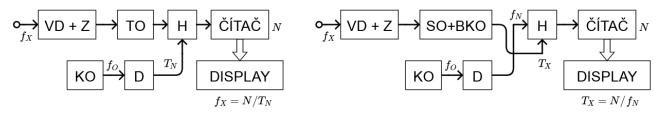
5.1. Úvod

Frekvence patří kromě napětí, popř. proudu, k nejčastěji měřeným veličinám. Nejedná se jen o měření při oživování či opravách elektronických obvodů, ale frekvence je často měronosnou veličinou na výstupu senzorů řady fyzikálních veličin. Nejběžnějšími přístroji používanými pro měření frekvence jsou čítače. Přesnost přímého měření frekvence je ale v oblasti nižších kmitočtů omezena rozlišovací schopností čítače $\Delta f_X = 1/T_N$, kde T_N je doba měření, tj. doba otevření hradla čítače. Proto se v případě měření v této oblasti používá nepřímé měření – měření periody T_X – a měřená frekvence je pak $f_X = 1/T_X$. Tato metoda naopak není vhodná pro měření v oblasti vyšších frekvencí, kde rozlišení závisí na frekvenci čítaných hodinových impulsů.

V případě čítačů, které jsou v současné době na trhu, jsou výše uvedené módy většinou přepínány dle použitého rozsahu, popř. automaticky, a zvolená veličina (frekvence nebo perioda) se v případě nepřímého měření vypočte. Proto v této laboratorní úloze není použit komerční přístroj, ale čítač vyvinutý pro tuto úlohu, který umožňuje zvolit nejen příslušný režim měření (frekvenci nebo periodu), ale i nastavení doby měření, tj. doby otevření hradla čítače při měření frekvence, popř. průměrování při měření periody.

5.2. Domácí příprava

5.2.1. Nakreslete blokové schéma čítače v obou režimech činnosti.



VD+Z: vstupní dělič (+předzesilovač); TO: tvarovací obvod (tvaruje signál na pulzy definované úrovně); H: hradlo (otevřeno po dobu T_N nebo T_X); KO: krystalem řízený oscilátor (frekvence $f_O = 10^k$; $k \in \mathbb{Z}$); D: číslicová dělička; SO+BKO: spouštěcí obvod (+ bistabilní klopný obvod: převede signál na jeho délku)

- **5.2.2.** Jak souvisí při přímém měření frekvence doba otevření hradla s rozlišením? Čím delší bude doba otevření hradla, tím větší rozlišení získáme, protože velikost dělení je nepřímo úměrná času $\Delta'_{f_X} = 1/T_N$.
- **5.2.3.** Jak vypočtete standardní nejistotu typu B při přímém měření frekvence?

$$u_{f_X} = \sqrt{(\frac{\Delta'_{f_X}}{\sqrt{3}})^2 + (\frac{\Delta_{f_X}}{\sqrt{3}})^2}; \quad \Delta_{f_X} = \frac{\delta f_O}{100} N \Delta'_{f_X} = \frac{\delta f_O}{100} f_X; \quad \Delta'_{f_X} = \frac{1}{T_N}$$

5.2.4. Jak souvisí při měření periody frekvence f_N impulsů, které jsou čítány po dobu T_X , s rozlišením?

Čím větší bude frekvence KO, tím větší rozlišení získáme, protože velikost dělení je nepřímo úměrná frekvenci $\Delta'_{T_X}=1/f_N$.

5.2.5. Co je to režim průměrování a kdy je vhodné jej použít?

Průměrování při měření T je změření doby n period $(n = 10^k)$.

Doba 1 periody se určí posunutím desetinné čárky vlevo o k pozic.

Složka Δ'_{T_X} (dána rozlišovací schopností) se n-krát sníží, neboť rozlišitelnost odpovídá hodnotě $1/nf_N$. (Po posunutí desetinné čárky odpovídá váha posledního místa na displeji n-krát menší hodnotě než při měřeni doby 1 periody.) Složka Δ_{T_X} (určena relativní nestabilitou frekvence krystalového oscilátoru f_O) průměrováním není ovlivněna, neboť

$$\Delta_{T_X} = \frac{\delta f_O}{100} \frac{n}{n} T_X = \frac{\delta f_O}{100} T_X$$

Složka u_k (směrodatná odchylka jejímž zdrojem je kolísání komparační úrovně způsobené šumem) je konstantní. Posunutím desetinné čárky o k pozic se však její hodnota n-krát sníží.

5.2.6. Jak vypočtete standardní nejistotu typu B při měření periody popř. měření periody s průměrováním?

$$u_{T_X} = \sqrt{\left(\frac{\Delta'_{T_X}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{T_X}}{\sqrt{3}}\right)^2 + 2u_k^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta'_{T_X}}{n\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{T_X}}{\sqrt{3}}\right)^2 + 2\left(\frac{u_k}{n}\right)^2}$$

5.3. Úkol měření

5.3.1. Zkontrolujte správnost stupnice nízkofrekvenčního generátoru

- a) čítačem v režimu měření frekvence při různých dobách otevření hradla $(T_N=0,1~{\rm s},~1~{\rm s},~10~{\rm s})$
- b) čítačem v režimu měření doby periody jednak přímo (n = 1), jednak s využitím průměrování (n = 100).

Měřte při kmitočtech 60 Hz, 500 Hz, 5 kHz, 50 kHz, 200 kHz. Pro výše uvedené režimy měření určete pro kmitočty 60 Hz a 200 kHz jak absolutní nejistotu měření, tak relativní nejistotu.

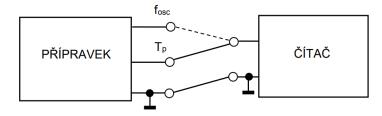
5.3.2. Ověřte přesnost krystalem řízených hodin:

- a) měřením doby periody pulsů pro krokový motor (správná hodnota je 2 s),
- b) přímým měřením frekvence oscilátoru (správná hodnota je 215, tj. 32 768 Hz, resp. 222, tj. 4 194 304 Hz).

V obou případech určete nepřesnost hodin v sekundách za den.

5.4. Schéma zapojení

Při kontrole stupnice nízkofrekvenčního generátoru je výstup generátoru připojen ke vstupu čítače koaxiálním kabelem.



Obr. 5.1. Zapojení pro měření na přípravku s krystalem řízenými hodinami

5.3.1.a

T. 5.1. Výsledky měření frekvence f_G [kHz]

f_0	60 Hz	500 Hz	5 kHz	$50~\mathrm{kHz}$	200 kHz
$T_N = 0.1 \text{ s}$	0.07	0.65	6.85	70.04	513.68
$T_N=1 \text{ s}$	0.077	0.669	6.818	70.027	509.492
$T_N = 10 \text{ s}$	0.0771	0.6698	6.7889	69.8835	511.4997

nejistotu měření určíme za použití vzorce:

$$u_{f_X} = \sqrt{(\frac{\Delta'_{f_X}}{\sqrt{3}})^2 + (\frac{\Delta_{f_X}}{\sqrt{3}})^2}; \quad \Delta_{f_X} = \frac{\delta f_O}{100} N \Delta'_{f_X} = \frac{\delta f_O}{100} f_X; \quad \Delta'_{f_X} = \frac{1}{T_N}$$

za δf_O budeme považovat nejistotu nízkofrekvenčního generátoru

$$u_{f(60~\text{Hz},~0.1~\text{s})} = \sqrt{(\frac{1}{0.1\sqrt{3}})^2 + (\frac{5 \cdot 0.07 \cdot 10^3}{100\sqrt{3}})^2} = 6.117~\text{Hz} \sim 8.7\%$$

$$u_{f(60~\text{Hz},~1~\text{s})} = \sqrt{(\frac{1}{\sqrt{3}})^2 + (\frac{5 \cdot 0.077 \cdot 10^3}{100\sqrt{3}})^2} = 2.297~\text{Hz} \sim 3.0\%$$

$$u_{f(60~\text{Hz},~10~\text{s})} = \sqrt{(\frac{1}{10\sqrt{3}})^2 + (\frac{5 \cdot 0.0771 \cdot 10^3}{100\sqrt{3}})^2} = 2.226~\text{Hz} \sim 2.9\%$$

$$u_{f(200~\text{kHz},~0.1~\text{s})} = \sqrt{(\frac{1}{0.1\sqrt{3}})^2 + (\frac{8 \cdot 513.68 \cdot 10^3}{100\sqrt{3}})^2} = 23.726~\text{kHz} \sim 4.6\%$$

$$u_{f(200~\text{kHz},~1~\text{s})} = \sqrt{(\frac{1}{\sqrt{3}})^2 + (\frac{8 \cdot 509.492 \cdot 10^3}{100\sqrt{3}})^2} = 23.532~\text{kHz} \sim 4.6\%$$

$$u_{f(200~\text{kHz},~10~\text{s})} = \sqrt{(\frac{1}{10\sqrt{3}})^2 + (\frac{8 \cdot 511.4997 \cdot 10^3}{100\sqrt{3}})^2} = 23.6252~\text{kHz} \sim 4.6\%$$

T. 5.2. Výsledky a nejistoty měření frekvence f_G

f_0	60 Hz			200 kHz		
	f_G [kHz]	u_{abs} [kHz]	u_{rel}	f_G [kHz]	u_{abs} [kHz]	u_{rel}
$T_N = 0.1 \text{ s}$	0.07	0.01	8.7%	513.68	23.73	4.6%
$T_N=1 \text{ s}$	0.077	0.002	3.0%	509.492	23.532	4.6%
$T_N = 10 \text{ s}$	0.0771	0.0022	2.9%	511.4997	23.6252	4.6%

užitý generátor má výstupní signál s vyšší frekvencí než odpovídá nastavení, odchylka stoupá s rozsahem a zároveň mnohonásobně přesahuje nejistotu měření, příčina této systematické chyby bude pravděpodobně offset nastavovacího aparátu;

pro měření malých frekvencí se do nejistoty podstatně pronmítne vliv velikosti dělení $\Delta'_{f_X} = \frac{1}{T_N}$; u vysokých kmitočtu nejistotu nejvíce ovlivní kolísání frekvence Δ_{f_X} ; přímé měření kmitočtu je vhodné pro vysokofrekvenční signály

5.3.1.b

T. 5.3. Výsledky měření doby periody T_G [μ s]

f_0	60 Hz	500 Hz	5 kHz	50 kHz	200 kHz
$1/f_0 \ [\mu s]$	16 666.67	2 000	200	20	5
n=1	12 978.3	1 497.6	147.2	14.7	2.0
n=100	12 935.603	$1\ 528.388$	149.947	14.642	1.947

nejistotu měření určíme za použití vzorce:

$$u_{T_X} = \sqrt{(\frac{\Delta'_{T_X}}{n\sqrt{3}})^2 + (\frac{\Delta_{T_X}}{\sqrt{3}})^2 + 2(\frac{u_k}{n})^2} \Rightarrow \sqrt{(\frac{\Delta'_{T_X}}{n\sqrt{3}})^2 + (\frac{\Delta_{T_X}}{\sqrt{3}})^2}; \quad \Delta_{T_X} = \frac{\delta f_O}{100} T_X; \quad \Delta'_{T_X} = \frac{1}{f_N}$$

člen u_k opomineme, protože jeho vliv se ve strovnání s velkým δf_O projeví jen minimálně

$$u_{T(60~\text{Hz},~n=1)} = \sqrt{\left(\frac{1}{1 \cdot 10^8 \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{5 \cdot 12978.3 \cdot 10^{-6}}{100 \sqrt{3}}\right)^2} = 374.651~\mu\text{s} \sim 2.9\%$$

$$u_{T(60~\text{Hz},~n=100)} = \sqrt{\left(\frac{1}{100 \cdot 10^8 \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{5 \cdot 12935.603 \cdot 10^{-6}}{100 \sqrt{3}}\right)^2} = 373.419~\mu\text{s} \sim 2.9\%$$

$$u_{T(200~\text{kHz},~n=1)} = \sqrt{\left(\frac{1}{1 \cdot 10^8 \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{8 \cdot 2.0 \cdot 10^{-6}}{100 \sqrt{3}}\right)^2} = 0.093~\mu\text{s} \sim 4.6\%$$

$$u_{T(200~\text{kHz},~n=100)} = \sqrt{\left(\frac{1}{100 \cdot 10^8 \sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{8 \cdot 1.947 \cdot 10^{-6}}{100 \sqrt{3}}\right)^2} = 0.090~\mu\text{s} \sim 4.6\%$$

T. 5.4. Výsledky a nejistoty měření doby periody T_G

f_0	60 Hz			200 kHz		
$1/f_0$	$16~666.67~\mu s$			$5~\mu\mathrm{s}$		
	$T_G [\mu s]$	$u_{abs} [\mu s]$	u_{rel}	$T_G [\mu s]$	$u_{abs} [\mu s]$	u_{rel}
n=1	12 978.3	374.7	2.9%	2.0	0.1	4.6%
n=100	12 935.603	373.419	2.9%	1.947	0.090	4.6%

užitý generátor má výstupní signál s menší periodou, což je spjaté s poznámkou u 5.3.1.a; zvyšování n přidává na rozlišení, ale vhledem k vysokému kolísání frekvence Δ_{f_X} se do celkové nejistoty nijak výrazně nepromítne

při měření vysokých frekvencí je pro čítání pulsů poskytnut krátký čas T_X , který omezuje rozlišení, naopak pro nízké kmitočty je poskytnut čas delší, a tak je přímé měření doby periody vhodné pro nízkofrekvenční signály

5.3.2.a

u krystalického oscilátoru v přepojení $f_1=0.5$ Hz jsme pro malý kmitočet měřili délku periody, jejíž očekávaná hodnota je $T_1=\frac{1}{f_1}=2$ s, čemuž vyhovuje naměřená hodnota T=2.0736960 s

$$\Delta = \frac{T - T_1}{T_1} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = \frac{2.0736960 - 2}{2} \cdot 86400 = 3183.6672 \frac{s}{den}$$

5.3.2.b

v přepojení $f_2=33$ kHz jsme u krystalického oscilátoru pro vysoký kmitočet měřili frekvenci, naměřená hodnota f=32.768 kHz vyhovuje velikosti f_2

$$\Delta = \left[\frac{T - T_2}{T_2} = \frac{\frac{1}{f} - \frac{1}{f_2}}{\frac{1}{f_2}} = \frac{f_2}{f} - 1\right] \cdot 86400 = \left(\frac{33}{32.768} - 1\right) \cdot 86400 = 611,71875 \frac{s}{den}$$

5.5. Seznam použitých přístrojů a obvodvých prvků

přístroj/prvek	specifikace
nf generátor	GOLDSTAR FG-8002: $Ac(1 \text{ Hz-}100 \text{ kHz}) = \pm 5\%$; $Ac(1 \text{ MHz}) = \pm 8\%$
čítač	Vývojové laboratoře ČVUT Poděbrady: 100 MHz; K 3-4
krystalický oscilátor	$f_1 = 0.5 \text{ Hz}; f_2 = 33 \text{ kHz}$

5.6. Závěrečné vyhodnocení

pokud měříme signál s malým kmitočtem, je vhodné použít režimu měření doby periody (případně s průměrováním pro přesnost na více desetinných míst), měříme-li však vysoko-frekvenční signál dosáhneme přesnějšího výsledku přímým měřením kmitočtu, přesnost můžeme korigovat periodou otevírání hradla T_N