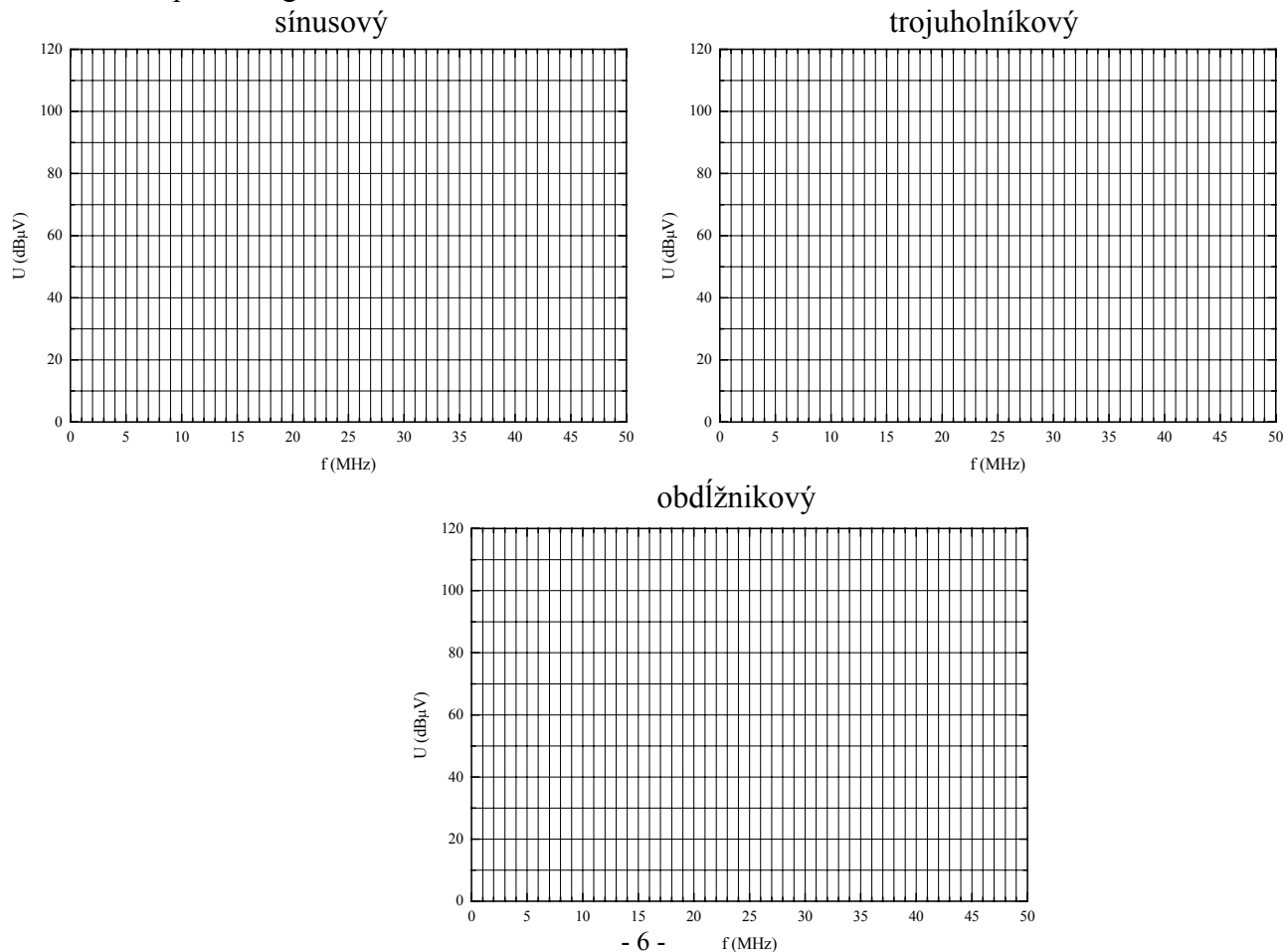
Spektrálny analyzátor – frekvenčné spektrá signálov (praktická časť)

1. Oboznámte sa s funkciou spektrálneho analyzátoru HAMEG HM8028.
2. Zmerajte šírku pásma medzifrekvenčného zosilňovača spektrálneho zosilňovača pre pokles zosilnenia o 6dB pri oboch polohách prepínača BANDWIDTH.
3. Odmerajte frekvenčné spektrá sínusového (harmonického), trojuholníkového a obdĺžnikového signálu s definovanou amplitúdou.
4. Odmerajte časy nábežných a dobežných hrán a trvania impulzov výstupných signálov z logických hradiel TTL, STTL a CMOS pri frekvencii vstupného signálu $f = 1\text{MHz}$.
5. Zakreslite frekvenčné spektrá výstupných signálov z logických hradiel TTL, STTL a CMOS pri frekvencii vstupného signálu $f = 1\text{MHz}$.
6. Pre logické hradlo TTL (prípadne STTL, CMOS) vyšetrite vplyv pridania RC filtrov do výstupov logického hradla na spomínané časy a frekvenčné spektrum signálu.
7. Overte, či teória o transformácii logického signálu z časovej do frekvenčnej oblasti je pre účely EMC akceptovateľná.

Šírka pásma medzifrekvenčného zosilňovača SA je :

poloha prepínača BANDWIDTH	B(kHz)
12,5kHz	
250kHz	

Frekvenčné spektrá signálov :

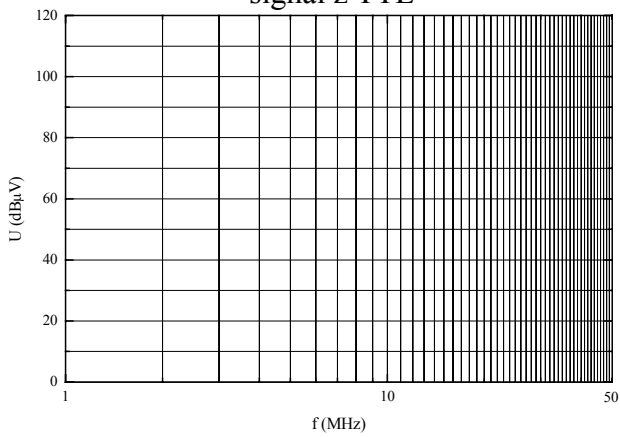


Namerané hodnoty použitím osciloskopu :

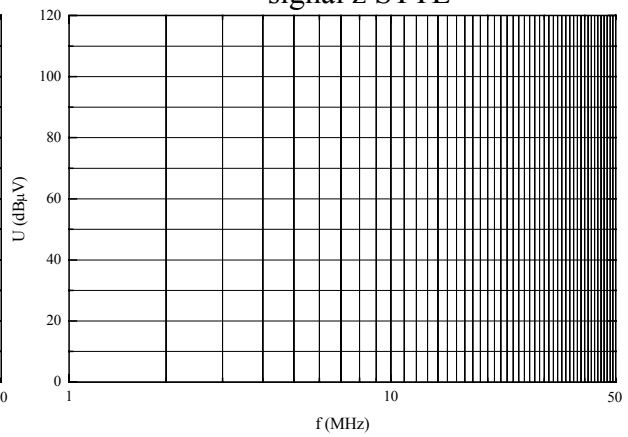
Výstup	t_i (μ s)	t_r (ns)	t_f (ns)	f_1 (kHz)	f_2 (MHz)
z TTL					
z STTL					
z CMOS					
z pri použití filtra 1					
z pri použití filtra 2					

Namerané frekvenčné spektrá signálov pomocou spektrálneho analyzátoru :

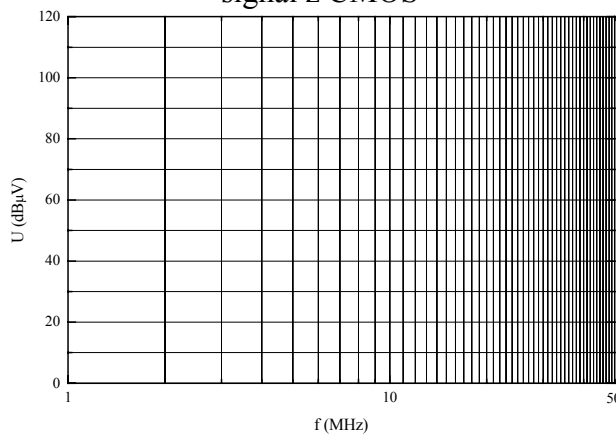
signál z TTL



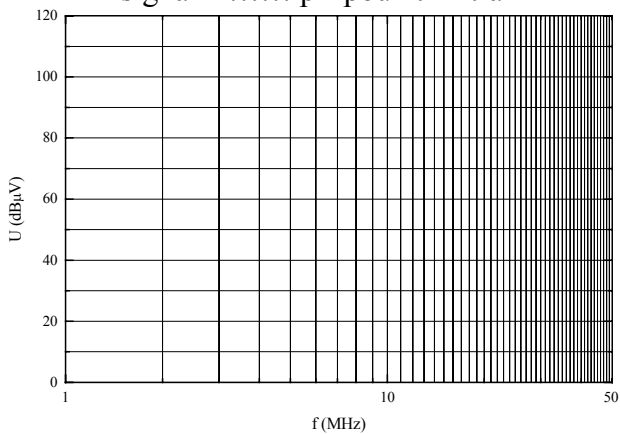
signál z STTL



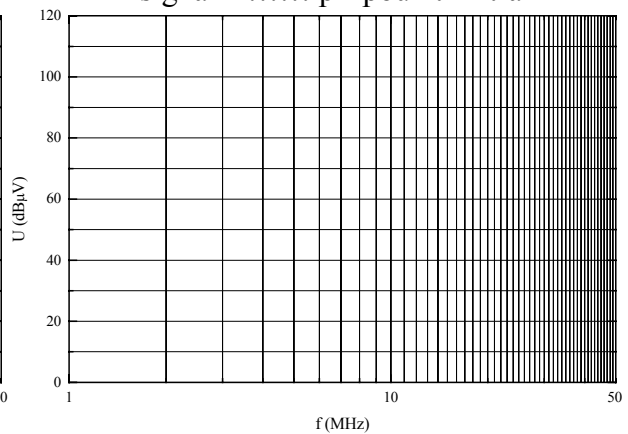
signál z CMOS



signál z pri použití filtra 1



signál z pri použití filtra 2



Porovnanie výsledkov získaných výpočtom z meraní pomocou osciloskopu a meraním pomocou spektrálneho analyzátora :

výstup	<i>Získané</i>			
	výpočtom		sp. analyzátorom	
	f ₁ (kHz)	f ₂ (MHz)	f ₁ (kHz)	f ₂ (MHz)
z TTL			-	
z STTL			-	
z CMOS			-	
z pri použití filtra 1			-	
z pri použití filtra 2			-	

Poznanky pre budúcnosť :

Príloha

Jednotky používané v elektromagnetickej kompatibilite

Nakoľko v elektromagnetickej kompatibilite (podobne ako vo vf technike) je potrebné obsiahnuť niekoľko rádov ($10^2 \div 10^6$), málokedy sa používajú jednotky ako watt –W, volt –V, ampér –A, a pod. Namiesto nich sa používajú jednotky **pomerové** t.j. vzťahnuté k vopred definovanej vzťažnej hodnote, ako napríklad dB, dBm (dB_m), dB μ V (dB _{μ V}), dB μ A (dB _{μ A}) a pod.

Decibel je definovaný ako **logaritmus pomeru dvoch výkonov** P_1 a P_2 :

$$\text{dB} = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2}$$

Taktiež možno decibel definovať pomocou pomeru dvoch napätí U_1 a U_2 :

$$\text{dB} = 10 \cdot \log \frac{U_1^2 / Z_1}{U_2^2 / Z_2} = 10 \cdot \log \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_2}; \quad \text{pre } Z_1 = Z_2$$

alebo pomocou pomeru dvoch prúdov I_1 a I_2 :

$$\text{dB} = 10 \cdot \log \frac{I_1^2 \cdot Z_1}{I_2^2 \cdot Z_2} = 10 \cdot \log \left(\frac{I_1}{I_2} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{I_1}{I_2}; \quad \text{pre } Z_1 = Z_2$$

Ak namiesto hodnoty P_2 (U_2, I_2) dosadíme referenčnú hodnotu výkonu (napätia, prúdu) dostávame nasledovné pomerové jednotky používané v EMC :

Jednotka	Definícia	Referenčná hodnota
dBm	$= 10 \cdot \log \frac{P}{1\text{mW}}$	1 mW
dB μ V	$= 20 \cdot \log \frac{U}{1\mu\text{V}}$	1 μ V
dB μ A	$= 20 \cdot \log \frac{I}{1\mu\text{A}}$	1 μ A

Hodnota meraného napätia alebo prúdu sa dá vyjadriť v dBm nasledovne :

$$\text{dBm} = 10 \cdot \log \frac{U^2}{1\text{mW}} = 10 \cdot \log \frac{I^2 \cdot R}{1\text{mW}};$$

kde $R = 50\Omega$.

Orientačná tabuľka pomerov výkonov a napätí vyjadrených v decibelovej mierke :

<i>dB</i>	<i>Pomer výkonov</i>	<i>Pomer napätí</i>
-60	10^{-6}	0,001
-30	10^{-3}	0,0316
-20	0,01	0,10
-10	0,10	0,316
0	1,00	1,00
1	1,26	1,12
2	1,58	1,26
3	2,00	1,41
5	3,16	1,78
6	≈4,00	2,00
7	≈5,00	2,24
9	≈8,00	2,82
10	10,0	3,16
20	100	10
30	10^3	31,6
60	10^6	1000

Hodnoty napätí vyjadrené v pomerových jednotkách :

<i>U (V)</i>	<i>U (dBm)</i>	<i>U (dBμV)</i>
0,000001	-107	0
0,00001	-87	20
0,0001	-67	40
0,001	-47	60
0,01	-27	80
0,1	-7	100
0,224	0	107
1	13,01	120
2	19,03	126,02
3	22,55	129,54
4	25,05	132,04
5	26,99	133,98
6	28,57	135,56
7	29,91	136,90
8	31,07	138,06
9	32,10	139,08
10	33	140