# Chyby přístrojů a nejistoty měření. AD a DA převodníky. Multimetry, osciloskopy.

Starší skripta tady

https://drive.google.com/file/d/1U5rv3S4ixIYNgcrR9kIX0tcdnUZA2Ler/view?usp=sharing prezentace tady https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=4769

# Chyby přístrojů a nejistoty měření

Prezentace tady: <a href="https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/233038/mod">https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/233038/mod</a> resource/content/1/A1B38EMA-Predn 2tisk.pdf

Při každém reálném měření je vhodné uvádět i chyby a nejistoty. Samotná naměřená hodnota bez nejistoty nám nedává informaci, jak moc jí můžeme věřit.

V principu se při měření objevují 2 druhy chyb:

- Systematické při opakovaných měřeních zůstává chyba stálá, nebo se předvídatelně mění. Pokud známe příčinu chyby, můžeme ji korigovat. Jsou to například:
  - chyby metody záměrně zanedbáme některé veličiny ve vztahu. Například při měření napětí zanedbáme vnitřní odpor voltmetru)
  - o offset jinak také aditivní chyba, naměřená hodnota je vždy posunutá o konstantu
  - o chyba zesílení jinak multiplikativní chyba, naměřená hodnota je vždy vynásobena nějakou konstantou, např. nesprávná hodnota odporu v zapojení s OZ
- Náhodné při opakovaných měřeních téže veličiny se chyba nepředvídatelně mění. Nelze ji tedy korigovat. Zbavit se jí můžeme dostatečným počtem opakování měření. Výsledky všech měření zprůměrujeme a spočítáme směrodatnou odchylku. Náhodné chyby jsou např. náhodné šumy, nebo výkyvy hodnoty způsobené neznámými změnami vnějších podmínek (teplota, vlhkost vzduchu, elmag rušení)

Výpočet chyby měření je starší způsob výpočtu přesnosti měření. Spoléhá na to, že známe správnou hodnotu měřené veličiny. To je problematické – jak ji určit? Většinou se za správnou hodnotu bere hodnota naměřená přesnějším přístrojem. Tu ale také nemusíme mít k dispozici, takže pak chybu měření nespočítáme.

#### Přesnost měření

Výsledek měření není úplný, pokud neobsahuje údaj o přesnosti.

Klasický způsob vyjádření přesnosti měření - chyba měření:

$$\Delta_{(X)} = X_{(M)} - X_{(S)}$$
 (absolutní)  $\delta_{(X)} = \Delta_{(X)} / X_{(M)}$  (relativní)

X<sub>(M)</sub> - naměřená hodnota

 $X_{\mathrm{(S)}}$  - pravá (správná) hodnota - problém - není známa ightarrow tzv. konvenčně pravá hodnota.

Novější a používanější způsob je výpočet nejistoty měření. Ta nám z dostupných informací o měřících přístrojích, podmínkách měření, počtu opakování měření atd. řekne, jak moc spolehlivě jsme hodnotu naměřili. Vlastně nám dá "pás" okolo naměřené hodnoty, kde s vysokou pravděpodobností leží skutečná hodnota.

### Hodnocení přesnosti měření novým způsobem - nejistota měření.

- Nejrůznější vlivy vyskytující se spolu s měřenou veličinou se projeví odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou měřené veličiny
- Pokud jsou tyto vlivy systematické a jejich vliv je známý, korigují se (např. chyby metody)
- Skutečná hodnota leží s jistou pravděpodobností v určitém "tolerančním pásmu" okolo výsledku měření - rozsah tohoto pásma charakterizuje nejistota měření.

1993 - Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) *Guide to the Expression of Uncertainty of Measurements* (definice základních pojmů a vztahů a příklady jejich aplikace).

#### Definice:

- měřená hodnota jako střední prvek souboru, který reprezentuje měřenou veličinu
- nejistota měření jako parametr přiřazený k výsledku měření, charakterizující rozptýlení hodnot, které lze odůvodněně pokládat za hodnotu veličiny, jež je objektem měření.

Nejistot měření jsou 2 typy podle toho, jaký typ chyby (systematická nebo náhodná) vystihují. Nejistotu typu A má smysl počítat pouze pokud máme k dispozici hodnoty z opakovaného měření. Pokud máme jen jednu naměřenou hodnotu z 1 pokusu, má smysl počítat jen nejistotu typu B. To se stane celkem často, třeba proto že opakované měření je moc časově náročné nebo drahé. I v EMA jsme vždy kvůli času měřili všechno jen jednou. Pokud používáme přístroj za podmínek stanovených výrobcem, složka nejistoty typu A způsobená prostředím je v toleranci. Je zahrnuta v údajích přesnosti přístroje od výrobce.

# Nejistota měření

standardní nejistota = standardní (směrodatná) odchylka veličiny, pro niž je nejistota udávána. (označuje se symbolem u z angl. uncertainty).

#### Nejistota měření obecně obsahuje řadu složek:

 a) složky, které mohou být vyhodnoceny ze statistického rozložení výsledků měření a mohou být charakterizovány experimentální standardní odchylkou (odpovídá v podstatě náhodným chybám dle klasického přístupu)

#### standardní nejistoty typu (kategorie) A (označení u<sub>A</sub>)

- jsou stanoveny z výsledků opakovaných měření statistickou analýzou série naměřených hodnot,
- jejich příčiny se považují za neznámé a jejich hodnota klesá s počtem měření;
- b) složky, které se vyhodnocují z jejich předpokládaného pravděpodobnostního rozložení např. nejistoty údajů měřicích přístrojů, nejistoty hodnot pasivních prvků apod.
   (odpovídá v podstatě systematickým chybám dle klasického přístupu s tím, že chyby, které lze korigovat, jsou korigovány)

#### standardní nejistoty typu (kategorie) B (označení u<sub>R</sub>)

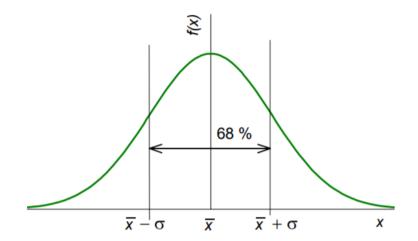
- jsou získány jinak než statistickým zpracováním výsledků opakovaných měření
- jsou vyhodnoceny pro jednotlivé zdroje nejistoty identifikované pro konkrétní měření a
  jejich hodnoty nezávisí na počtu opakování měření
- pocházejí od různých zdrojů a jejich společné působení vyjadřuje výsledná standardní nejistota typu B.

Většinou se předpokládá, že nejistota typu A vychází z normálního rozložení měřených hodnot (třeba náhodného šumu). To znamená, že hodnota  $u_A$  odpovídá směrodatné odchylce.

# Fyzikální význam standardní nejistoty:

Standardní nejistota ~ směrodatná odchylka veličiny x

a) představuje u veličiny mající *normální rozdělení* polovinu šířky intervalu, v jehož středu leží výsledek měření  $\bar{x}$  (průměrná hodnota opakovaných měření) veličiny x a ve kterém s pravděpodobností přibližně 68 % leží skutečná hodnota veličiny x



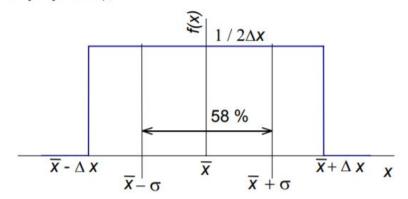
Hustota pravděpodobnosti:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{(x-x^{-})^2}{2\sigma^2}}$$

### ~ standardní nejistotě typu A;

U standartní nejistoty typu B často předpokládáme, že měřené hodnoty pochází z rovnoměrného rozložení. Měřená veličina může mít i jiné rozložení a i pak se dá odvodit vztah pro  $u_B$ .

b) u veličiny mající *rovnoměrné rozdělení* v intervalu o šířce  $2\Delta x$  v jehož středu leží výsledek měření x veličiny x (tj. všechny hodnoty této veličiny leží v intervalu  $\pm \Delta x$  okolo výsledku měření) je rovna  $\Delta x/\sqrt{3}$  (pravděpodobnost, že v intervalu  $x \pm \Delta x/\sqrt{3}$  leží skutečná hodnota veličiny x je 58%),



$$D = \frac{[\Delta x - (-\Delta x)]^2}{12} =$$

$$= \frac{4\Delta x^2}{12} = \frac{\Delta x^2}{3}$$

$$\sigma = \sqrt{D} = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}}$$

### častý předpoklad pro složky standardní nejistoty typu B

Pokud je to možné, uvádíme výslednou nejistou která v sobě zahrnuje nejistoty  $u_A$  i  $u_B$ . Kombinovaná nejistota je geometrický průměr obou nejistot  $u_A$  a  $u_B$ .

# Kombinovaná standardní nejistota u<sub>C</sub>:

Sloučení standardní nejistoty typu A  $(u_A)$  s výslednou standardní nejistotou typu B  $(u_B)$ :

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)}$$

Když už uvádíme nějaký výsledek měření, chceme, aby byl spolehlivý. Pokud uvedeme údaj X+- uC, říkáme tím, že s pravděpodobností 0,68 nebo 0,58 leží skutečný údaj v pásmu (X-u<sub>C</sub>, X+u<sub>C</sub>). Nejse si teda moc jistí, že v tom pásmu skutečná hodnota opravdu leží. Proto se někdy používá rozšířená nejistota, která nám pásmo rozšíří. Jsme si pak jistí třeba s pravděpodobností 0,95 nebo více, že skutečná hodnota v pásmu opravdu leží. Typicky se používá koeficient rozšíření k=2.

### Rozšířená nejistota

Pravděpodobnost, že skutečná hodnota leží v intervalu udaném standardní nejistotou je nízká (68 % pro normální rozložení - nejistoty typu A, 58 % pro rovnoměrné rozdělení - časté u nejistot typu B)

1

Rozšířená nejistota označená U(x) je definována jako součin kombinované standardní nejistoty  $u_{\rm C}$  a koeficientu rozšíření  $k_{\rm r}$ :

$$U(x) = k_{\rm r} u_{\rm C}(x)$$

kde U je rozšířená nejistota,

 $k_{\rm r}$  koeficient rozšíření,

u<sub>C</sub> kombinovaná standardní nejistota

x měřená veličina.

- s rozšířenou nejistotou je nutno vždy uvést číselnou hodnotu koeficientu rozšíření k<sub>r</sub>
- > nejčastěji se používá  $k_r = 2$ , v některých případech může hodnota  $k_r$  ležet i v intervalu <2, 3>
- ightharpoonup pro  $k_r = 2$  je pravděpodobnost, že skutečná hodnota leží v intervalu udaném rozšířenou nejistotou 95 % pro normální rozložení (pro jiná běžně používaná rozložení je ještě vyšší)

### Nepřímá měření

Někdy hodnoty neměříme přímo. Výsledek, který odečítáme z přístroje tedy není konečný, ale dosadíme ho do nějakého vzorečku. Pomocí jiných hodnot, které přímo měříme, pak z vzorečku získáme hledanou hodnotu veličiny nepřímo. Například měření odporu pomocí měření napětí na rezistoru – známe proud rezistorem, změříme napětí a odpor získáme dosazením do vzorečku Ohmova zákona. Nejistotu je pak složitější spočítat, protože závisí i na konkrétním vzorci a figuruje v ní více měřených veličin.

# Vyhodnocení nejistot nepřímých měření

Nepřímá měření jsou měření, u kterých se měřená veličina Y vypočítá pomocí známé funkční závislosti z N veličin  $X_{i,}$  určených přímým měřením, jejichž odhady a nejistoty (případně i vzájemné vazby - kovariance) jsou známy, tedy:

$$Y = f(X_1, X_2, ..., X_N)$$
 kde  $f$  je známá funkce.

Odhad y hodnoty výstupní veličiny Y lze stanovit ze vztahu:

$$y = f(x_1, x_2, ..., x_N)$$
 kde  $x_1, x_2, ..., x_N$  jsou odhady vstupních veličin  $X_1, X_2, ..., X_N$ .

Zákon šíření nejistot v případě, že vstupní veličiny nejsou mezi sebou korelovány, je dán vztahem

$$u_{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_{i}} u_{xi}\right)^{2}}$$

kde  $u_y$  je kombinovaná standardní nejistota veličiny y  $u_{xi}$  standardní kombinované nejistoty měřených veličin  $x_i$ .

Pozn. 1: Při slučování nejistot se ani při jejich malém počtu neuvažuje jejich aritmetický součet jako při výpočtu maximální možné chyby, ale vždy se používá součet geometrický

Pozn. 2: Nejistota hodnoty X pasivního prvku (etalonu, dekády, děliče apod.) použitého v měřícím obvodu, u nějž je uvedeno toleranční pásmo  $\pm \Delta_{max}$  popř. třída přesnosti TP, se

určí dle vztahů: 
$$u_{\rm B}=\sigma=\frac{\Delta_{\rm max}}{\sqrt{3}}$$
 popř.  $u_{\rm B}=\sigma=\frac{TP/100}{\sqrt{3}}X$ 

### Příklad výpočtu nejistoty měření odporu Ohmovou metodou, Rx = U/I:

U: Čísl. voltmetr, rozsah 200 mV; ±0,1 % z odečtené hodnoty ±0,05 % z rozsahu;

$$U = 150 \text{ mV};$$

$$u_{\rm U} = \frac{\frac{0.1}{100}150 + \frac{0.05}{100}200}{\sqrt{3}} = \frac{0.15 + 0.1}{\sqrt{3}} = 0.14 \text{ mV} \approx 0.1\%$$

I: Mgel ampérmetr, rozsah 1,2 A; TP = 0.5; I = 0.4 A

$$u_1 = \frac{0.5 \cdot 1.2}{100\sqrt{3}} = 0.0034 \text{ A} \approx 0.87 \%$$

Standardní nejistota měření odporu:

$$u_{R_{X}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial x_{i}} u_{xi}\right)^{2}} = \sqrt{\left(\frac{\partial (U/I)}{\partial U} u_{U}\right)^{2} + \left(\frac{\partial (U/I)}{\partial I} u_{I}\right)^{2}} = \sqrt{\left(\frac{1}{I} u_{U}\right)^{2} + \left(\frac{-U}{I^{2}} u_{I}\right)^{2}} = 3,2 \text{ m}\Omega$$

Standardní nejistota měření odporu vyjádřená v relativním tvaru:

$$\frac{u_{R_{X}}}{R_{X}}100 = 100\sqrt{\left(\frac{1}{I}\frac{u_{U}}{U/I}\right)^{2} + \left(\frac{-U}{I^{2}}\frac{u_{I}}{U/I}\right)^{2}} = 100\sqrt{\left(\frac{u_{U}}{U}\right)^{2} + \left(\frac{-u_{I}}{I}\right)^{2}} = \sqrt{0.1^{2} + 0.87^{2}} = 0.88\%$$

Výsledek včetně rozšířené nejistoty s koeficientem rozšíření  $k_r = 2$ :

$$R_{\rm X} = U/I = 0.15/0.4 = 0.3750 \ \Omega \pm 6.4 \ \text{m}\Omega$$
;  $k_{\rm r} = 2$  popř.  $R_{\rm X} = 0.3750 \ \Omega \pm 1.7 \%$ ;  $k_{\rm r} = 2$ 

Pozn: V případě <u>součinu nebo podílu</u> se pod odmocninou <u>sčítají kvadráty nejistot</u> vyjádřených <u>v relativním tvaru</u>

### Měření ručkovými přístroji

Při měření elektromechanickými přístroji (např. ručkový magnetoel. voltmetr) se udává TP (třída přesnosti) a M (rozsah měření – většinou se dá na přístroji nastavit). TP je udána výrobcem a vyjadřuje:

Přesnost přístrojů, na které se vztahuje ČSN 356203, se vyjadřuje třídou přesnosti. *Třída přesnosti* TP je číslo ze zvolené řady

$$0.05 - 0.1 - 0.2 - 0.5 - 1 - 1.5 - 2.5 - 5$$

které udává mez dovolené relativní chyby přístroje v procentech největší hodnoty měřicího rozsahu  $\delta_{pM}$  (při referenčních podmínkách).

### a) ručkové přístroje

### Klasicky definovaná chyba přístroje ∆p:

- určuje maximální možnou odchylku naměřené hodnoty od hodnoty skutečné
- je definována třídou přesnosti TP:  $\Delta_P = \frac{TP}{100}\,M$  , kde M je hodnota měřicího rozsahu

# Určení standardní nejistoty údaje:

- interval, ve kterém hodnota měřené veličiny s velkou pravděpodobností leží, je roven  $<-\Delta_p, +\Delta_p>$
- předpokládáme, že se jedná o rovnoměrné rozložení.
- nejistotu údaje přístroje vypočteme ze vztahu  $u_{\rm B} = \sigma = \frac{\Delta_{\rm P}}{\sqrt{3}} = \frac{TP/100}{\sqrt{3}} M$

## Příklad výpočtu nejistoty měření elektromechanickým přístrojem

Elektromagnetický voltmetr; třída přesnosti TP = 0.5; rozsah přístroje M = 130 V.

Ovlivňující veličiny (teplota, mg. pole apod.) jsou v rozsahu hodnot definovaných výrobcem

Přístroj je používán za stanovených pracovních podmínek → jejich vliv nebude uvažován.

$$U_{\rm X} = 71,1 \text{ V}$$

(údaj přístroje se při opakovaných měřeních neměnil → nejistoty typu A nemusíme uvažovat)

Určení standardní nejistoty typu B: 
$$u_{\rm B} = \frac{TP/100}{\sqrt{3}}M = \frac{0.5/100}{\sqrt{3}}130 = 0.375 \, ({\rm V})$$

Výsledek včetně rozšířené nejistoty s koeficientem rozšíření  $k_{\rm r}=2$ :

$$U_x = 71.1 \text{ V} \pm 0.75 \text{ V}; k_r = 2$$

Výsledek včetně rozšířené nejistoty vyjádřené v relativním tvaru:

$$U_x = 71,1 \text{ V} \pm 0.75/71,1*100 \% = 71,1 \text{ V} \pm 1,1 \%; \quad k_r = 2$$

### Měření číslicovými přístroji

U číslicových přístrojů (např. číslicový voltmetr) se udává:

- chyba rozsahu a chyba odečtené hodnoty,
- nebo rozlišení přístroje R, počet kvantizačních úrovní N a chyba odečtené hodnoty. Počet kvantizačních úrovní a chyba odečtené hodnoty by měly být udány od výrobce. Rozlišení je jakoby nejnižší číslo, které můžeme při zvoleném rozsahu vidět na monitoru. Pokud je rozsah 10V a mám na monitoru 4 místa, dostanu nejvyšší hodnotu 9,999V a nejnižší 0,001. Rozlišení proto bude 10e-3 (protože 1/1000).

### b) číslicové přístroje

### Klasicky definovaná chyba přístroje ∆₀:

- určuje maximální možnou odchylku naměřené hodnoty od hodnoty skutečné
- je definována
  - $\alpha$ ) chybou z odečtené hodnoty  $\delta_1$  a chybou z rozsahu  $\delta_2$ ; chybu údaje X určíme ze vztahu

$$\Delta_X = \frac{\delta_1}{100}\,X + \frac{\delta_2}{100}\,M \;, \quad \text{kde $M$ je největší hodnota měřicího rozsahu}$$

β) chybou z odečtené hodnoty δ1 a počtem kvantizačních kroků ±N; chybu údaje X určíme ze vztahu

$$\Delta_X = \frac{\delta_1}{100}\,X + N\,R$$
, kde  $R$  je rozlišení přístroje, tj. hodnota měřené veličiny odpovídající kvantizačnímu kroku,

### Určení standardní nejistoty údaje:

- interval, ve kterém hodnota měřené veličiny s velkou pravděpodobností leží, je roven
   Δ<sub>X</sub>, + Δ<sub>X</sub>>
- předpokládáme, že se jedná o rovnoměrné rozložení.
- nejistotu údaje přístroje vypočteme ze vztahu

$$u_{\mathrm{B}} = \sigma = \frac{\Delta_{\mathrm{X}}}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{\delta_{\mathrm{1}}}{100} \ X + \frac{\delta_{\mathrm{2}}}{100} \ M}{\sqrt{3}} \qquad \text{popř.} \qquad u_{\mathrm{B}} = \sigma = \frac{\Delta_{\mathrm{X}}}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{\delta_{\mathrm{1}}}{100} \ X + N \ R}{\sqrt{3}}$$

**Příklad**: Dva číslicové voltmetry s maximálním údajem 99999 jsou použity na rozsahu 10 V a jejich údaj je v obou případech 5.000 V. Jejich chyby jsou specifikovány následovně:

ČVA: ±0,01 % údaje ± 0,01 % rozsahu

ČVB: ± 0,01 % údaje ± 7 kvantovacích kroků.

Jaká je maximální možná chyba údaje (nejistota měření) obou voltmetrů a v jakých pásmech leží pravé hodnoty měřeného napětí v obou případech?

### Řešení:

 $\check{C}VA$ :  $|\Delta_v| \le 1.10^{-4}.5 \ V + 1.10^{-4}.10 \ V = 1,5 \ mV$ 

Pravá hodnota leží mezi 4,9985 V a 5,0015 V.

ČVB:  $|\Delta_v| \le 1.10^4.5 \text{ V} + 7.10^4 \text{ V} = 1.2 \text{ mV}$ 

Pravá hodnota leží mezi 4,9988 V a 5,0012 V.

### Příklad výpočtu nejistoty měření číslicovým multimetrem:

Ovlivňující veličina (teplota) je v rozsahu hodnot definovaných výrobcem Měření proudu: použitý rozsah  $M = 200 \text{ mA}; \pm 0.1 \% \text{ z odečtené hodnoty} \pm 0.05 \% \text{ z rozsahu}.$   $I_{\rm X} = 60.0 \text{ mA} \quad \text{(údaj přístroje se při opakovaných měřeních neměnil} \rightarrow \text{pouze nejistoty typu B)}$  Určení standardní nejistoty typu B:

$$u_{\rm B} = \frac{\frac{\delta_1}{100} X + \frac{\delta_2}{100} M}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0.1}{100} 60.0 + \frac{0.05}{100} 200}{\sqrt{3}} = \frac{0.06 + 0.1}{\sqrt{3}} = 0.09 \text{ (mA)}$$

Výsledek včetně rozšířené nejistoty s koeficientem rozšíření  $k_r = 2$ :

$$I_x = 60.0 \text{ mA} \pm 0.18 \text{ mA}; k_r = 2$$
 popř.  $I_x = 60.0 \text{ mA} \pm 0.3 \%; k_r = 2$ 

Použitý rozsah  $M=200~{\rm mA};~\pm 0.1~\%$  z odečtené hodnoty  $\pm 2$  digity; 4-místný zobrazovač  $I_{\rm X}=60~{\rm mA}~$  (údaj přístroje se při opakovaných měřeních neměnil  $\rightarrow$  pouze nejistoty typu B) Určení standardní nejistoty typu B:

$$u_{\rm B} = \frac{\frac{\delta_1}{100} X + N R}{\sqrt{3}} = \frac{\frac{0.1}{100} 60.0 + 2 \frac{200}{2000}}{\sqrt{3}} = \frac{0.06 + 0.2}{\sqrt{3}} = 0.15 \,(\text{mA})$$

Výsledek včetně rozšířené nejistoty s koeficientem rozšíření  $k_r = 2$ :

$$I_x = 60.0 \text{ mA} \pm 0.30 \text{ mA}$$
;  $k_r = 2$  popř.  $I_x = 60.0 \text{ mA} \pm 0.5 \%$ ;  $k_r = 2$ 

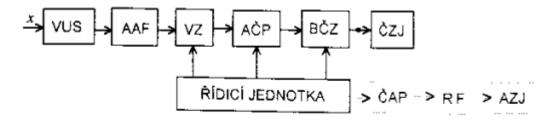
Pokud se při měření vyskytuje chyba metody, kterou neumíme korigovat, musíme ji zahrnout do výsledné nejistoty (přidá se jako další člen do geometrického průměru (uA, uB, uM) – viz laborka na měření napětí na termočlánku (tam se ale chyba metody nakonec zanedbala, byla malá).

# AD a DA převodníky

Dám sem 3 základní typy AD převodníků, co jsme probírali. V přednášce zmiňoval další 2, ale to mi už přijde zbytečné, kdyžtak se to dá dohledat v prezentaci:

https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/233048/mod\_resource/content/7/A1B38EMA-Predn\_12tisk.pdf Snad by se neptali tak do hloubky, v EMA se pokud si pamatuju ty další nezkoušeli.

AD = analog to digital a DA naopak, taky se česky používá AČP (analogově číslicový převodník) a ČAP. Jde vlastně o fyzickou realizaci vzorkování a kvatování (AD) a interpolace (DA), o kterých jsme se bavili v SASu a ZZS. Základní schéma je:



Obr. 4.1. Obecné blokové schéma měřicího přistroje využívajícího čislicové zpracování signálu

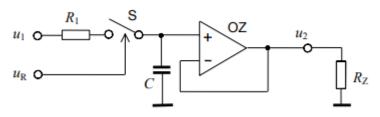
VUS = vstupní úprava signálu tzn. frekvenční úprava signálu, děliče, zesilovače std. AAF = antialiasingový filtr, tedy dolní propusť, která signál frekvenčně omezí, hraniční frekvence odpovídá nejvyšší frekvenci, která nás v signálu ještě zajímá. VZ = vzorkovač s pamětí, umožňuje odebírat hodnoty signálu (viz níž). AČP = AD převodník, který pro každý vzorek provede kvantizaci do digitálních hodnot. BČZ = blok číslicového zpracování, provádí se různé operace (FFT, filtrace, zesilování...), to už záleží na typu přístroje a je spíš látka ze ZZS/SAS. ČZJ = číslicová zobrazovací jednotka, prostě display :D. Pokud bychom zpracovaný signál chtěli převést zpět do analogové podoby, následoval by ČAP a RF = rekonstrukční filtr, opět dolní propusť, která vyhladí "schody" v průběhu z ČAP (viz interpolace v SAS).

Převodníky jsou široce využívané, na číslicovém principu už běží naprostá většina přístrojů v laboratořích – multimetry, osciloskopy, měřiče výkonu, různé senzory, máloco se dělá analogově.

#### Vzorkování

## Vzorkovač (analogová paměť)

(některé převodníky vyžadují změnu vstup. veličiny během převodu menší než ½ LSB)

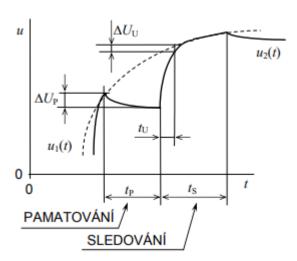


 $\tau_1 = R_1 C$  - co nejmenší

 $\tau_2 = R_{vst}C$  - co největší

(R<sub>vst</sub> zahrnuje svod C a vstupní odpor následujícího zesilovače)

V praxi - speciální IO



### Základní parametry vzorkovače:

 $t_{\rm U}$  – doba upnutí pro chybu upnutí  $\Delta U_{\rm U}$ 

 $\Delta U_{
m P}$  – změna napětí v režimu "pamatování" po dobu  $t_{
m P}$ 

Na vstupu je analogový signál (typicky napětí). Naším cílem je s určitou délkou časového kroku udržet ve vzorkovači tutéž hodnotu vstupního signálu, aby mohla být přečtena AD převodníkem a převedena do digitální podoby. Proto se také říká "vzorkovač s pamětí" – vzorkovač si po určitou dobu "pamatuje" načtenou hodnotu. Paměť je v obvodu realizována kondenzátorem.

Ve schématu máme na vstupu napětí  $u_1$  (to chceme vzorkovat) a  $u_R$  (referenční napětí, které s frekvencí  $f_s$  spíná a rozepíná spínač). Proces vzorkování se pak dá rozdělit na 2 kroky:

- u<sub>R</sub> sepne spínač a spojí se obvod. Vzorkovač je v režimu sledování (obvod je sledovač napětí s OZ) a výstupní napětí u<sub>2</sub> kopíruje u<sub>1</sub>, jsou stejné. Když se spínač sepne, chvíli trvá (dobu t<sub>U</sub>), než se vzorkovač přesně upne na u<sub>1</sub>, takže po dobu t<sub>U</sub> platí u<sub>1</sub>=u<sub>2</sub> jen přibližně. V režimu sledování je kondenzátor pořád nabitý na kapacitu C, která odpovídá aktuálnímu u<sub>1</sub>.
- $u_R$  rozepne spínač, odpojí obvod od  $u_1$ . Vzorkovač je v režimu pamatování. Kondenzátor je ale nabitý na kapacitu odpovídající  $u_1 \rightarrow$  na výstupu se po potřebnou dobu stále drží přibližně  $u_1=u_2$ . Pamatuje si tedy napětí ve chvíli rozepnutí obvodu. Rovnost je jen přibližná, protože ve chvíli rozepnutí spínače

se kondenzátor fakticky začne vybíjet, takže napětí, které "vnucuje" do obvodu oproti  $u_1$  s časem mírně klesá. Parametry kondenzátoru a rezistorů jsou ale nastaveny tak, aby napětí za dobu pamatování  $t_P$  nekleslo o víc než ½ kvantizačního kroku (nebo jinou danou hodnotu). Tím je zaručena uspokojivá přesnost.

Doba  $t_P$  je volena tak, aby vyhovovala AD převodníku a ten stihl za dobu  $t_P$  převést napětí  $u_1$  na digitální hodnotu. Samozřejmě čím nižší  $t_P$ , tím lepší, protože máme vyšší  $f_S$  a lépe vystihneme signál. AD převodníky ale mají své limitace a potřebují nějaký čas na přesný převod hodnoty. Vzorkovací perioda je součet doby sledování a doby pamatování  $T_S = t_P + t_S$ . I při dodržení všech pravidel nepracuje vzorkovač bez chyby – například při rychlých změnách  $u_1$  se nestačí správně upnout a tím vzniká chyba, navíc se uplatní chyba zesílení reálného OZ a další faktory.

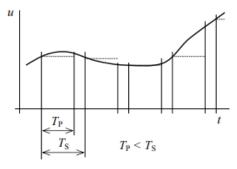
Aby bylo vzorkování provedeno vzhledem k dalšímu zpracování správně, musíme dodržet vzorkovací teorém. Vzorkovací frekvence  $f_s$  tedy musí být alespoň dvakrát vyšší než nejvyšší frekvence vstupního signálu. Naprostá většina reálných signálů není frekvenčně omezená, proto se před vzorkovač předřazuje DP, která odfiltruje nežádoucí vysoké frekvence a zabrání aliasingu.  $f_s$  se pak volí tak, aby odpovídala alespoň dvojnásobku mezní frekvence předřazené DP.

### AD převod

Za vzorkovačem následuje AD převodník, který si za dobu pamatování  $t_P$  vzorkovače načte hodnotu napětí  $u_1$ . Tu pak převede do digitální podoby. Principem převodu je kvantování – spojitým hodnotám napětí se přiřadí nějaká z diskrétních úrovní. Úrovně jsou typicky reprezentované číslem ve dvojkové soustavě, s tím souvisí, že počet kvantizačních úrovní jsou typicky mocniny 2, tzn. 8, 16, 32, 64. Naměřená úroveň se uloží do paměti a dál se zpracovává / zobrazuje na display. MSB (most significant bit) reprezentuje pozici nejvyššího řádu, který lze převodníkem zaznamenat. LSB (least significant bit) reprezentuje pozici nejnižšího řádu, který lze převodníkem zaznamenat. Z toho plyne, že chyba kvantování je nejvýše ½ LSB.

#### Princip kvantování a vzorkování





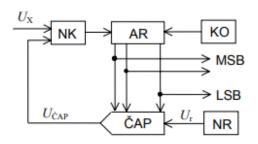
T<sub>P</sub> – doba převodu (některé převodníky vyžadují změnu vstup. veličiny během převodu menší než ½ LSB)

 $T_{\rm S}$  – perioda vzorkování;  $f_{\rm S}$  = 1/ $T_{\rm S}$ 

AD převodníky mohou pracovat na různém principu:

Kompenzační: na digitální hodnotu převádí u₁, které je na vstupu ve chvíli rozepnutí vzorkovače →
 v čase pamatování nesmí hodnota ve vzorkovači klesnout o více než ½ kvantizačního kroku.

# Kompenzační AČP



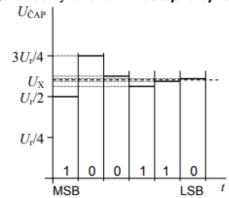
Po dobu převodu se vstupní napětí nesmí vstupní napětí měnit o více než je rozlišení převodníku (tj. napětí, odpovídající ½ LSB)

Typický počet bitů n: 12 - 14 (rozlišení 
$$U_r/2^n$$
)

Typická doba převodu: desítky μs

<u>Použití:</u> AČ moduly řídicích počítačů, digitalizace signálu ze senzorů

### Algoritmus vyvažování: Postupná aproximace



$$U_{X} = \frac{U_{r}}{2^{n}} \sum_{i=0}^{n-1} 2^{i} z_{i}; \quad z_{i} = 0, 1$$

$$U_{\rm X} = U_{\rm r} \left( \frac{1}{2} + \frac{0}{4} + \frac{0}{8} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32} + \frac{0}{64} \right) = \frac{38}{64} U_{\rm r}$$

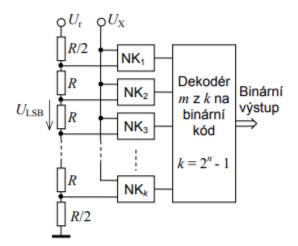
Na schématu je NK = napěťový komparátor, AR = aproximační registr, KO = krystalový oscilátor, NR = napěťová reference, ČAP = převodník. Dá se říct, že funguje podobně jako metoda půlení intervalů. Kroky vypadají takto:

- Na začátku se UčAP nastaví na hodnotu MSB, která odpovída Ur/2. Napětí na vstupu Ux se v napěťovém komparátoru NK porovná s UčAP. Pokud je Ux> UčAP, zapíše se do paměti AR 1, pokud menší, zapíše se 0.
- Podle předchozího výsledku se UčAP nastaví buď na 1\*Ur/2 + Ur/4, nebo na 0\*Ur/2+Ur/4.
   Opět se porovná UčAP a Ux a opět se zapíše buď 1, nebo 0.
- Tento proces se opakuje n-krát podle počtu úrovní AD převodníku. Výsledná hodnota je pak součtem podle vzorečku na slidu.

Celé je to nastaveno tak, aby se všech N porovnání stihlo za dobu paměti t<sub>P</sub> vzorkovače. Proto je tam KO, který vlastně "tiká", taktuje tím jednotlivé kroky převodu. Tento typ AD převodníku je takový střed co se týče rychlosti (základní integrační jsou pomalejší, paralelní FLASH komparační je rychlejší). Používal se v rychlejších voltmetrech (oproti integračním) a pomalejších osciloskopech (oproti FLASH)

Komparační (jinak paralelní, FLASH) – jsou velmi rychlé,(MHz, GHz) celý převod proběhne v jednom taktu KO. Tak trochu jde o předchozí případ, ale sestavený paralelně – vstupní napětí je současně porovnáno s 2^n -1 úrovněmi referenčního napětí.

# Komparační AČP – paralelní komparace (FLASH)



Typický počet bitů n: 8 (255 komparátorů)

Doba převodu: 0,4 až 50 ns

(vyšší vzorkovací rychlosti se dosahuje cyklickým vzorkováním více převodníky)

Použití: Osciloskopy s číslicovou pamětí

# Komparační AČP – sério-paralelní komparace

Typický počet bitů n: 10 až 14

Doba převodu: 10 ns až 1 μs

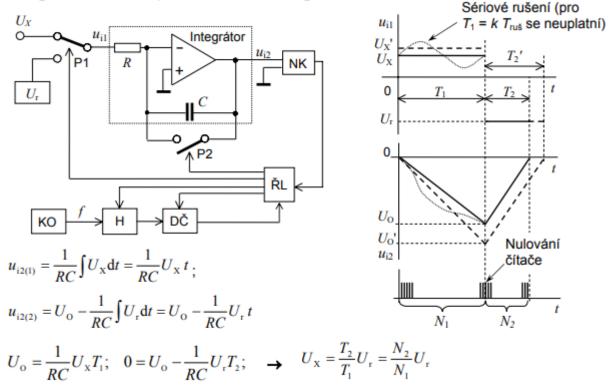
Součástí zapojení je 2<sup>n</sup> – 1 napěťových komparátorů NK, odpovídající počet rezistorů R, které zařizují dělení vstupního napětí v poměrech mocniny 2, dekodér, který pořadí příslušného komparátoru k převede na logickou hodnotu v binárním výstupu. Úbytky napětí na 2 krajních rezistorech odpovídají LSB/2.

Na NK1 se tedy porovnává vstupní Ux vůči Ur – LSB/2, na NK2 se porovnává Ux vůči Ur – 3\*LSB/2 atd. až na NKk se porovná Ux vůči LSB/2. Každý NK pošle do dekodéru výsledek porovnání. Dekodér pak hledá nejnižší index NK, který měl na výstupu hodnotu 1 (vyšší indexy NK už budou taky mít 1). Podel toho dá dekodér na výstup příslušné bitové slovo.

Požívají se např. v rychlých osciloskopech a obecně kdekoli je nutné aby byl převod rychlý, je to ale za cenu nižší přesnosti a vyšší spotřeby (může tam být třeba 255 komparátorů). Další výhoda je, že díky rychlosti nepotřebují vzorkovač s pamětí, převod udělají tak rychle, že to není třeba.

Integrační s dvoutaktní integrací – rozdíl oproti předchozím je, že výsledná hodnota je průměr z hodnot Ux, které jsou na vstupu během převodu (ne počáteční hodnota uložená v paměti).
 Integrační AD převodníky jsou mnohem přesnější, obecně ale pomalejší. Využívají se proto tam, kde rychlost není tak důležitá (číslicové multimetry, voltmetry).

# Integrační AČP a) s dvoutaktní integrací



<u>Typická doba převodu:</u> desítky ms; <u>Použití:</u> Číslicové multimetry (modifikace dle rozlišení)

Ve schématu je Ux převáděné napětí, Ur známé referenční napětí, NK napěťový komparátor, ŘL řídící logika, KO krystalový oscilátor, H hradlo, DČ dekadický čítač, P1,2 spínače. Převod má 2 základní fáze

- V první fázi je P1 přepnutý na Ux. Integrátor nasčítává napětí Ux nabíjením kondenzátoru C. Délka integrace Ux je pro každý převod stejná, je pevně daná. Integrujeme tedy neznámé napětí po známou dobu. Doba integrace je řízena krystalovým oscilátorem a čítačem – pulzy oscilátoru jsou načítány do čítače, v ŘL je pevně daný počet pulzů (N1), který odpovídá požadované době integrace. Když uplyne tato doba, ŘL přepne spínač P1 směrem k Ur a přejde tak do druhé fáze převodu
- Ur má automaticky opačnou polaritu než Ux. V druhé fázi se integruje napětí Ur, z kondenzátoru se tím pádem "odintegruje" a kondenzátor se vybíjí (kvůli opačné polaritě). Jakmile se kondenzátor vybije, bude na výstupu OZ nula. NK na výstupu porovnává vůči nule, takže do ŘL nahlásí, že na výstupu OZ už je nula. V té chvíli ŘL zastaví integraci Ur (vypne P2). Po celou dobu integrace Ur se opět načítají pulzy KO do čítače. Tentokrát tedy integrujeme známé napětí po neznámou dobu odpovídající počtu pulzů N2. Tato doba se ale dá zjistit podle počtu načtených pulzů, než se sepnul NK. Na konci druhé fáze vynulujeme čítač.

Víme tedy (viz odvození na slidu) že poměr Ux/Ur odpovídá poměru N2/N1 a tři ze čtyř hodnot ve vzorci známe. Výsledný údaj převodu na digitální hodnotu se určí podle:

Počet pulsů načítaných během  $T_2$  (a rovný až na desetinnou tečku údají voltmetru) je úměrný  $U_{\rm N}$ :

$$N = f_0 T_2 = \left| \frac{f_0 T_1}{U_r} U_X \right| = \left| \frac{N_C}{U_r} U_X \right| \tag{4.5}$$

Zde je  $N_{\rm C}$  kapacita čítače, tj. maximální počet pulsů, který může čítač načítat (např. 9999 pro čtyřmístný čítač). Jak vyplývá ze vztahů (4.4) a (4.5), měřené napětí je rovno průměrné hodnotě  $U_{\rm X}$  během intervalu  $T_{\rm I}$  a nezávisí na časové konstantě integrátoru RC ani na hodinové frekvenci  $f_0$ ; nejdůležítější je přesnost referenčního napětí  $U_{\rm R}$ .

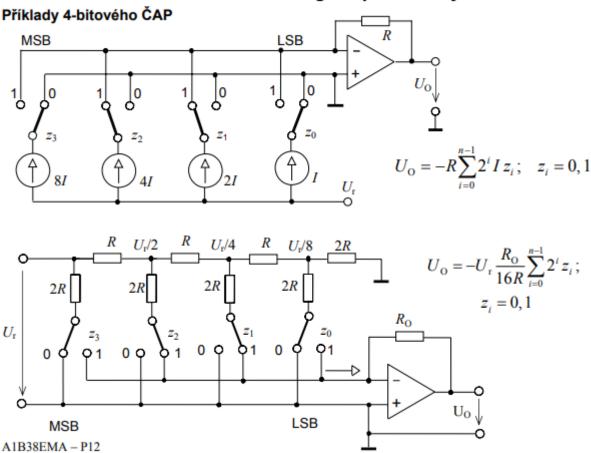
Další výhoda je, že pokud za dobu T1 zvolíme 20ms, odpovídá to periodě sinusovky ze sítě 50 Hz. Tím, že integrujeme 20ms a průměrujeme, odstraníme zároveň síťové rušení (střední hodnota přes 1 periodu je nulová).

 Další druhy integračních převodníků: s mezipřevodem napětí -> frekvence, se sigma-delta modulátorem (můžete kouknout do slidů)

### DA převod

Už máme digitální hodnoty a chceme je převést zpět na analogový průběh s co nejmenší chybou. Bezhybný převod by byl možný, pokud bychom mohli použít ideální dolní propusť s mezní frekvencí rovnou  $f_s/2$ . Ta ale reálně neexistuje, takže jde vždy jen o aproximaci. Dva základní principy DA převodníku jsou na obrázku:

# Číslicově – analogové převodníky



2

S přepínanými proudovými zdroji (1. schéma): (neumím to líp vysvětlit, kdyžtak doplňte, proudový zdroj se dá realizovat více způsoby)

Výstupní napětí  $U_o$  tohoto typu ČAP nezávisí na úbyteích napětí na sepnutých spínačích, protože výstupní veličinou ČAP je proud  $I_o$ , získaný sečtením proudů několika proudových zdrojů (obr. 4.15). Proudové zdroje vyrábějící binárně odstupňované proudy lze realizovat např. pomocí bipolárních tranzistorů s odstupňovanými plochami p-n přechodů diod B-E jednotlivých tranzistorů.

Proudy lze snadno sečíst na výstupním rezistoru R, takže rychlost převodu není omezována rychlostí odezvy operačního zesilovače. Použitím bipolární technologie je možné dosáhnout doby převodu okolo 100 ns (osmibitový ČAP).

• S přepínanou rezistorovou sítí (2. schéma): Je tam připojené Ur a podle konkrétní hodnoty zakódované v binárním slově jsou nastaveny přepínače 0/1 u jednotlivých větví. Rezistory v žebříčku dělí napětí v poměrech Ur/2, Ur/4 atd. Tím se binárně váhuje proud, který teče z jednotlivých větví do OZ, celkový proud je součet proudů z větví. Celkovému proudu je úměrné výstupní napětí.

Obecně tím, že po dobu Ts je vždy nastavená stejná poloha přepínačů, vzniká na výstupu schodovitý průběh s rychlými změnami mezi jednotlivými Ts. Tyto rychlé změny se pak odfiltrují vhodnou DP (mezní frekvence podle Fs). Na výstupu DP tedy zůstanou jen ty frekvenční složky, které byly i v původním signálu a ne vyšší.

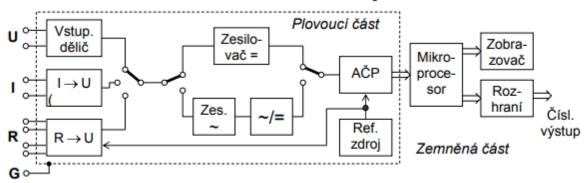
## Multimetry

Tady nevím, jestli to co jsem napsala stačí. V přednášce je za tím ještě další slide o stínění, který nechápu, tak pokud tomu někdo rozumíte a je to důležité, prosím doplňte. V přednášce nijak podrobně nerozebíral, co za obvody v multimetru je, tak předpokládám, že např. stačí vědět, že je tam "nějaký zesilovač" a znát princip OZ a nemusíme to podrobně řešit. Slidy tady

https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/233047/mod resource/content/6/A1B38EMA-Predn 11tisk.pdf

Multimetry zahrnují měření více veličin (napětí, proud odpor) do jednoho přístroje. Umí měřit jak stejnosměrné, tak střídavé veličiny. Většinou je možné zvolit si z několika měřících rozsahů. Běžně je možné napojit multimetr na další přístoje/počítač, což usnadňuje vyhodnocování údajů. Na slidu je základní schéma číslicového multimetru.

# Číslicové multimetry



#### Kvalitnější multimetry vesměs:

- a) mají vnitřní plovoucí stínění (viz dále);
- b) umožňují 4-svorkové připojení při měření odporu;
- c) vestavěný procesor umožňuje autokalibraci popř. i softwarovou kalibraci;
- d) umožňují připojení k počítači přes standardní rozhraní (RS-232 / IEEE 488 / USB).

AUTOKALIBRACE: a) automatické nulování

 b) určení skutečného přenosu měřicího kanálu s využitím vnitřních referenčních prvků (dělič 1:10, UREF, RN) a následná automatická korekce odchylky

SOFTWAROVÁ KALIBRACE: a) připojení externího etalonu (ref. zdroj napětí, etalon odporu),

b) zadání skutečné hodnoty tohoto etalonu klávesnicí

c) zápis kalibračních hodnot do zálohované paměti)

A1B38EMA – P11

Na vstup připojíme svorky podle veličiny, kterou chceme měřit. Důležité je, že <u>ve skutečnosti se uvnitř</u> multimetru vždy vyhodnocuje napětí

- U tzn. měříme napětí je tam dělič, který vstupní napětí rozdělí tak, aby do vyhodnocovacích obvodů šla jen nějaká část napětí
- I tzn. měříme proud je tam převodník proud napětí (v EMA jsme probírali převodník proud napětí s OZ, tak něco na tom principu tam je), podle přednášek se používá Ayrtonův bočník (nevím jestli to je důležité)
- R tzn. měříme odpor je tam převodník odpor napětí (zase jsme dělali zapojení s OZ, bude tam něco v tom principu). Podle přednášky se používá čtyřsvorkové zapojení (vhodné pro malé odpory eliminuje termoelektrické napětí)

Pak je tam zesilovač (zase princip odpovídá tomu s OZ), který si napětí zesílí tak, aby bylo vhodné pro další zpracování. Pokud na vstupu měříme stejnosměrnou veličinu, je tam stejnosměrný zesilovač, pokud střídavou, je tam střídavý zesilovač + AC->DC převodník (záleží jaký, vic laborka na měření střídavých napětí). Pak je tam AČP (viz předchozí sekce), který analogové napětí ze zesilovače navzorkuje a výsledný digitální signál pošle do mikroprocesoru. V mikroprocesoru se digitální signál vyhodnotí a na display se pošle výsledek s naměřeným údajem. To čárkované okolo je stínění, na které je připojená G svorka – reprezentuje zem.

# Osciloskopy

Píšu jsem základy a to, co vím. Kdyžtak doplňte, moc tomu nerozumím ani s výpisky z přednášek. Slidy tady: <a href="https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/233049/mod">https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/233049/mod</a> resource/content/8/A1B38EMA-Predn 13tisk 0.pdf

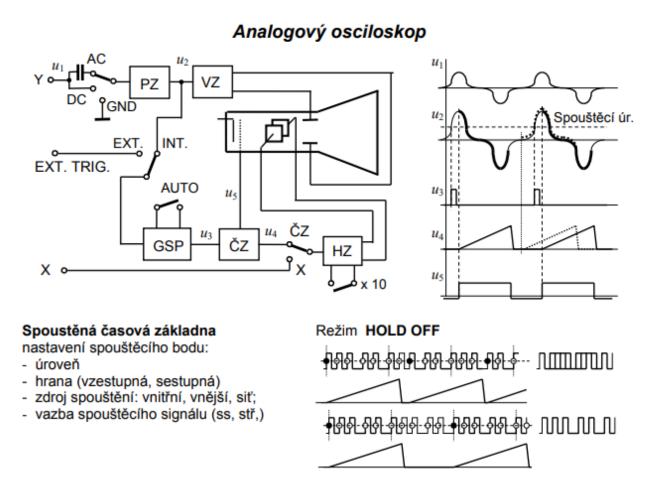
. Podrobnosti tady <a href="https://drive.google.com/file/d/1U5rv3S4ixIYNgcrR9kIX0tcdnUZA2Ler/view?usp=sharing">https://drive.google.com/file/d/1U5rv3S4ixIYNgcrR9kIX0tcdnUZA2Ler/view?usp=sharing</a> strana 52 a dál. Zvlášť budu ráda za doplnění ke generátoru spouštěcích pulzů, , co dělá režím AUTO, hold

off režim, ty různé trigger módy u číslicového osciloskopu a další věci, které byly zmíněné v přednášce nebo by mohly být důležité.

Hlavní funkcí je zobrazení průběhu napětí na svorkách. Na display vidíme průběh a dalšími funkcemi si můžeme nastavit zobrazení a zjistit různé parametry průběhu (to už záleží na typu osciloskopu). Někdy také lze zobrazit jedno napětí jako funkci druhého napětí. Starší osciloskopy byly analogové, později se začaly používat číslicové osciloskopy, které průběh nejdříve navzorkují a potom s ním pracují v digitální podobě. Některé osciloskopy dokáží snímat až GHz průběhy.

### Analogový osciloskop

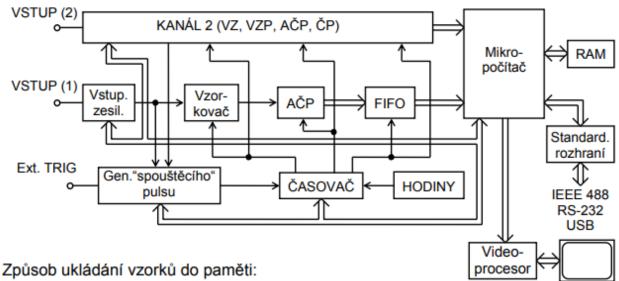
Upraví vstupní signál analogovými obvody a zobrazí ho na obrazovku (na obrázku schéma jednokanálového). Starší princip, méně funkcí, bezprostředně reaguje na změnu veličiny. Nevýhodou je, že špatně zobrazuje nízké kmitočty (vstupní kondenzátor je úplně nepropustí), nemá paměť, takže se nedá průběh uložit a dále zpracovávat



# Číslicový osciloskop

Signál se zesílí zesilovačem na potřebnou úroveň, vzorkuje se (různé druhy vzorkování viz slide níž) pak se AD převodníkem digitalizuje, vzorky se ukládají do paměti. Paměť je FIFO (first in first out). Výsledek se zobrazuje na display (typicky LCD jako u počítače). Má spoustu funkcí – výpočet střední a efektivní hodnoty, peak to peak, fázový rozdíl mezi kanály, integrace, zobrazení hysterezní smyčky, umožňuje i výpočet frekvenčních charakteristik (akorát se musí dávat pozor na aliasing).

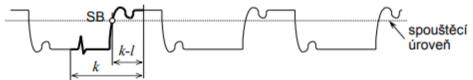
## Osciloskop s číslicovou pamětí (číslicový osciloskop)



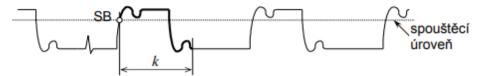
- Paměti v jednotlivých kanálech typu FIFO (first in first out) po zapnutí trvale plněny vzorky signálu;
- Po generování "spouštěcího" pulsu zastavení plnění paměti
  - a) okamžitě (záporného zpoždění pre-trigger)
  - b) po zpoždění, které odpovídá době naplnění paměti FIFO ("normální")
  - c) po zpoždění delším než odpovídá době naplnění paměti FIFO (zpožděný delay)
    - d) Režim "pre-trigger" (záporné zpoždění) a režim "delay" (zpoždění)

SB – "spouštěcí" (u číslicových osciloskopů přesněji "zastavovací") bod FIFO paměť: šířka *n* bitů (obvykle 8), délka *k* vzorků

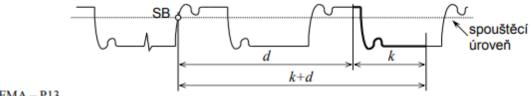
a) "pre-trigger" (záporné zpoždění): zobrazeno l vzorků před SB a k - l vzorků po SB (zápis do paměti se zastaví po zapsání k - l vzorků po generování "spouštěcího" pulsu)



 b) "normální" režim: zobrazeny vzorky následující po SB – odpovídá zobrazení analog. osc. (zápis do paměti se zastaví po zapsání k vzorků po generování "spouštěcího" pulsu)



c) "delay" (zpoždění): zobrazeny vzorky následující d vzorků po SB (zápis do paměti se zastaví po zapsání k+d vzorků po generování "spouštěcího" pulsu)



A1B38EMA - P13

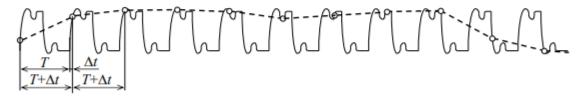
### <u>Druhy vzorkování signálu u číslicového osciloskopu</u>

#### 1. V REÁLNÉM ČASE

- 4 až 10 vzorků na periodu nejvyšší frekvenční složky
- umožňuje pre-trigger mode
- umožňuje záznam přechodných dějů

### 2. SEKVENČNÍ V EKVIVALENTNÍM ČASE (STROBOSKOPICKÉ)

- jen pro periodické průběhy
- v každé periodě jen jeden vzorek posunutý o Δt
- ekvivalentní vzorkovací frekvence f<sub>VZ.EKV.</sub>=1/(Δt)



### 3. NÁHODNÉ V EKVIVALENTNÍM ČASE

- jen pro periodické průběhy
- po spuštění se vzorkuje s maximální vzorkovací frekvencí (několik vzorků na periodu nejvyšší frekvenční složky signálu)
- každá sada vzorků zpožděna o náhodnou ale známou dobu
- rychlejší rekonstrukce než dle bodu 2)