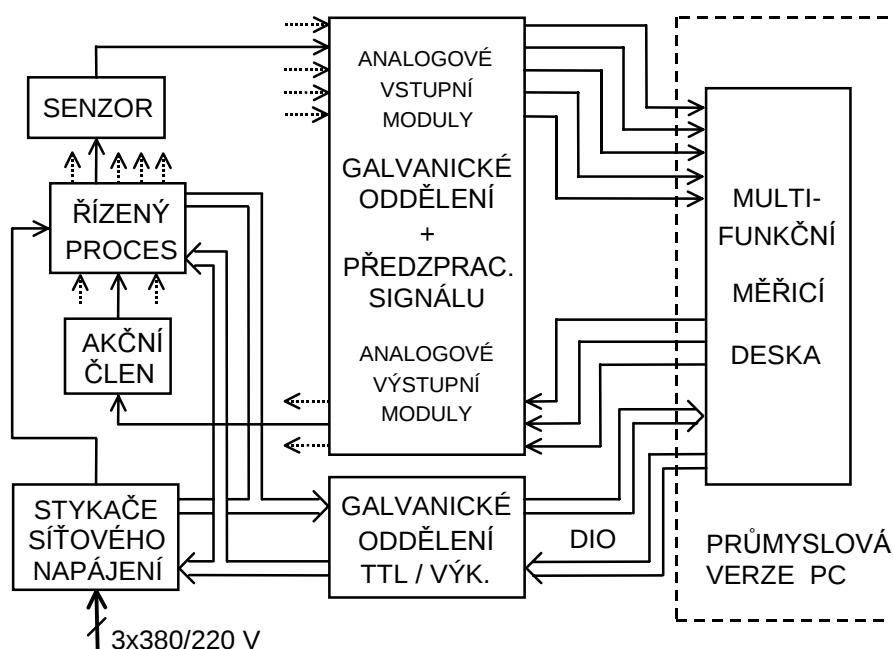


Dynamické vlastnosti analogově-číslicových modulů a jejich elektromagnetická kompatibilita

Vladimír Haasz, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, katedra měření

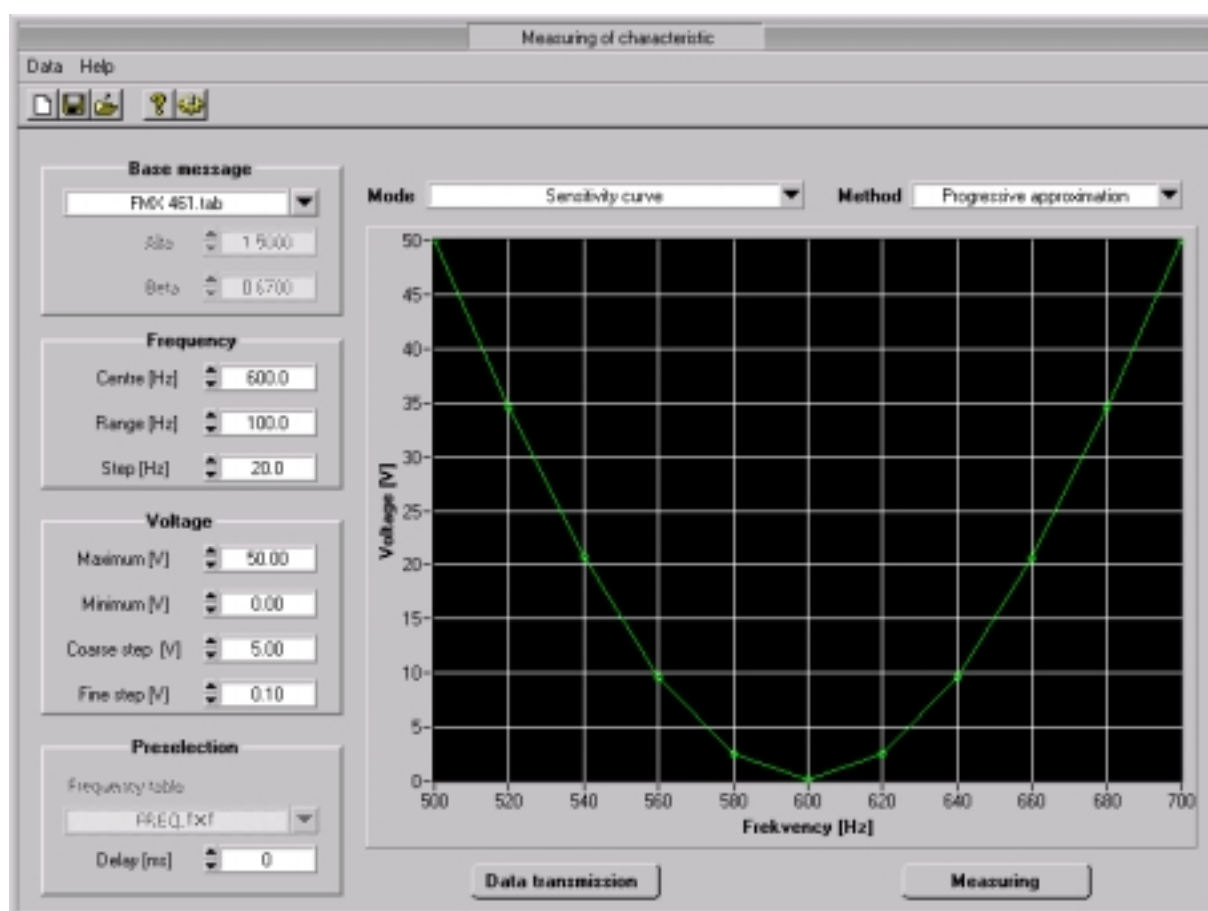
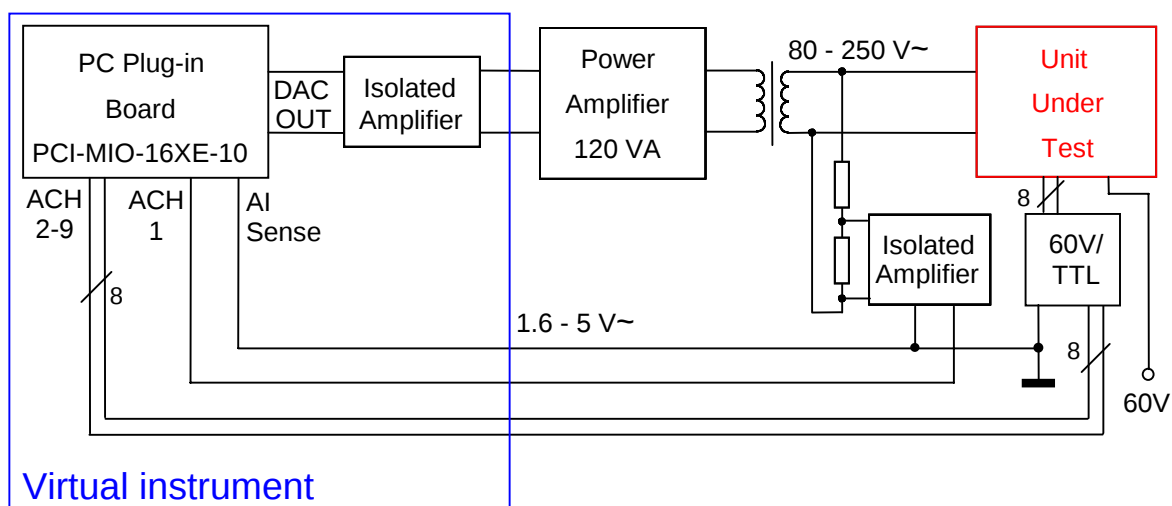
1. Úvod

V poslední době se používá v laboratorních i průmyslových aplikacích pro měření parametrů jak přechodových jevů, tak periodických signálů, řada různých typů modulárních měřicích systémů [1]. Velmi rozšířené jsou přitom systémy na bázi počítačů standardu IBM PC (v průmyslovém, komerčním popř. přenosném provedení), které využívající zásuvné analogově-číslicové popř. multifunkční moduly se standardním rozhraním umožňujícím jejich připojení k vnitřní sběrnici těchto počítačů. Tyto systémy lze použít jak pro měření statických popř. pomalu se měnících veličin, tak pro měření parametrů periodických signálů či rychlých přechodových dějů. Na tomto základě je pak možné realizovat jak jednoduché řídicí systémy (obr. 1.), tak testovací systémy (obr. 2.) či tzv. virtuální měřicí přístroje.



Obr. 1. Uspořádání jednoduchého řídicího systému s multifunkčním modulem

Klíčovým blokem z hlediska metrologických vlastností těchto systémů (tj. zejména přesnosti měření) jsou zásuvné analogově-číslicové popř. multifunkční moduly. Zatímco parametry číslicových záznamníků přechodových dějů (transient memory) a metody pro jejich ověřování definuje norma IEEE 1057 [2] a metody testování samotných analogově-číslicových převodníků norma IEEE 1241 [3], pro modulární systémy na bázi PC, popř. pro zásuvné AČ moduly těchto systémů dosud žádná takováto norma neexistuje. Díky tomu nejsou řešeny např. otázky EMC uvnitř těchto systémů apod. Díky tomu je např. velmi obtížný odhad přesnosti měření při používání takovýchto modulárních systémů, což v krajním případě při neznalosti popř. nerespektování jejich specifických vlastností může vést i k výraznému nárůstu chyb měření. Proto je v současné době připravována nová norma týkající se této oblasti „*Performance characteristics and calibration methods for digital DAQ systems*“.



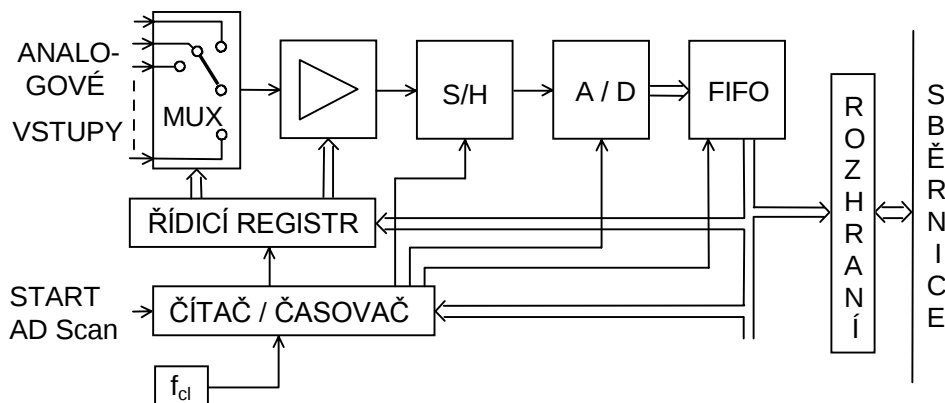
Obr. 2. Tester parametrů přijímačů HDO

2. Měřicí modul s analogovými vstupy

Nejrozšířenějším typem centralizovaných měřicích systémů jsou v současné době systémy na bázi zásuvných měřicích desek do PC. Je však možno konstatovat, že základní struktura měřicích modulů používaných v ostatních typech měřicích systémů (např. měřicí moduly pro PC/104 Standard, moduly typu PC Card pro notebooky nebo zásuvné měřicí moduly do průmyslových systémů se sběrnici VME popř. CompactPCI či IPCI) je v podstatě stejná. Proto

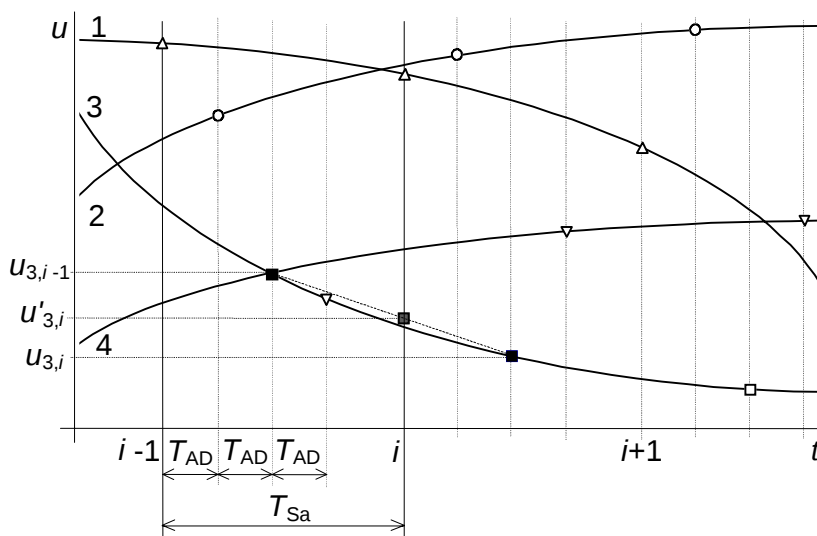
se dále zaměříme na zásuvné měřicí desky do PC s tím, že v podstatě stejné závěry platí i pro měřicí moduly ostatních výše uvedených systémů včetně měřicích modulů připojených k počítači s využitím sériových přenosových kanálů (RS-232, RS-485, USB).

Základní a nejužívanější blokové uspořádání měřicího modulu s analogovými vstupy (popř. AČ kanálu multifunkčního modulu) je uvedeno na obr. 3. Z této struktury vyplývají i vlastnosti AČ modulu. Jedná se o uspořádání vhodné pro malé a střední vzorkovací rychlosti, kdy naměřené vzorky jsou ukládány přímo do paměti počítače a modul obsahuje pouze vyrovnávací paměť s omezenou kapacitou několika desítek až několika tisíc vzorků. Rychlost přenosu (a tedy i rychlost vzorkování) je v tomto případě omezena též maximální přenosovou rychlostí použité sběrnice.



Obr. 3. AČ kanál multifunkčního modulu

Z obr. 3 vyplývá, že ve většině případů jsou vstupy AČ modulu připojeny přímo ke vstupům multiplexeru. Při vícekanálovém režimu měření nejsou tedy vstupní signály v jednotlivých kanálech vzorkovány současně (simultánně), ale postupně jeden po druhém (sekvenčně) - viz obr. 4. Minimální doba zpoždění mezi jednotlivými kanály T_{AD} je dána převážně dobou převodu použitého AČ převodníku, což obvykle odpovídá převrácené hodnotě maximální vzorkovací rychlosti (sekvence se ukládá do vyrovnávací paměti).



Obr. 4. Sekvenční vzorkování a korekce

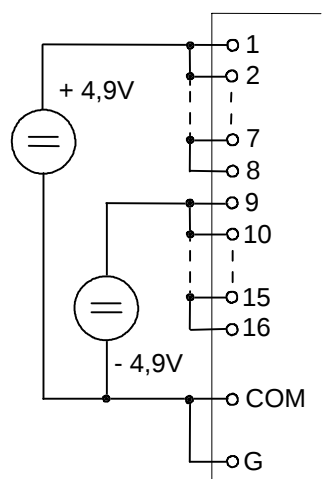
V případě, že nesynchronnost vzorkování vznikající díky tomuto uspořádání může způsobit nezanedbatelnou chybu měření (např. při měření výkonu nebo fázového rozdílu), lze tuto chybu částečně korigovat lineární interpolací dle vztahu

$$u'_{k,i} = u_{k,i} - (u_{k,i} - u_{k,i-1})(T_{AD} / T_{Sa})(k - 1) \quad (1)$$

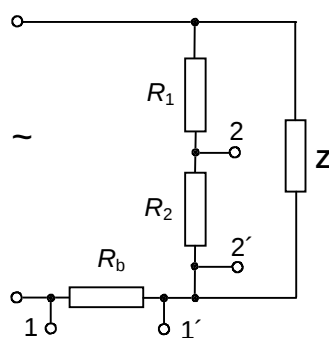
kde T_{Sa} je doba mezi vzorky v jednom kanále,

k pořadové číslo kanálu,

$u_{k,i}$ hodnoty příslušných vzorků (viz obr. 4. pro $k = 3$).



Obr. 4. Určení chyby při přepínání kanálů s max. rozdílem vstupních napětí



Obr. 6. Zapojení pro měření výkonu

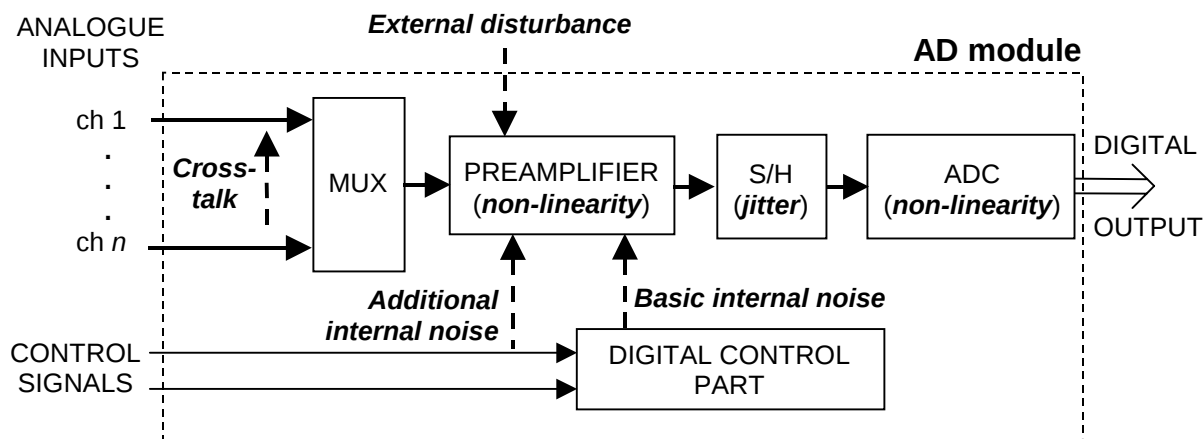
Za předpokladu, že vzájemná časová nejistota vzorkování v jednotlivých kanálech je při jednom odměru této posloupnosti zanedbatelná (malý rozptyl hodnot T_{AD}), je v převážné většině případů tato korekce postačující.

Zatímco se frekvenční charakteristika přístrojového zesilovače analogového kanálu (pokud nepoužíváme stroboskopické vzorkování) prakticky neuplatní, je důležitým parametrem použitých zesilovačů rychlost přeběhu. Měříme-li totiž na dvou po sobě následujících kanálech napětí, jejichž rozdíl se blíží vstupnímu rozsahu, může ustálení zesilovače trvat déle, než je doba odpovídající minimální periodě vzorkování. Díky tomu bude odměr na druhém z kanálů zatížen chybou. K tomuto jevu dochází zejména při větším zesílení. Velikost této chyby můžeme určit poměrně snadno v zapojení dle obr. 5. Kanály 1 až 8 je připojeno napětí o něco vyšší, než je minimální napětí nastaveného rozsahu, a na kanály 9 až 16 je připojeno napětí o něco nižší, než je maximální napětí nastaveného rozsahu (např. v případě bipolárního vstupu ± 5 V napětí $-4,9$ V a $+4,9$ V). V případě, že se výše popsaný jev projeví, jsou odměry na 1. a 9. kanále zatíženy chybou, jejíž velikost určíme jako rozdíl hodnoty naměřené na těchto kanálech od ustáleného stavu, tj. hodnoty naměřené na 8. a 16. kanále. Pro potlačení dalších rušivých vlivů určíme výsledek jako střední hodnotu z velkého počtu měření. Chyby vznikající při přepínání z minimální hodnoty vstupního napětí na hodnotu maximální a naopak se obvykle navzájem liší. V praxi se tento jev může negativně uplatnit např. při měření výkonu v zapojení podle obr. 6, kde pro odporovou zátěž Z ($\cos \varphi = 1$) jsou napětí snímána na bočníku R_b a na výstupu odporového děliče v protifázi. Hodnoty naměřené pro některé typy ZMD jsou uvedeny v tab. 1.

Tabulka 1. Chyby (vyjádřené v LSB) vznikající při přepínání kanálů s maximálním rozdílem vstupních napětí a při maximální vzorkovací rychlosti (skok $\rightarrow +$ / skok $\rightarrow -$)

Zesílení	PC 74	AT-MIO-16L-25	Lab PC+	AXIOM 5210	PCL 714
x 1	0,2 / 0,2	1,0 / 0	0,6 / 0	0,1 / 0,2	2,8 / 0,5
x 10	0,1 / 0,6	0,7 / 0,4	0,3 / 0,3	2,5 / 7,0 (x 16)	0,4 / 2,4 (x 5)
x 100	0,5 / 1,1	0,9 / 0,4	260 / 220	-	-
x 500	-	-17 / -18	-	-	-
f_{Sa} (kHz)	30	40	80	40	20

3. Skutečná rozlišovací schopnost AČ modulu



Obr. 7. Vlivy způsobující snížení rozlišovací schopnosti a přesnosti AČ modulů

Skutečnou rozlišovací schopnost AČ modulu popř. AČ kanálu multifunkčního modulu ovlivňuje kromě kvantovacího šumu a nelinearity vlastního AČ převodníku řada dalších faktorů (obr. 7). Je to zejména vnitřní rušení způsobené signály interních řídicích obvodů, externími řídicími signály (např. externí taktovací signál) či přeslechem mezi kanály při vícekanálových aplikacích. Dále se může uplatnit časová nestabilita spouštění převodu (tzv. jitter), což ve svém důsledku způsobuje pokles rozlišovací schopnosti (vzrůst šumu) při vyšších frekvencích vstupních signálů. Je třeba vzít v úvahu i nelinearitu předzesilovače (která může též záviset na frekvenci vstupního signálu) a významný vliv může mít též externí rušení.

Parametr, který souhrnně určuje kvalitu AČ kanálu z hlediska rychle se měnících signálů a jenž podchycuje většinu výše uvedených vlivů (vyjma rychlosti přeběhu zesilovače) včetně nelinearity vlastního AČP, je tzv. efektivní počet bitů. Ten udává skutečně použitelnou rozlišitelnost celého AČ kanálu pro dynamická měření. Efektivní počet bitů je definován vztahem

$$n_{\text{ef}} = n - \log_2(U_{\text{ef,ks}} / U_{\text{ef,ki}}) \quad (2)$$

kde n je počet bitů převodníku,

$U_{\text{ef,ki}}$ efektivní hodnota kvantovacího šumu ideálního AČP,

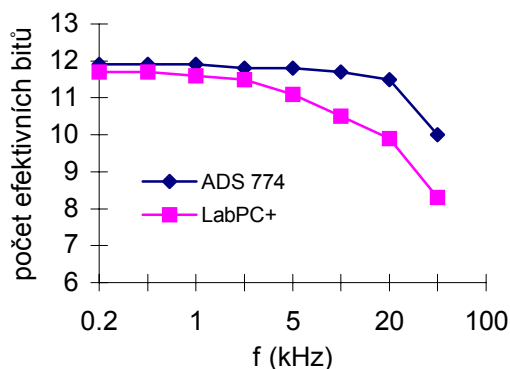
$U_{\text{ef,ks}}$ efektivní hodnota šumu celého testovaného AČ kanálu.

Jak ovlivňuje efektivní počet bitů nejen vnitřní šum modulu, ale i vnější rušení (součin frekvence rušivého pole a jeho intenzity $f_D H_D$ je úměrný indukovanému rušivému napětí) pro jednotlivé velikosti zesílení je patrné z tab. 2.

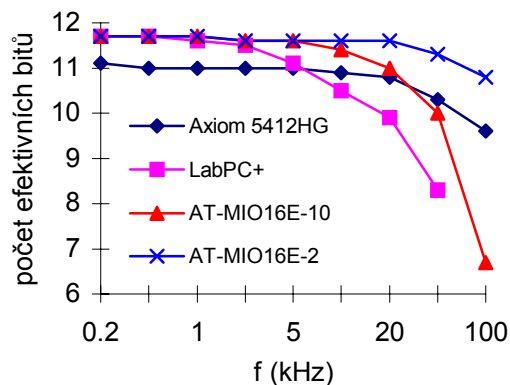
Tabulka 2. Vliv nastaveného zesílení na pokles efektivního počtu bitů způsobený vnitřním šumem a vnějším rušením (PCMCIA karta DAQ 1200)

	$G = 1$	$G = 10$	$G = 100$
$f_D H_D \rightarrow 0$	- 0,7	- 1,7	- 2,7
$f_D H_D = 20 \text{ kHz} \cdot \text{A/m}$	- 0,8	- 2,1	- 3,7

Na obr. 8 jsou porovnány údaje výrobce AČ převodníku ADS 774 a výsledky testu zásuvné měřicí desky typu LabPC+ od firmy National Instruments osazené tímto převodníkem. Z výsledků je patrné, že skutečný efektivní počet bitů AČ kanálu významně ovlivňuje nejen použitý AČP, ale i další výše uvedené vlivy, a to i v oblasti velmi nízkých frekvencí vstupních



Obr. 8. Porovnání efektivního počtu bitů AČ modulu a použitého AČ převodníku

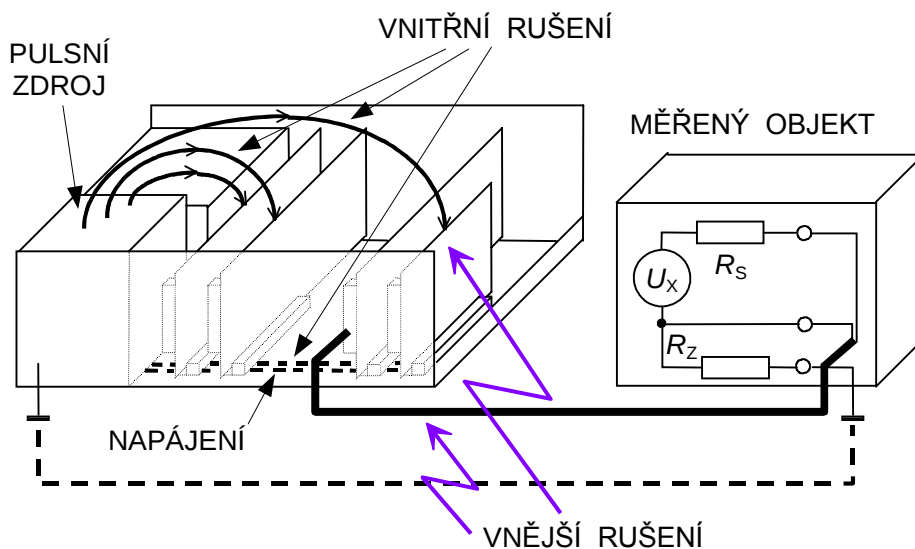


Obr. 9. Výsledky testů několika typů zásuvných měřicích desek

signálů (na ose x je vynesena frekvence vstupního signálu). Na obr. 9 jsou pak uvedeny výsledky testování několika typů zásuvných měřicích desek. Z výsledků je patrné, že v případě frekvence vstupního signálu, která se řádově blíží mezní vzorkovací frekvenci, dochází k významnému poklesu efektivního počtu bitů. To je třeba též vzít v úvahu při praktických aplikacích.

3. Vnitřní a vnější rušivé signály

Velmi negativní dopad na přesnost určení měřených parametrů může mít interní a externí rušení (obr. 10). Hlavním zdrojem interního rušení je obvykle pulsní zdroj počítače a sousední zásuvné moduly. Pulsní zdroj jednak vyzařuje rušivé elektromagnetické pole, jednak napájecí napětí obsahuje střídavou impulsní složku. Jaké ekvivalentní rušivé napětí na vstupu měřicího modulu tyto složky vyvolají, závisí jednak na jejich kvalitě (uspořádání plošného spoje, stínění, galvanické oddělení napájení apod.), jednak na typu použitého počítače a na umístění měřicího modulu v něm. Mimo to velikost tohoto rušení závisí též na parametrech obvodu, jenž je zdrojem měřených napětí - jeho výstupním odporu R_s a odporu proti zemi R_z .



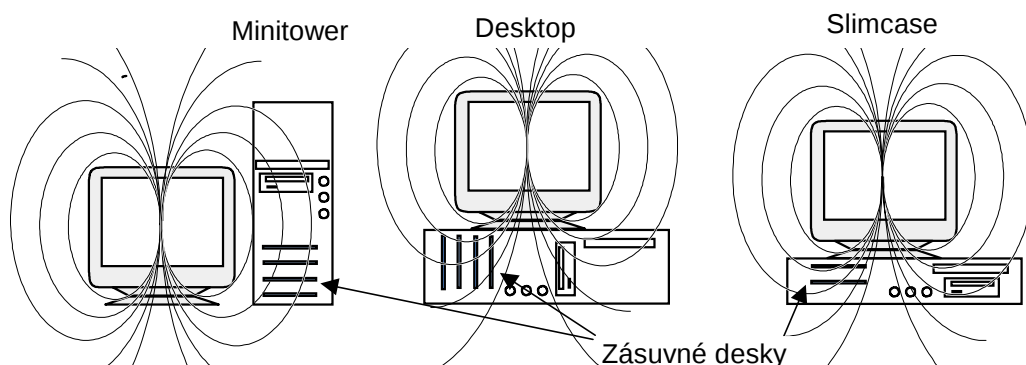
Obr. 10. Vnitřní a vnější rušivé vlivy

Vliv vnějšího rušení závisí jednak na celkovém uspořádání měřicího obvodu, jednak na průniku vnějšího rušivého pole do skříně počítače. Z hlediska celkového uspořádání měřicího

obvodu je třeba i u diferenčních vstupů v případě delších přívodů a nižších úrovní signálu očekávat nezanedbatelné rušení. O jeho velikosti se můžeme přesvědčit tak, že při propojených přívodech ke svorce LO a GND odpojíme u zdroje signálu přívod ke svorce HI a spojíme jej přes odpor R_S (výstupní odpor zdroje signálu) s přívodem ke svorce LO, přičemž zdroj signálu zůstane zapnut. Obdobným způsobem můžeme při vícekanálovém měření určit průnik signálu (přeslech) mezi kanály. Pokud oba tyto vlivy nejsou zanedbatelné ve vztahu k požadované přesnosti měření, je nutné použít externí zesilovač s galvanickým oddělením, umístit jej co nejblíže ke zdroji měřeného signálu a na vstup měřicího modulu přivést již zesílené signály.

Celkové vnější rušení pochopitelně silně ovlivní reálně dosažitelný efektivní počet bitů celého zařízení. Zde je třeba si uvědomit, že největším potenciálním zdrojem rušení je vlastní monitor počítače, v průmyslovém prostředí pak pulsně řízené pohony. Rušivá napětí se mohou indukovat jak přímo do obvodů měřicího modulu, tak do přívodů (a to zejména tehdy, pokud jsou použity levné nestíněné ploché kabely a nestíněné svorkovnice).

Jak již bylo výše uvedeno, z hlediska použití v laboratoři je významné zejména rušivé pole klasického monitoru. V tab. 3 jsou proto uvedeny typické hodnoty rušivého magnetického pole ve vzdálenosti 0,1 m vedle monitoru a pod ním (rozdíly mezi monitory 14“, 15“ a 17“ nejsou podstatné). Z tabulky vyplývá, že významné je zejména pole pod monitorem počítače, jež v případě provedení „desktop“ a „slimcase“ může při umístění monitoru na skříň počítače (obr. 11) významně ovlivnit efektivní počet bitů použitých zásuvných měřicích desek (viz tab. 4). Ještě větší negativní vliv má nevhodné umístění nestíněné svorkovnice v blízkosti monitoru.



Obr. 11. Vliv magnetického pole monitoru

Tabulka 3. Intenzita rušivého magnetického pole ve vzdálenosti 0,1 m vedle a pod monitorem pracujícím v režimu DOS a Windows

	DOS			Windows		
f_D (kHz)	32	64	96	36	72	108
$f_D \cdot H_D$ (kHz.A/m) - vedle	1.9	1.6	1.6	2.5	2.8	2.2
$f_D \cdot H_D$ (kHz.A/m) - pod	16.3	12.8	11.5	31.2	27.4	22.7

Tabulka 4. Odhad poklesu počtu efektivních bitů, jsou-li ZMD umístěny v PC provedení „desktop“ nebo „slimcase“ a monitor umístěn přímo na počítači

	DOS				Windows			
f_D (kHz)	32	64	96	celk.	36	72	108	celk.
$\Delta n_{ef,H}$ (G = 1)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.8	0.9	0.9	1.7
$\Delta n_{ef,H}$ (G = 10)	2.2	2.0	2.1	2,7	3.1	3.1	3.1	3.8

Literatura:

- [1] Haasz, V., Roztočil, J., Novák, J.: *Číslicové měřicí systémy*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2000
- [2] IEEE Std. 1057-1994: *IEEE standard for digitising waveform recorders*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1994.
- [3] IEEE Std. P1241: *IEEE standard for terminology and test methods for analogue to digital converters*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1999.