



ČESKÝ INSTITUT PRO AKREDITACI, o.p.s.

Opletalova 41, 110 00 Praha 1 – Nové Město

Dokumenty EA

EA - Evropská spolupráce pro akreditaci

Číslo publikace: EA-4/20 (EAL - G30)

Kalibrace osciloskopů

Tento dokument byl vydán organizací EAL k harmonizaci kalibrací osciloskopů. Dokument poskytuje návod pro akreditační orgány ke stanovení minimálních požadavků na kalibrace osciloskopů a dává doporučení kalibračním laboratořím jak zavádět praktické postupy.

Tento dokument nesmí být dále rozšiřován.

duben 1999

Autorství

Tento dokument byl revidován 2. výborem EAL (Kalibrační a zkušební činnost) na základě návrhu vypracovaného expertní skupinou EAL „Stejnoseměrné a nízkofrekvenční elektrické veličiny“ (EAL Expert Group „DC and LF Electrical Quantities“).

Oficiální jazyk

Text může být překládán do dalších jazyků podle potřeby. Verze v angličtině zůstává verzí směrodatnou.

Autorská práva

Autorské právo k tomuto textu přísluší EAL. Z textu nesmí být pořizovány kopie za účelem dalšího prodeje.

Vydání směrnice

Tento dokument představuje shodu názorů mezi stanoviskem členů EAL a reálnou praxí při aplikaci příslušných ustanovení akreditačních norem v souvislosti s předmětem tohoto dokumentu. Použité postupy nejsou povinné a jedná se jen o návody pro akreditační orgány a příslušné laboratoře. Dokument byl zpracován s cílem zabezpečení jednotného přístupu při akreditaci laboratoří mezi členy EAL a speciálně pak mezi signatáři Multilaterální dohody EAL.

Další informace

Další informace o této publikaci získáte u vašich národních zástupců v EAL, jejichž telefonní a faxová čísla jsou uvedena dále.

Český institut pro akreditaci, o.p.s.
Opletalova 41, Praha 1, PSČ 110 00
Telefon: 221 004501
Fax: 221004408
E-mail: mail@cai.cz

Obsah

1	ÚVOD.....	3
2	ROZSAH POUŽITÍ.....	3
3	POJMY A ZKRATKY	3
4	KALIBRAČNÍ ZAŘÍZENÍ.....	4
4.1	Požadavky na kalibrační zařízení.....	4
4.2	Referenční podmínky.....	4
5	PŘÍPRAVA NA KALIBRACI.....	4
5.1	Vizuální prohlídka	4
5.2	Funkční zkouška	4
6	KALIBRACE.....	5
6.1	Kritéria provedení osciloskopu.....	5
6.2	Rozsah kalibrace osciloskopu	5
6.3	Kalibrace svislého vychylování (kalibrace amplitudy).....	6
6.3.1	Provedení kalibrace	6
6.3.2	Varianta I: Akreditace pro stejnosměrné napětí	7
6.3.3	Varianta II: Akreditace pro střídavé napětí.....	8
6.3.4	Varianta III: Akreditace pro impulsní měření.....	8
6.4	Kalibrace vodorovného vychylování (kalibrace časové základny).....	9
6.4.1	Kalibrace časové základny.....	9
6.4.2	Kalibrační postup	10
6.4.3	Hodnocení vodorovného vychylování.....	10
6.5	Určení šířky pásma a délky čela	11
6.5.1	Obecně	11
6.5.2	Měření šířky pásma	13
6.6	Vnitřní kalibrační signály	15
7	KALIBRAČNÍ PROTOKOLY	16
8	LITERATURA.....	17
	PŘÍLOHA A.....	18
A1	Výstup dat.....	18
A2	Vyhodnocení údajů.....	19
A3	Nejistoty měření při kalibraci osciloskopu	19
A3.1	Zobrazovací systém	19
A3.2	Systém svislého vychylování.....	20
A3.2.1	Délka čela a týlu, vlastní délka čela osciloskopu	20
A3.3.3	Délka čela a vzorkovací kmitočet.....	21
A3.3	Systém vodorovného vychylování	24
A3.3.1	Linearita	26
A4	Kalibrace vysokofrekvenčním napětím.....	27

1 ÚVOD

- 1.1 Tento dokument se zabývá kalibrací osciloskopů. Neklade si za cíl zabývat se všemi metrologickými detaily osciloskopů jakkoli by byly pro kalibraci důležité. V rámci tohoto dokumentu byly respektovány všechny související normy a dokumenty (viz část 8). Při kalibraci musí být navíc respektovány i údaje výrobce zkoušeného osciloskopu.

2 ROZSAH POUŽITÍ

- 2.1 Tento dokument platí pro kalibrace osciloskopů s elektronovým paprskem (a to jak analogových tak i digitálních) a záznamníků přechodových dějů.
- 2.2 Všechny měřicí postupy, které kalibrační laboratoř používá, musí při kalibrování odpovídat jejímu kalibračnímu vybavení tak, aby všechna měřidla nezbytná pro kalibraci byla **navázána** v souladu se statutem laboratoře akreditované ke kalibraci osciloskopů. Návaznost na národní etalony, stejně tak jako základní měřicí postupy pro kalibraci osciloskopů, musí být dokumentována.

3 POJMY A ZKRATKY

Pojmy

B	šířka pásma
b	korekční činitel
G_L	vstupní vodivost měřiče výkonu
G_{OS}	vstupní vodivost osciloskopu
L	linearita časové základny
n	počet průměrovaných průběhů
P	výkon generátoru
P_{inc}	výkon, dopadající na zátěž
t_i, t_{i-1}	časové okamžiky
t_0	délka čela přechodové charakteristiky osciloskopu
T_p	perioda
T_{pi}	perioda v i-tém časovém intervalu
\bar{U}	špičkové napětí
U_E	napětí na výstupu
U_{IN}	napětí na vstupu

Z_0	vztažná charakteristická impedance
Z_X	impedance
Γ	činitel odrazu
φ	fázová chyba

Zkratky

AO	analogový osciloskop
DSO	číslicový paměťový osciloskop (digital storage oscilloscope)
SNR	poměr signál/šum (signal to noise ratio)

4 KALIBRAČNÍ ZAŘÍZENÍ

4.1 Požadavky na kalibrační zařízení

- 4.1.1 Kalibrace musí být provedena pomocí měřicích zařízení a postupů, díky kterým jsou příslušné vztažné nejistoty měření malé ve srovnání se vztažnými nejistotami měření danými osciloskopem.
- 4.1.2 Délky čela a týlu pravouhlých kalibračních signálů musí být významně kratší než délka čela přechodové charakteristiky kalibrovaného osciloskopu.
- 4.1.3 Propojovací kabely musí být koaxiální. Musí být zajištěno, aby při vysokofrekvenčních měřeních byly výstupní impedance měřicího zařízení a vstupní impedance daného osciloskopu vzájemně přizpůsobené.

4.2 Referenční podmínky

- 4.2.1 Kalibrace musí být provedena za referenčních podmínek (mezi ně patří např. okolní teplota, vlhkost, napájecí napětí, harmonické zkreslení), stanovených pro osciloskop a pro měřicí zařízení. Během kalibrace musí být měřicí zařízení v teplotní rovnováze. Tomu musí odpovídat čas pro zahřátí, určený výrobcem.

5 PŘÍPRAVA NA KALIBRACI

5.1 Vizuální prohlídka

- 5.1.1 Před zahájením kalibrace musí být zkontrolován vnější stav osciloskopu. Před provedením kalibrace musí být odstraněny závady, které by mohly nepříznivě ovlivnit funkci osciloskopu.

5.2 Funkční zkouška

- 5.2.2 U zařízení, které se má kalibrovat, má být zkontrolována jeho správná funkce, tj. citlivost spouštění.

6 KALIBRACE

6.1 Kritéria provedení osciloskopu

6.1.1 Osciloskop je měřicí přístroj, který je důležitý pro zobrazování fyzikálních vztahů vyjádřených funkcí

$$y = f(x) \quad (A)$$

kde může být vynesena na osu Y fyzikální veličina převedená na elektrický signál. Osa X představuje funkci času, avšak může také odpovídat jiné fyzikální veličině. Osciloskop je vhodný pro analýzu stejnosměrných a střídavých napětí a střídavých napětí se stejnosměrnou složkou.

6.1.2 Provedení osciloskopu vždy zahrnuje:

- systém svislého vychylování,
- systém vodorovného vychylování,
- zobrazovací jednotku.

Tab. 1 ukazuje souvislosti mezi provedením osciloskopu a některými souvisejícími důležitými parametry.

Tab. A: Kritéria provedení a konstrukce osciloskopu

Osciloskop				
Svislé vychylování		Vodorovné vychylování		Zobraz. jednotka
Konstr. část	Parametr	Konstr. část	Parametr	Parametr
vstupní dělič	šířka pásma, délka čela	spouštění	linearita	jas paprsku, citlivost,
předzesilovač	citlivost	časová základna	přesnost, citlivost	šířka pásma, ostření,
zpožďovací linka	impulsová odezva			geometrické zkreslení
výstupní zesilovač	zvlnění kmit. charakteristiky			
A/D převodník	rozlišení			
vnější dělič	linearita			

6.2 Rozsah kalibrace osciloskopu

6.2.1 Kalibrace pokrývá:

- svislé vychylování
- vodorovné vychylování
- délku čela a šířku pásma
- vnitřní kalibrační signály, pokud je vnitřní kalibrační signál dostupný na čelním panelu

- 6.2.2 Pokud jsou zásuvné jednotky v osciloskopu výměnné, je nezbytné, aby byla odděleně kalibrována každá jednotlivá konfigurace. Do kalibrace je nutno zahrnout i připojené sondy. Prvky pro nastavení parametrů vychylování musí být při všech kalibracích v definovaných polohách.
- 6.2.3 Při provádění kalibrací je nutno vzít v úvahu informace o způsobu získávání dat v osciloskopu, uvedené v příloze A. Výpočet nejistot pro kalibrační postupy musí být dokumentován v příručce jakosti. Pro vyhodnocení signálů musí být užitá střední čára paprsku. K omezení vlivu digitalizace se doporučuje u digitálních osciloskopů používat průměr z několika záznamů.

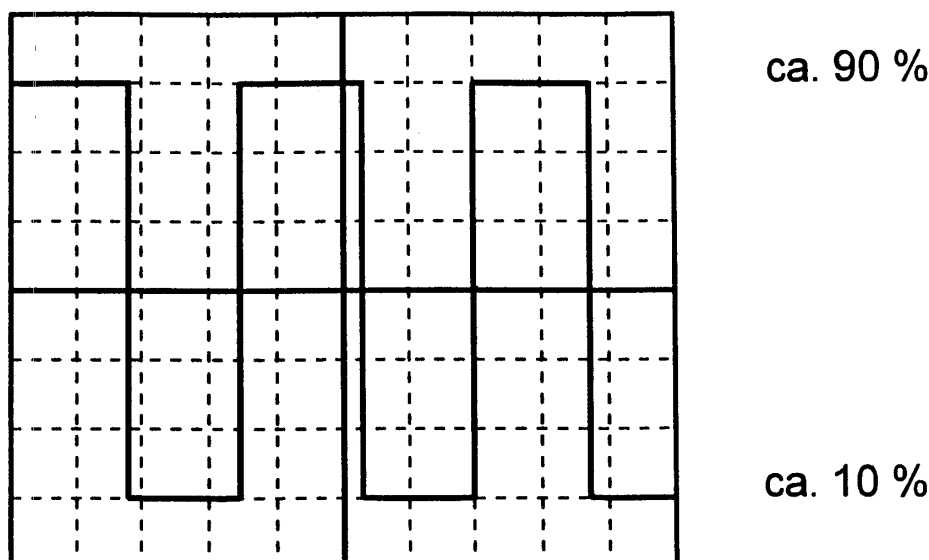
6.3 Kalibrace svislého vychylování (kalibrace amplitudy)

6.3.1 Provedení kalibrace

6.3.1.1 Ke kalibraci svislého vychylování může být použit některý z následujících položek:

- stejnosměrné napětí
- klíčované stejnosměrné napětí
- střídavé napětí
- impulsy

Amplituda musí být měřena v lineárním rozsahu kmitočtové a amplitudové charakteristiky osciloskopu (viz obr. f, na str. 11). Doporučuje se užít opakovací kmitočet mezi 1 kHz a 100 kHz. U číslicových osciloskopů (DSO) by měřené hodnoty měly využít $\geq 80\%$ rastru (Obr.1), zatímco u analogových osciloskopů by mělo být využito přibližně 70%. Výrobce stanovený pracovní rozsah to musí umožňovat.



Obr. A: Kalibrace svislého vychylování číslicových paměťových osciloskopů

6.3.1.2 Kalibrace musí být provedena pro každou polohu nastavení napěťového děliče. Jestliže je hodnota citlivosti vstupního děliče násobena konstantou (např. $\times 10$), musí být určena přídavná chyba, způsobená násobitelem. V případě vícekanálových systémů musí být dané měření označeno číslem kanálu. Kalibrace děliče v sondě, připojené k osciloskopu, je platná pouze s tímto kalibrovaným osciloskopem (uvedeným v kalibračním listu). Kalibrace děliče v sondě musí být jednoznačně přiřazena ke kanálu. Sonda s děličem musí být uvedena v kalibračním listu.

6.3.1.3 Tabulka 2 uvádí přehled variant návaznosti pro kalibraci svislého vychylování osciloskopu. Varianty v tab. b jsou popsány v dalším textu.

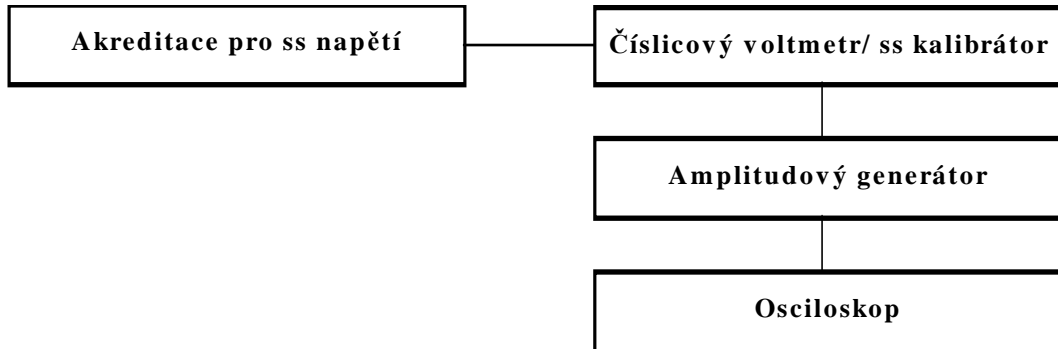
Tab. B: Varianty návaznosti pro kalibraci svislého vychylování

Varianta	Normalizovaný postup	Referenční etalon	Pracovní etalon
1	Akreditace pro stejnosměrné napětí	Číslicový voltmetr	Kalibrátor osciloskopů
2	Akreditace pro střídavé napětí	Střídavý kalibrátor	
3	Akreditace pro impulsní měření	Impulsní generátor	

6.3.2 Varianta I: Akreditace pro stejnosměrné napětí

6.3.2.1 Kalibrace svislého vychylování je navázána přes veličinu stejnosměrného napětí. Podmínkou je, aby laboratoř byla akreditována pro veličinu stejnosměrné napětí s dostatečně malou nejistotou měření. Jako referenční

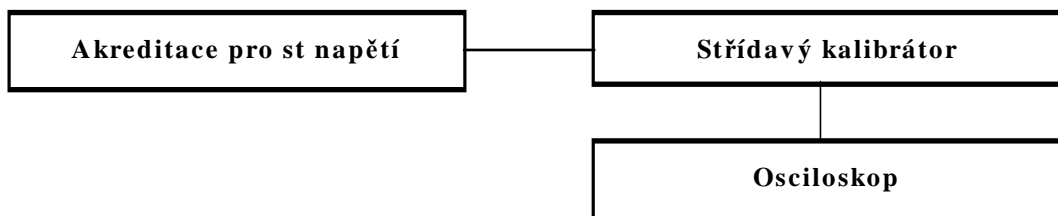
etalon pro kalibraci amplitudového generátoru může být použit číslicový voltmetr nebo stejnosměrný kalibrátor. Osciloskopy jsou kalibrovány v klíčovaném ("chopped") módu kalibrátorem amplitudy. Musí být vzata v úvahu nejistota měření, vzniklá přechodem ze stejnosměrného módu do klíčovaného módu.



Obr. B: Návaznost užitím veličiny stejnosměrné (ss) napětí

6.3.3 Varianta II: Akreditace pro střídavé napětí

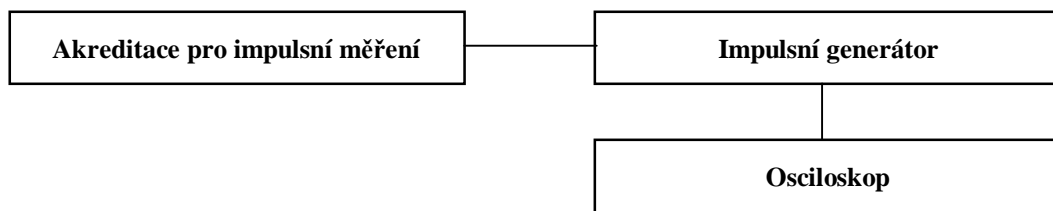
6.3.3.1 Kalibrace je návazná použitím veličiny střídavé napětí. Kalibrační laboratoř je držitelem akreditace pro tuto veličinu. Referenčním etalonem může být střídavý kalibrátor nebo číslicový voltmetr. Pracovní etalon je kalibrován pro špičkovou hodnotu střídavého napětí ve shodě s akreditací. Měřením harmonického zkreslení musí být zajištěno, že tvar střídavého napětí z výstupu generátoru se liší od sinusového jen do té míry, že určení špičkové hodnoty pomocí činitele tvaru neovlivní významně nejistotu měření.



Obr. C: Návaznost přes střídavé napětí

6.3.4 Varianta III: Akreditace pro impulsní měření

6.3.4.1 Kalibrační laboratoř je držitelem akreditace pro impulsní měření. Pro zajištění návaznosti je užit impulsní generátor.



Obr. D: Návaznost přes impulsní měření

6.4 Kalibrace vodorovného vychylování (kalibrace časové základny)

6.4.1 Kalibrace časové základny

6.4.1.1 Generátor vychylovacího napětí musí dodat správné vychylovací napětí (lineární v čase) v celém rozsahu kmitočtů až do 10 dekád (viz Příl. A). Na každém rozsahu hrubého přepínání musí být libovolně definován jediný bod, v němž bude časová základna považována za kalibrovanou. Násobící koeficienty mohou být odstupňovány v řadě 1/2/5/10 nebo 1/3/10. Určitá poloha prvku pro jemné nastavení (levý nebo pravý doraz, mechanická zarážka, určený kód při inkrementálním nastavení), často označená indikací LED nebo na displeji, definuje jmenovitou rychlost vychylování. Rozsah regulace jemného nastavení musí zajistit překrývání jednotlivých podrozsahů, majících různou šířku. Překrývání však nemá být předmětem kalibrace. Další rozšíření (přepnutí zesílení) s koeficientem 5 nebo 10 musí být kalibrováno. Kalibrace se provádí:

- u analogových osciloskopů: na všech rozsazích časové základny
- u paměťových číslicových osciloskopů: na středním rozsahu časové základny.

V případě osciloskopů se dvěma časovými základnami musí být každá z nich měřena nezávisle na druhé, vždy s prvkem jemného nastavení v kalibrované poloze.

6.4.1.2 Fázový rozdíl mezi kanály X a Y má být kontrolován při zobrazování stejného měřicího sinusového napětí současně oběma kanály (Lissajousovy obrazce). Správné rozdělení signálu je nutné zajistit pomocí rozdělovače přizpůsobeného výkonu s měřicími kabely mezi rozdělovačem výkonu a vstupními konektory stejné délky (stejné časové zpoždění). Ověření, že připojenými kabely nebyla zanesena fázová chyba se provede prostou záměnou kabelů ke konektorům X a Y a kontrolou, že se naměřený výsledek nezměnil. Kalibrace má být provedena na jmenovité mezní frekvenci osciloskopu a na polovině této hodnoty (nebo na hodnotě dohodnuté se zákazníkem).

6.4.2 Kalibrační postup

6.4.2.1 Kalibračními signály mohou být libovolné periodické signály s dostatečnou stabilitou a přesností. Přednostně mají být využívány signály impulsního charakteru, získávané pomocí fázově zavěšeného kmitočtového dělení z navázaného základního cyklu. Tyto signály by v ideálním případě měly mít dobře definované hrany pro snadné srovnání s čarami rastru.

6.4.2.2 To umožňuje, aby krystalové oscilátory byly použity jako impulsní generátory, navázané opakovanou kalibrací nebo synchronizací s místním kmitočtovým etalonem, řízeným radiovým přijímačem, televizním přijímačem nebo jinými postupy (obr. e, viz str. 11)

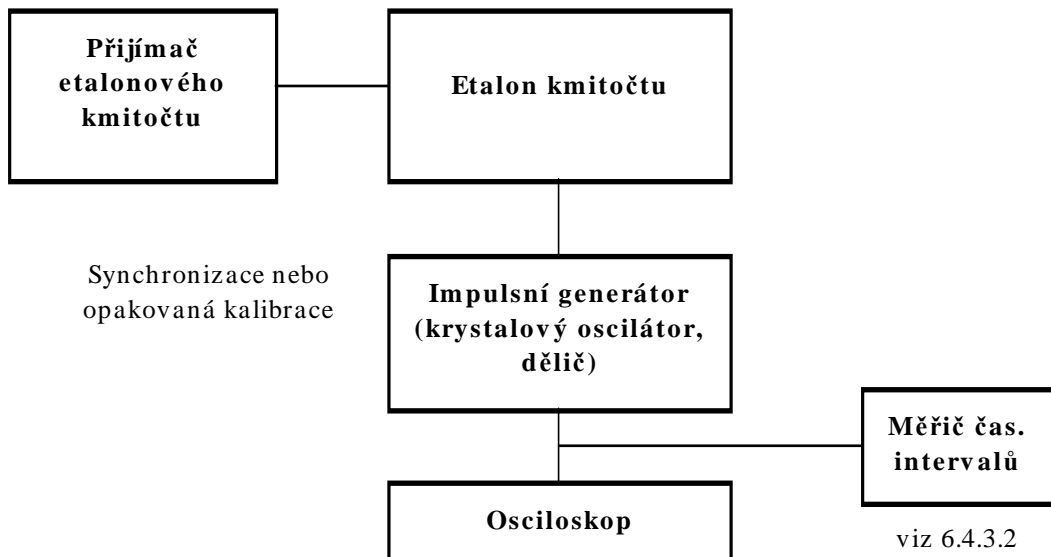
6.4.3 Hodnocení vodorovného vychylování

6.4.3.1 Kmitočet impulsů má být volen tak, aby alespoň jedna úplná impulsní perioda byla zobrazena v hlavním rastru. Má začít na druhé čáře rastru od horního okraje (a skončit na druhé čáře od horního okraje) aby se odstranily nelinearity poblíž okrajů obrazovky, ovlivňující výsledky v normální pracovní oblasti obrazovky. Odchytky mezi hranami impulsů (v oblasti maximální strmosti impulsu) a svislou sítí hlavního rastru musí být určeny následovně:

(a) Při neproměnném opakovacím kmitočtu pulsů: čtením/interpolací.

(b) Při proměnném opakovacím kmitočtu pulsů: nastavením tak, aby se průběh kryl s hlavní sítí rastru a určením skutečné periody. Nastavení na první hlavní čáru rastru musí být provedeno pomocí nastavovacího prvku pro vodorovný posun a opraveno po nastavení periody.

6.4.3.2 K vyloučení nutnosti interpolace při čtení bude pro kalibraci vhodné, když bude možné periodu pulsů jemně nastavit. Jemné ladění může být provedeno v proceduře syntézy nebo jemným krokováním a nevyžaduje další měření pro zpětnou kontrolu během kalibrace. Je-li použit analogový impulsní generátor, musí být nastavený kmitočet současně měřen čítačem - měřičem časových intervalů. (Obr.5)



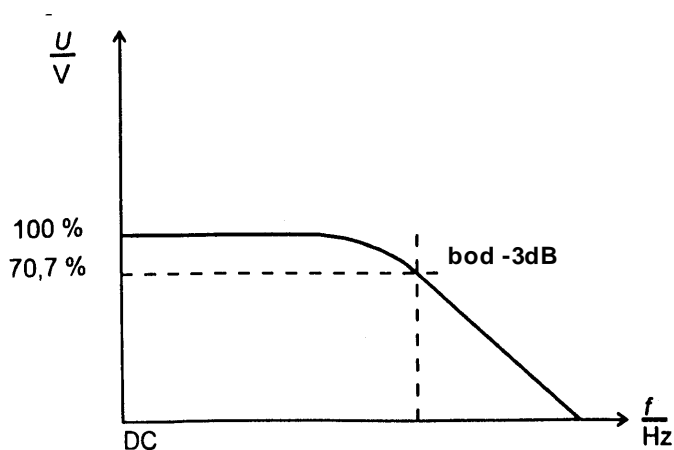
Obr. E: Návaznost časové základny

6.5 Určení šířky pásma a délky čela

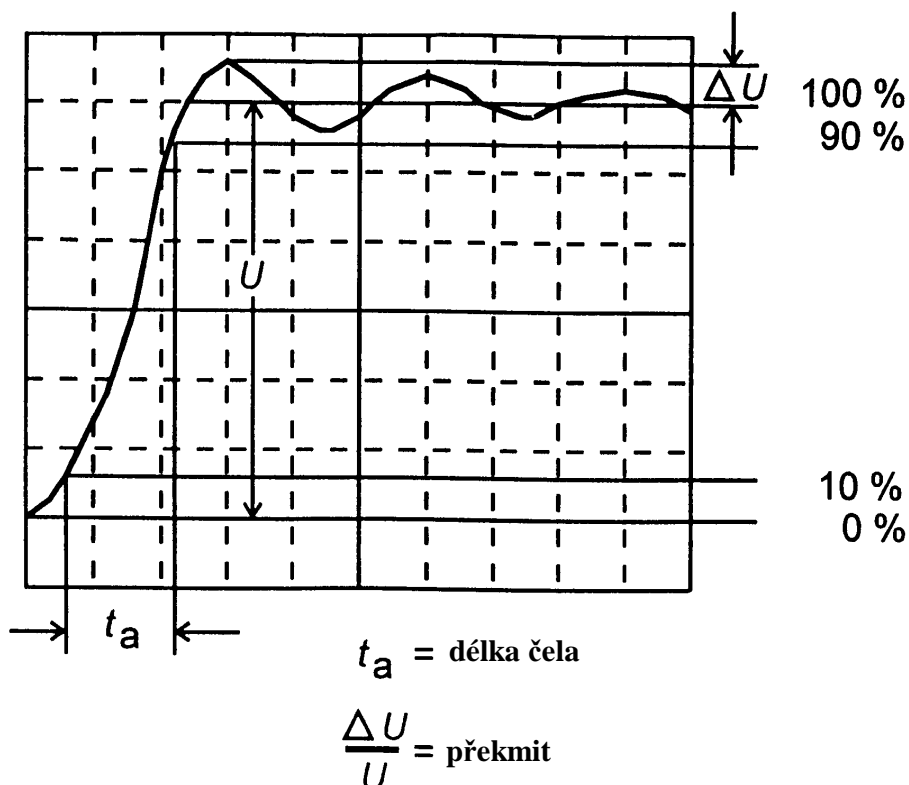
6.5.1 Obecně

6.5.1.1 Kmitočtový rozsah, v němž se napěťová amplitudová odezva zmenšuje o 3 dB je uváděn jako šířka pásma B . Horní mezní kmitočet je horní mezí šířky pásma B (obr. f).

6.5.1.2 Pro měření v časové oblasti je předmětem zájmu délka čela t_0 osciloskopu udávající, jak bude na obrazovce zobrazen ideální napěťový skok. Délka čela se měří pomocí napěťových skoků mezi body, v nichž signál dosáhne 10% resp. 90% hodnoty v ustáleném stavu. (obr. g).



Obr. F: Kmitočtová odezva



Obr. G: Určení délky čela

6.5.1.3 Efekt dolní propusti u zesilovačů osciloskopů může být v mnoha případech popsán teoretickou Gaussovou dolní propustí, pro kterou platí vztah mezi délkou čela a poklesem -3 dB na horním mezním kmitočtu propustného pásma:

$$t_0 = \frac{0,35}{B_{-3dB}} \quad (\text{B})$$

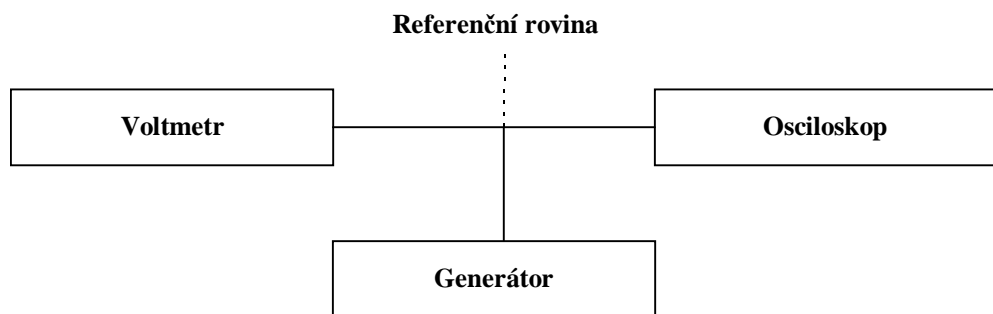
Tento vztah může být použit k výpočtu délky čela osciloskopu z naměřené šířky pásma, jestliže měření kalibrovaným impulsním generátorem nemůže být provedeno.

6.5.1.4 Jestliže zesilovač daného osciloskopu má charakter dolní propusti vyššího řádu, a nikoli Gaussovské dolní propusti (mnoho číslicových osciloskopů), budou číselné hodnoty odlišné od těch, které byly vypočteny z [5] (srov. Příl. A, část A3.2).

6.5.2 Měření šířky pásma

6.5.2.1 Měření amplitudy s použitím kalibrovaného voltmetru.

- (a) Protože střídavé a vysokofrekvenční voltmetry, užívané pro měření šířky pásma jsou často přístroje, indikující efektivní hodnotu, zatímco při měřeních šířky pásma se obvykle kalibruje amplituda (špičková hodnota napětí), musí mít generátor použitý při měřeních dostatečnou spektrální čistotu signálu. Harmonické či rušivé signály mohou způsobit nejistotu měření přibližně vyjádřenou rozdílem špičkových hodnot základního měřeného signálu a každého příspěvku od harmonické nebo rušivého signálu a špičkové hodnoty základního signálu. Harmonická o velikosti asi 10% (-20 dB) v měřeném signálu může způsobit poměrnou nejistotu měření až asi 10%.
- (b) Na kmitočtech do 1 GHz může být malé nejistoty pro měření amplitudy dosaženo užitím kalibrovaného vysokofrekvenčního voltmetru. Kalibrovaný osciloskop a voltmetr jsou spojeny paralelně pomocí T-přechodu (užit koaxiálního typu pro kmitočty nad 1 Mhz) (Obr.8).



Obr. H: Základní obvod pro měření amplitudy s použitím voltmetru

- (c) Měřené napětí je přivedeno z generátoru s proměnným kmitočtem do středního konektoru T-přechodu (srov. Příl. A). Při paralelním spojení mohou být namísto voltmetrů použity kalibrované vysokofrekvenční měřiče výkonu, pokud je jejich vstupní impedance známa s dostatečnou přesností. Při užití sinusového signálu jako měřicího může být špičková hodnota napětí \vec{U} získána ze vztahu:

$$\vec{U} = \sqrt{\frac{2P}{G_L}} \quad (C)$$

kde P – efektivní výkon na vstupu kalibrovaného měřiče výkonu a G_L – vstupní vodivost měřiče výkonu

- (d) Jestliže se impedance měřiče výkonu rovná charakteristické impedanci Z_0 vysokofrekvenčního systému pro měření výkonu (ve většině případů 50Ω), platí dobře známý vztah:

$$\bar{U} = \sqrt{2 \cdot P \cdot Z_0} \quad (\text{D})$$

- (e) Referenční rovinou měření napětí při použití měřičů výkonu je měřicí rovina jejich vstupní impedance nebo vstupní admitance. Měření amplitudy s T-přechodem a voltmetrem (nebo měřičem výkonu) je použitelné pro osciloskopy s vysokou i nízkou (50Ω) vstupní impedancí.
- (f) U osciloskopů s vysokou vstupní impedancí je často užíván nebo výrobcem specifikován jiný postup bez užití T-přechodu. Generátor s výstupní impedancí 50Ω je zakončen přizpůsobenou zátěží 50Ω a osciloskop je připojen paralelně k této zátěži. Šířka pásma je určena z 3 dB poklesu napětí, indikovaného osciloskopem. Je nutné mít na zřeteli i další pokyny výrobce k měření šířky pásma. Až do nejvyššího uvažovaného kmitočtu musí být impedance osciloskopu mnohem větší než 50Ω , jinak budou do měření vneseny další nejistoty.

6.5.2.2 Měření amplitudy pomocí kalibrovaného generátoru výkonu

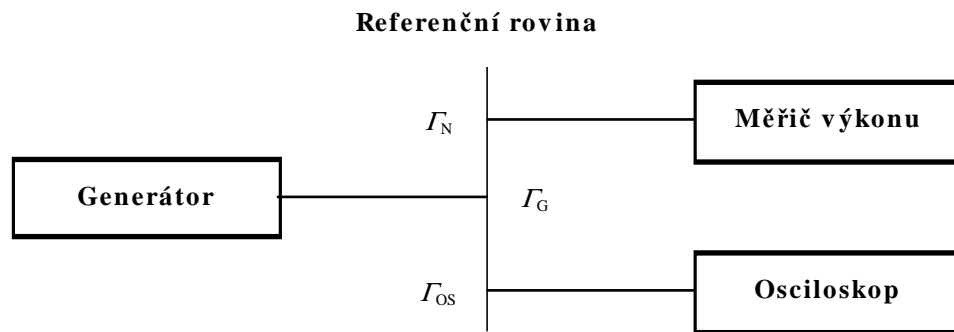
- (a) Na kmitočtovém rozsahu nad 1 GHz se přesné měření napětí obvykle neprovádějí pomocí voltmetru, zapojeného paralelně s pomocí T-přechodu. Na těchto kmitočtech jsou měření amplitudy nebo napětí navázána na měření výkonu a impedance (Obr. 9). Pro měření amplitudy s vysokofrekvenčním generátorem je generátor nejdříve kalibrován kalibrovaným měřičem výkonu. Efektivní výkon P , dodávaný generátorem do vstupu osciloskopu během měřicího postupu vyvolá napětí se špičkovou hodnotou:

$$\bar{U} = \sqrt{\frac{2P}{G_{os}}} \quad (\text{E})$$

kde G_{os} je vodivost na vstupu osciloskopu (Obr. 9).

- (b) Metoda, ukázaná na Obr. 9 může být modifikována použitím rozdělovače výkonu s měřičem výkonu na jednom výstupním portu a osciloskopem na druhém výstupním portu, čímž se zlepší (často

významně) přizpůsobení generátoru (Γ_G). Pro symetrický rozdělovač výkonu platí (5).



Obr. I: Základní obvod pro měření amplitudy použitím generátoru výkonu na vysokých kmitočtech

- (c) Výše popsaná měření napětí se týkají vysokofrekvenčních napětí, získaných v rovině vstupního konektoru osciloskopu. Na vyšších kmitočtech, zvláště nad 1 GHz, je užívána alternativní metoda pro měření šířky pásma. Užívá se výše popsané zařízení s přizpůsobeným rozdělovačem výkonu a s kalibrovaným měřičem výkonu a osciloskopem na jeho dvou výstupních portech. Určí se výkon P_{inc} , vstupující do osciloskopu a získaný jako hodnota, naměřená kalibrovaným měřičem výkonu při užití jeho kalibračního faktoru. Amplituda napěťové vlny, vstupující do osciloskopu se zjistí výpočtem $\bar{U} = \sqrt{2 \cdot P_{inc} \cdot Z_0}$. Použitá metoda musí být uvedena při každé kalibraci šířky pásma.
- (d) Při použití kalibrovaného generátoru napětí či výkonu má měření šířky pásma návaznost na etalony střídavého nebo vysokofrekvenčního napětí nebo na etalony vysokofrekvenčního výkonu a vysokofrekvenčního činitele odrazu. Rovnice (F) bude platit pouze když koeficienty odrazu generátoru (Γ_G), měřiče výkonu (Γ_N) a osciloskopu (Γ_{OS}) budou zanedbatelně malé, v opačném případě musí být napětí \bar{U} násobeno činitelem b . Výpočet tohoto činitele je popsán v části A4 Přílohy A.

6.6 Vnitřní kalibrační signály

- 6.6.1 Amplituda a kmitočet vnitřních kalibračních signálů mají být kalibrovány ve shodě s kapitolami 6.1 až 6.4. Taková měření často vyžadují zvláštní způsob práce, protože vnitřní kalibrační signály jsou často k dispozici jako napěťové (nebo proudové) impulsy, objevující se na zkušebních výstupech na čelním panelu.

7 KALIBRAČNÍ PROTOKOLY

- 7.1 V kalibračním protokolu musí být hodnoty uvedeny s odkazem na podmínky a hodnoty nastavení, vztahující se k příslušnému měření. Je-li ověřováno, zda parametry jsou uvnitř specifikovaných tolerancí, pak naměřené hodnoty (rozšířené o odhadnuté nejistoty měření, vypočítané v souladu s EAL-R2 [3] musí ležet uvnitř příslušných specifikovaných mezí [2].

8 LITERATURA

- 1 IEC 351 part 1. *Statement of the Characteristics of Electron Beam Oscilloscopes*. November 1981
- 2 EAL-R1. *Requirements Concerning Certificates Issued by Accredited Calibration Laboratories*. November 1995
- 3 EAL-R2. *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*. 1990
- 4 IEC 1083—1. *Digital Recorders for Measurements in High-voltage impulse tests. Part 1: Requirements for Digital Recorders*. 1991
- 5 Schuon, E.; Wolf, H.: *Nachrichtenmeßtechnik*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1981
- 6 Mellis, D.: *Schnelle Speicheroszilloskope*. Philips GmbH Kassel, 1989
- 7 Gans, W.: *Dynamic Calibration of oscilloscopes and Waweform Recorders*. Conf. Record of IEEE Instrum. Meas. Tech. Conf. , San Jose, CA, Feb. 13-15, 1989
- 8 Green, P. J.: *Automated Test and Evaluation Center for Waveform Digitizer Systems and Components*. IEEE-IM 39 (1990)1, 101

PŘÍLOHA A

A1 Výstup dat

A1.1 Osciloskop se používá k zobrazení vzorků signálu jako funkce času:

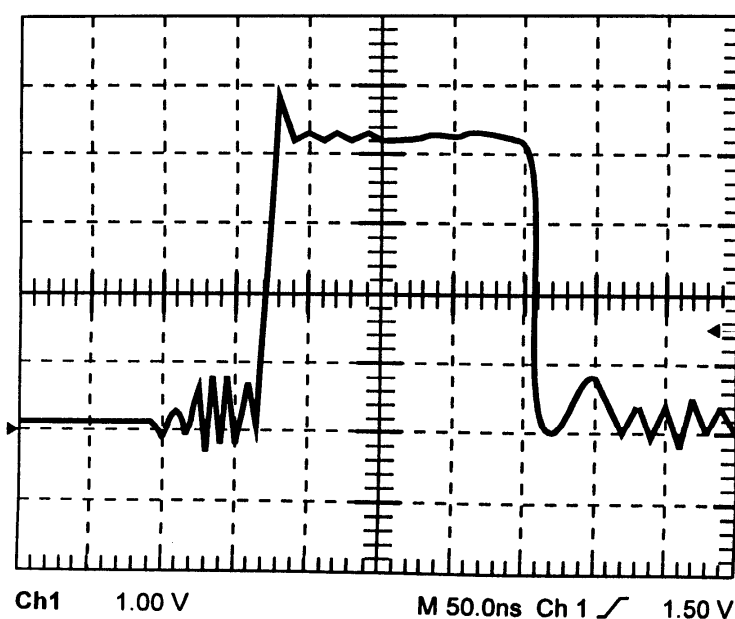
$$Y = f(t) \quad (\text{A1})$$

A1.2 Speciální převodníky mohou být použity k reprezentaci jiných fyzikálních veličin:

$$Y = f(X) \quad (\text{A2})$$

A1.2 Naměřená data jsou zobrazena pomocí obrazovky displeje nebo předána zvláštními datovými rozhraními. Signály jsou upravovány v amplitudě nastavením zesilovačů/zeslabovačů (a pokud je to nezbytné i dalších vnějších děličů) a v časové ose změnou kmitočtu generátoru vychylování.

A1.3 Aby se usnadnila interpretace dat, odpovídajících průběhu signálu, zobrazeného na obrazovce, je obrazovka opatřena souřadnicovou sítí, jejíž jednotky odpovídají dělení volt/dílek na svislé ose a sekunda/dílek na vodorovné ose. Současně zobrazované alfanumerické poznámky nebo cursorové funkce mohou být využity pro podporu popisu zobrazení (Obr.A1). S číslicovými paměťovými osciloskopy jsou dodávána rozhraní, umožňující přístup k údajům o zobrazené křivce pro další zpracování signálu (např. v počítači).



Obr. AA: Zobrazení impulsu na obrazovce

A1.4 Souřadnicová síť umožňuje provést požadovaná měření amplitudy, kmitočtu a dalších jevů a jiných parametrů signálu, jako přechodové jevy, tlumení a zkreslení šikmých hran. Většina číslicových paměťových osciloskopů je schopno analýzy jako jsou integrace, derivace, Fourierova transformace a výpočet parametrů signálu z digitalizovaných dat.

A2 Vyhodnocení údajů

A2.1 Analýza signálů pomocí osciloskopu je zatížena nejistotami. Nejistoty jsou způsobeny použitým osciloskopem, úpravou signálu a poměrem mezi parametry signálu a osciloskopu. Samostatně musí být zvážena šířka pásma, rychlost nárůstu signálu zakončení vedení a vstupní a výstupní impedance právě tak, jako - v případě číslicových paměťových osciloskopů - vzorkovací kmitočet a způsob vzorkování.

A3 Nejistoty měření při kalibraci osciloskopu

A3.1 Zobrazovací systém

A3.1.1 Je-li signál analyzován na obrazovce, musí být vzat v úvahu typ rastru. Je rozdíl mezi vnitřní a vnější souřadnicovou sítí. Vnější souřadnicová síť je nanášena na přední straně zobrazovací elektronky. Vzniklá mezera mezi vrstvou luminoforu a rastrem je nejméně rovna tloušťce skla (podle typu). To zvyšuje nejistotu vlivem paralaxy, která může být významně snížena užitím vnitřní souřadnicové sítě. Ta je vyryta zevnitř čelní strany obrazovky.

A3.1.2 V důsledku geometrického zkreslení při vychylování paprsku je často užíváno jen 60 až 70% svislého rozsahu indikace ve středu obrazovky. V důsledku šumu a protože ostření není neomezené, činí šířka paprsku řádově 1 až 2% z rozsahu indikace. Jako referenční bod je používán okem interpolovaný střed paprsku. U číslicových osciloskopů s elektronicky generovanou souřadnicovou sítí, je síť vytvářena v jedné rovině se stopou signálového paprsku. U signálu s nekorelovaným šumem může být poměr signál/šum (SNR) vylepšen průměrováním periodických signálů. To má příznivý vliv na kvalitu obrazu.

$$SNR = \sqrt{n} \quad (A3)$$

SNR = poměr signál/šum

n = počet průměrovaných křivek

A3.1.3 Nejistota odečítání může být dále minimalizována užitím *cursorů* (získávajících informace ze vzorkovaných hodnot) a alfanumerického

odečítání a také užitím přímého zpracování vzorkovaných hodnot integrovaným počítačem (rozdíl mezi optickým a číslicovým rozlišením).

A3.2 Systém svislého vychylování

- (a) Pro analýzu veličin, souvisejících s amplitudou signálu je dominantní převodní charakteristika systému svislého vychylování. Charakteristika je popsána uvedením šířky pásma, délkou čela, citlivostí a vstupní impedancí. Převodní charakteristika je dále určena kmitočtovou odezvou (zvlnění), chováním fáze (rozdíly mezi dobou přenosu jednotlivých harmonických), šumem a odrazy na vstupu. Posledně jmenované položky jsou zvláště důležité pro chování fáze. Proto jsou pravoúhlé impulsy zvláště vhodné pro popis těchto vlastností (přechodová odezva systému svislého vychylování).
- (b) U svislého vychylování je přizpůsobení signálu realizováno v systému vstupního děliče/zesilovače. Protože zesilovací stupně vykazují kromě svého vstupního odporu také vstupní kapacitu, musí být děliče (vnitřní a vnější útlumové články, např. sonda) kmitočtově kompenzované podle dělicího poměru. Kromě toho musí být uváženy a zpracovány problémy přizpůsobení jednotlivých součástí (např. generátoru, použitých propojovacích kabelů a osciloskopu). Vzájemně nepřizpůsobené impedance vedou k odrazům, které u impulsních a jiných vysokofrekvenčních měření způsobují změnu tvaru signálu. Zvláštní pozornost musí zde být věnována vstupní kapacitě osciloskopu, která je zařazena paralelně ke vstupnímu odporu (např. 1 M Ω). Vznikající kapacitní složka nemůže být na vyšších kmitočtech zanedbána. To také vyžaduje užití vnějšího odporu 50 Ω , zapojeného na vstup osciloskopu. V důsledku paralelní kapacity na vstupu osciloskopu se vnitřní impedance mění se zvyšujícím se kmitočtem (a nevhodné přizpůsobení vede ke zvýšení odrazů signálu).

A3.2.1 Délka čela a týlu, vlastní délka čela osciloskopu

- (a) Délka čela je důležitý parametr v popisu osciloskopu. Aby se vyloučily počáteční přechodové jevy či náběhy nebo vlivy okrajů kmitočtového pásma, které mohou mít vliv na přesnost měření, jsou délky čela a týlu měřeny v souladu s definicí na hraně impulsu mezi 10% a 90% výšky impulsu.
- (b) Jestliže má impuls překmit nebo podkmit, pak hodnota 100% nemůže být vztažena k velikosti špičky, ale je vztažena ke střední výšce vrcholu. Nesmí být započteny žádné napěťové špičky či zákmity. Měření délky týlu se provádí s použitím stejné procedury, jako při

měření týlové hrany impulsního signálu. Při velmi krátkých časech musí být kromě délky čela osciloskopu t_0 též vzata v úvahu délka čela signálu z impulsního generátoru t_G . Obě délky, sečtené geometricky, dávají celkovou délkou čela t_a :

$$t_a = \sqrt{t_0^2 + t_G^2} \quad (\text{A4})$$

- (c) Vztah (A4) je platný pouze když přenosová charakteristika jednotlivých částí odpovídá charakteristice Gaussovského filtru.

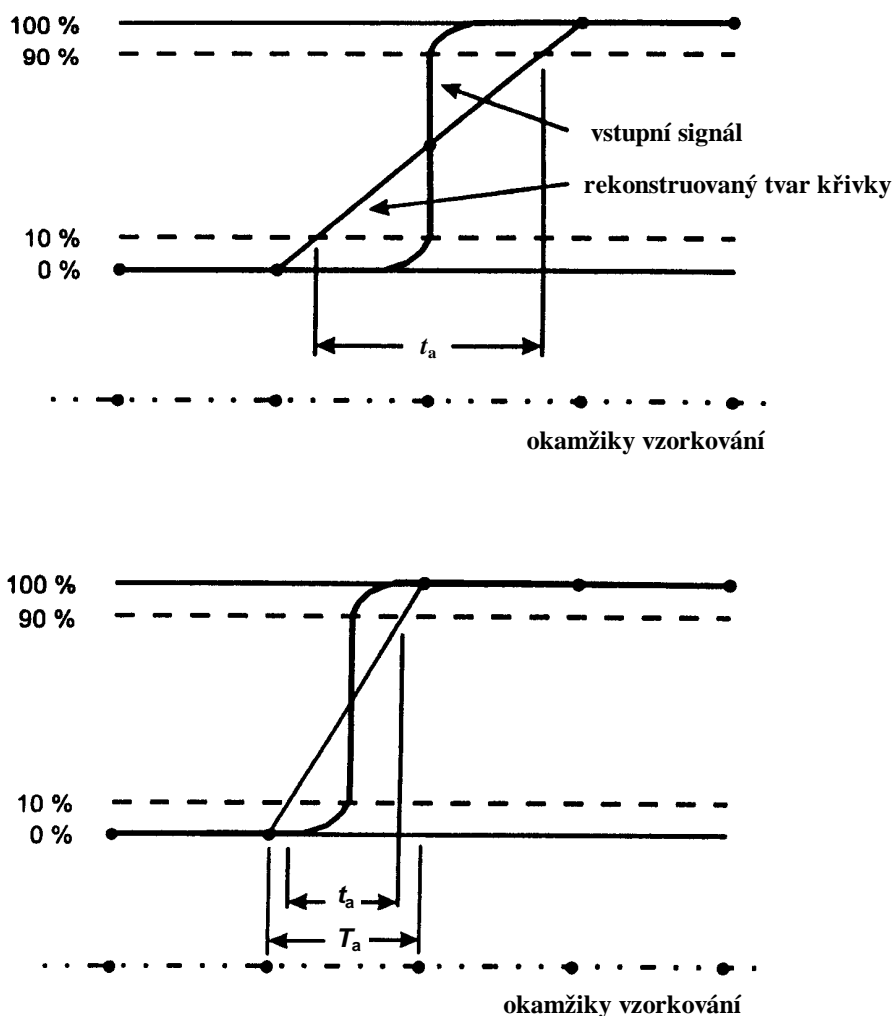
A3.3.3 Délka čela a vzorkovací kmitočet

- (a) Chování analogového osciloskopu při přenosu signálu může být popsáno uvedením šířky pásma podle vztahu (A5):

$$B \cdot t_0 = K \quad (\text{A5})$$

kde B je -3 dB šířka pásma, t_0 délka čela a K konstanta.

- (b) Pouze za určitých podmínek může šířka pásma osciloskopu sloužit k určení výsledné délky čela. Součin šířky pásma a délky čela (K) je různý pro různé typy dolních propustí. Čím strmější je sklon přechodu mezi propustným a nepropustným pásmem, tím větší je konstanta K (např. pro filtr s jedním pólem: $K = 0,35$; v kontrastu s tím Butterworthův filtr 10. řádu: $K = 0,488$). Protože překmit se zvyšuje s rostoucí strmostí hrany, užívají se obvykle pro svislé vychylování zesilovače s plochou přechodovou charakteristikou. Jestliže je přenosová funkce Gaussovská, je dosaženo minimální možné délky čela bez jakéhokoli překmitu.
- (c) Hodnotící kritérium "šířka pásma" a vztah (A5) nejsou obecně platné u číslicových osciloskopů protože do vyhodnocení a zobrazení vstupuje jak vzorkovací kmitočet, tak i rekonstrukce signálu. Obr. A2 tak prozrazuje, že lineární interpolací se získají různé hodnoty délky čela v závislosti na bodech vzorkování. Na obr. A2 (dole) leží hrana schodu mezi dvěma body vzorkování, takže v důsledku reprezentace je délka čela $t_a \approx 0,8 T_A$.
- (d) Z těchto skutečností plyne, že nejmenší měřitelná (efektivní) délka čela, definovaná pro číslicové osciloskopy při použití lineární interpolace odpovídá nejmenšímu intervalu vzorkování. U periodických signálů nebo náběžných hran může být použito vzorkování v ekvivalentním čase. Při této metodě je při každém průběhu signálu ovzorkována jen část hodnot, požadovaných pro naplnění číslicové paměti a vzorkovací kmitočet určuje nutný počet průběhů k úplnému záznamu signálu.

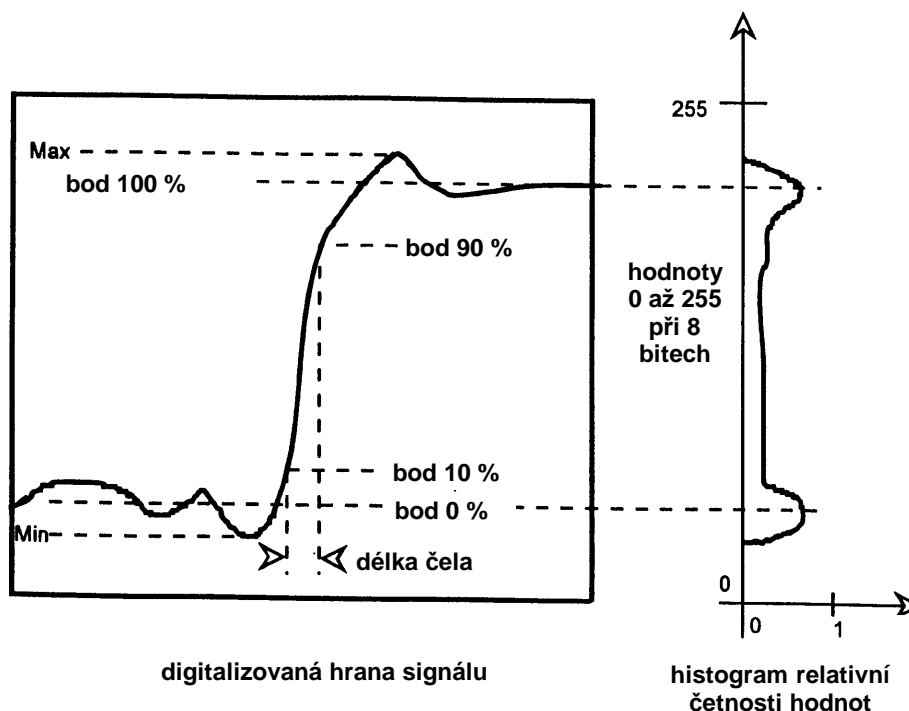


Obr. AB: Nejistoty měření přechodové odezvy

- (e) Stupně, podílející se na nízkém zkreslení při rekonstrukci signálu jsou: A/D převodník, charakterizovaný nízkým kvantizačním šumem; spouštěcí obvod s malou nestabilitou (jitter) a A/D převodník modulu časového zpoždění také s malou nestabilitou (jitter). Jestliže vlastnosti těchto stupňů nejsou vyhovující, způsobí to rozpad signálu do kladných a záporných nespojitostí, tvořených několika kvantizačními kroky na stoupající rovné přímce. Zlepšení lze dosáhnout průměrováním.
- (f) Dominantním vlivem u jednorázových jevů je vzorkovací kmitočet. Ke správné rekonstrukci signálu je potřebné, aby vzorkovací kmitočet byl nejméně dvojnásobný proti nejvyšší harmonické, obsažené v signálu. Body vzorkování nejsou synchronní s tvarem signálu, tzn. že pokud vzorkovací perioda odpovídá délce čela signálu, měřená délka čela se

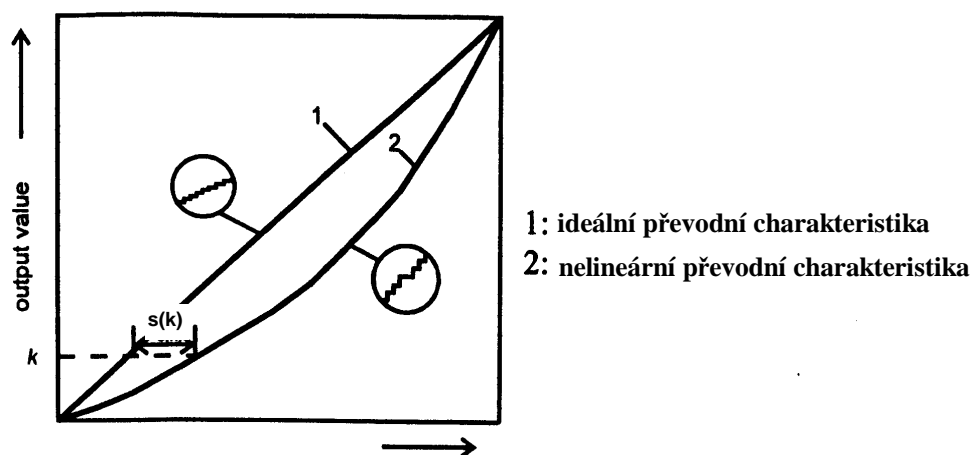
může odlišovat až o 50% v závislosti na náhodné poloze bodů vzorkování na hraně signálu.

- (g) Jiný problém představuje automatické určení parametrů signálu z digitalizovaných dat. Používané algoritmy se podstatně liší pokud jde o zahrnutí překmitu a podkmitu do výpočtu délky čela. Jestliže jsou vztažné body 0 % a 100 % odvozeny pouze z minima a maxima napětí, pak určení umístění výsledných bodů 10 % a 90 % bude nesprávné. To vede na nesprávné určení hodnoty délky čela, která je měřena. V tomto případě prokázalo spolehlivost vyhodnocení pomocí statistických metod. Analyzuje se distribuční funkce digitalizované křivky signálu a využití nedvojznačných vystupujících maxim v bodech 0% a 100% (Obr. A3).
- (h) Základní rys chování A/D převodníku a číslicového paměťového osciloskopu vyplývá z charakteristiky převodu. Ta udává vztah mezi hodnotou, zaznamenanou číslicovým osciloskopem a stejnosměrným napětím připojeným na vstup o velikosti v celém rozsahu převodu. U ideálního N-bitového převodníku je tato charakteristika rozdělena do 2^N stupňů. Odchytky skutečné měřené charakteristiky od ideální je vyjádřen diferenciální a integrální nelinearitou. Ta popisuje nedokonalé chování číslicového paměťového osciloskopu při zaznamenávání pomalu se měnících signálů (Obr. A4).



Obr. A C: Určení bodů 0 % a 100 %

- (i) Charakteristika převodníku, zjištěná pro stejnosměrné napětí není často dostačující pro rychle se měnící signály. Se zvyšující se strmostí měřeného signálu již nestačí určité úrovně A/D převodníku sledovat křivku signálu, zatímco sousední úrovně ji zaznamenávají častěji.
- (j) Toto neodpovídající chování je vyjádřeno dynamickou nelinearitou, která popisuje selhání jedné nebo několika kvantizačních úrovní při opakovaném záznamu vstupního lichoběžníkového nebo trojúhelníkového signálu s danou strmostí. Selhání jednotlivých kvantizačních úrovní budí dojem, že převod rychle se měnících signálů je proveden s menším počtem bitů. Tato chyba může být jednoduše vyjádřena tzv. počtem efektivních bitů, určeným pomocí sinusových signálů. Kvantitativní vyjádření však může být získáno jen zřídka.



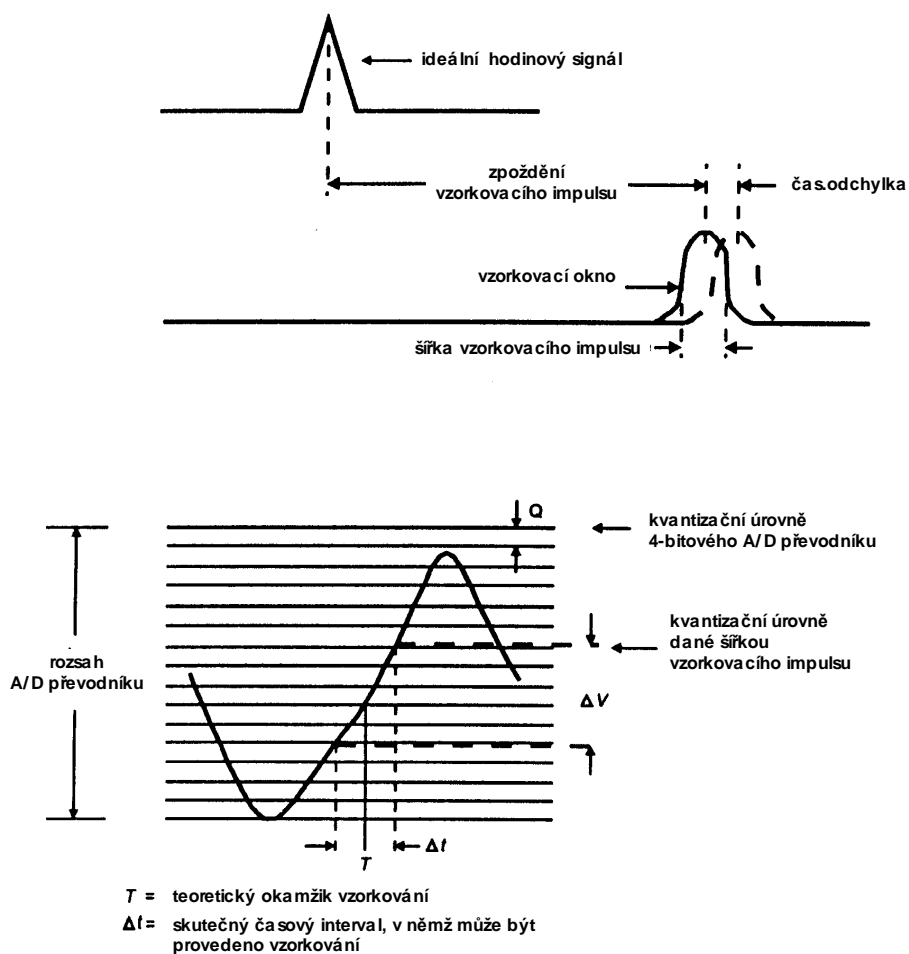
Obr. AD: Integrovaná nelinearita $s(k)$ na kvantizační úrovni k

- (k) Počet efektivních bitů tedy nemá žádnou důležitost při měření amplitud a špičkových hodnot měřících signálů s vyšším kmitočtem změny signálu jsou v této oblasti nulové. K dispozici je pak plný počet bitů a dominují jiné zdroje chyb jako např. malá vzorkovací rychlost.

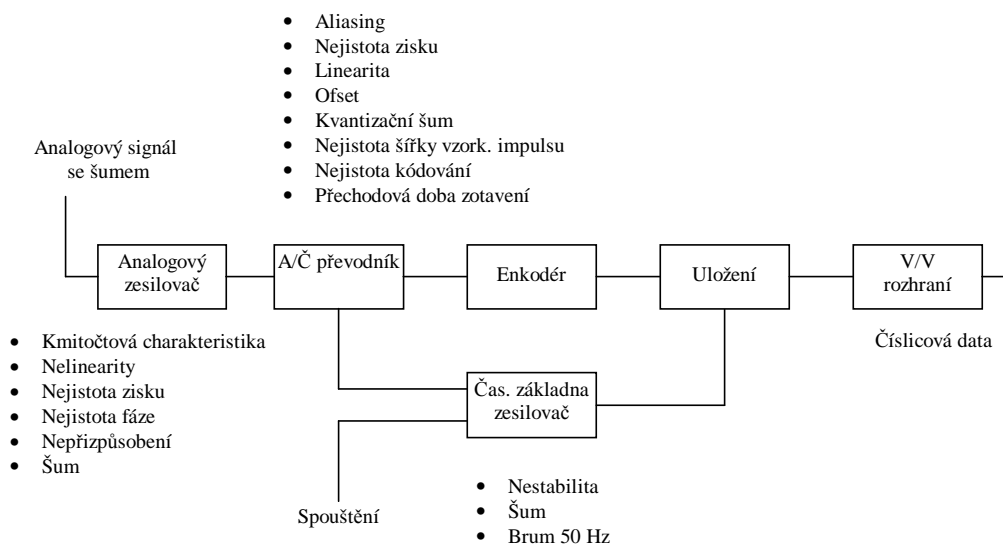
A3.3 Systém vodorovného vychylování

- (a) Přesnost, linearita a stabilita systému vodorovného vychylování mají rozhodující důležitost při časových měřeních. V analogových systémech, díky nárůstu pomalu rostoucí části pilovité funkce, určuje rychlost vychylování elektronového paprsku a tím i vztah osy Y k času generátor pilovitého průběhu.
- (b) Pro měření času a kmitočtu pomocí číslicových osciloskopů jsou platné tytéž vztahy jako pro analogové osciloskopy. K času vztažená měření

jsou prováděna po dobu nejdelšího možného časového intervalu. U analogových osciloskopů má problém linearit y poněkud menší význam než problém nejistoty vzorkovacího intervalu u číslicových osciloskopů (srov. Obr. A6).



Obr. AE: Dynamický projev chyby vlivem šířky vzork. impulsu



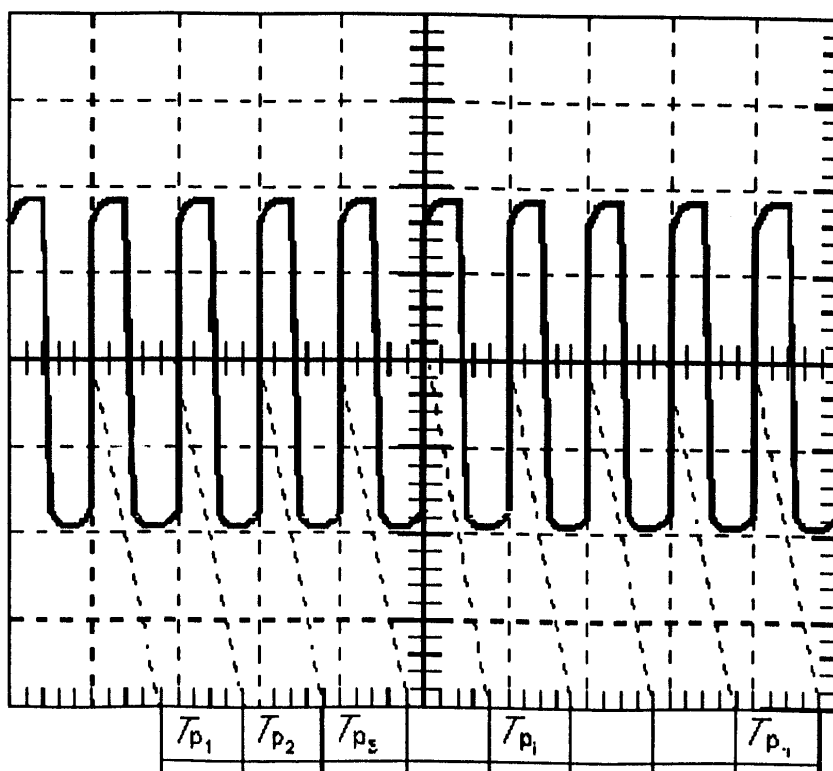
Obr. AF: Nejistoty měření v digitizéru, blokový diagram

A3.3.1 Linearita

(a) Odchylka L od lineárního průběhu musí být vypočítána z jednotlivých měření mezi hlavními čarami souřadnicové sítě osciloskopu v rámci měření časové základny (Obr. A7).

$$L = \frac{T_{p_i \max} - T_{p_i \min}}{\bar{T}_p} \qquad L = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{p_i} - \bar{T}_p)^2} \qquad (A6)$$

$T_{p_i \max}$	největší perioda
$T_{p_i \min}$	nejmenší perioda
\bar{T}_p	průměrná perioda



Obr. AG: Kontrola linearity časové základny. Obrazovka ve zcela vyváženém stavu za ideální linearity

A4 Kalibrace vysokofrekvenčním napětím

- (a) Do kmitočtu 30 MHz jsou k dispozici kalibrátory střídavého napětí, v nichž je do jednoho zařízení sloučen generátor a voltmetr. Termopřevodníky jsou vhodné jako etalony vysokofrekvenčního napětí díky jejich dobré dlouhodobé stabilitě. Pro kmitočty do 1 GHz jsou vyráběny komerčně s koaxiálním T přechodem integrovaným do koaxiálního pouzdra (např. typ Ballantine 1396A). U komerčních zařízení pro kmitočty do 100 MHz (např. Fluke A55, Ballantine 1394A a 1395A) musí být přechod připojen zvnějšku. Termopřevodníky mohou být kalibrovány s nejistotou měření $\leq 1\%$ s návazností na národní etalon vysokofrekvenčního napětí na kmitočtech do 1 GHz.
- (b) Pro přesná měření vysokofrekvenčních napětí a amplitudy je nutno uvažovat polohu referenční roviny například když jsou užívány konektorové přechody nebo propojovací vedení. Odrazy napěťových vln vedou ke vzniku stojatých vln napětí na vedeních jestliže charakteristická impedance vedení Z_L a zakončovací impedance Z_E , připojená na konec vedení, nejsou stejné. Modul napětí $|U_{IN}|$ na vstupu

se liší od modulu napětí $|U_E|$ na výstupu bezeztrátového vedení o elektrické délce L . Pro bezeztrátové vedení platí:

$$|U_{IN}| = \left| \cos(2\pi \cdot L/\omega l) + j \cdot Z_L/Z_E \cdot \sin(2\pi \cdot L/\omega l) \right| \cdot |U_E| \quad (A7)$$

kde ωl je vlnová délka vysokofrekvenčního signálu. Podobně může být rozdíl mezi $|U_{IN}|$ a $|U_E|$ způsoben útlumem vedení. Útlum vedení je úměrný odmocnině měřicího kmitočtu. Tenké kabely mohou vykazovat útlum více než 1 dB/m na 1 GHz.

- (c) Termopřevodníky jsou vždy (a měřiče výkonu především) zařízením, měřícím efektivní hodnotu. U osciloskopů se však kalibruje amplituda, t.j. špičková hodnota. Musí být tudíž zajištěno, aby měřicí signál byl co nejvíce sinusový, tzn. že generátor musí mít dostatečnou spektrální čistotu.
- (d) Vstupní a výstupní impedance komerčních vysokofrekvenčních generátorů, osciloskopů pro vyšší kmitočty a vysokofrekvenčních měřičů výkonu, stejně tak jako charakteristická impedance používaných koaxiálních vedení jsou obecně více či méně dobře přizpůsobeny jmenovité hodnotě referenční charakteristické impedance Z_0 (ve většině případů 50 Ω). Odchylka impedance Z_X od jmenovité hodnoty je určena činitelem odrazu:

$$\Gamma = (Z_X - Z_0)/(Z_X + Z_0) \quad (A8)$$

- (e) Jestliže je napětí měřeno s kalibrovaným měřičem výkonu a T přechodem (6.5.2.1) nebo kalibrovaným generátorem (6.5.2.2), může se významně zvýšit nejistota jestliže vstupní vodivost měřiče výkonu (G_L) nebo osciloskopu (G_{OS}) není přesně známa. Vstupní vodivost G_{IN} nějakého zařízení může být určena, je-li znám vstupní činitel odrazu Γ_{IN} :

$$G_{IN} = G_0 \frac{1 - |\Gamma_{IN}|^2}{|1 + \Gamma_{IN}|^2} = G_0 \frac{1 - |\Gamma_{IN}|^2}{(1 + |\Gamma_{IN}|^2 + 2|\Gamma_{IN}|\cos\varphi)} \quad (A9)$$

a $G_0 = 1/Z_0$. Jestliže je znám pouze modul $|\Gamma_{IN}|$, může být nejistota měření odhadnuta když se užije G_0 namísto G_{IN} (G_L ve vztahu (3), G_{OS} ve vztahu (5)).

Jestliže $|\Gamma|^2 \ll |\Gamma| \ll 1$, (9) se zjednoduší na:

$$G_{IN} \approx G_0(1 - 2|\Gamma_{IN}|\cos\varphi) \quad (A10)$$

- (f) Jestliže při měření napětí na osciloskopu pomocí generátoru a kalibrovaného měřiče výkonu (6.52.2) nejsou činitelé odrazu generátoru (index G), měřiče výkonu (index N) a osciloskopu (index OS) zanedbatelné, \bar{U} je dáno vztahem

$$\bar{U} = \sqrt{[(2 \cdot P / G_{OS}) \cdot b]} \quad (\text{A11})$$

kde

$$b = (1 - |\Gamma_{OS}|^2) \cdot \frac{|1 - \Gamma_G \Gamma_N|^2}{|1 - \Gamma_G \Gamma_{OS}|^2} \quad (\text{A12})$$

a P je výkon, přivedený do osciloskopu (návaznost na kalibrovaný měřič výkonu).

- (g) Jestliže fáze činitele odrazu není známa a korekce tudíž není možná, pak k určení výsledné nejistoty měření napětí lze použít vztah (A12). Jestliže generátor a osciloskop je nutno propojit vedením, pak musí být generátor kalibrován společně s tímto vedením jako celek.
- (h) Protože nejistota měření výkonu a měření vodivosti, které mohou být v řádu několika procent, přispívají k celkové nejistotě měření amplitudy, může být relativní nejistota měření amplitudy při použití této metody v řádu několika procent.