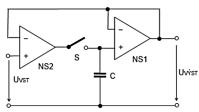
7.1. Úvod

Při vzorkování periodického signálu musí pro vzorkovací kmitočet f_{vz} platit vzorkovací teorém

 $f_{vz}>2f_m$ kde f_m je maximální kmitočet obsažený ve spektru vzorkovaného signálu. Pro rychlé vzorkování, např. v osciloskopech, se používají přímo vázané vzorkovací obvody, kde je spínač realizován můstkem se Schottkyho diodami.



Obr. 7.1 Zpětnovazební vzorkovací obvod

Základem vzorkovacího obvodu (obr. 7.1) je spínač S s kondenzátorem C. Pokud je spínač Ssepnut (režim "sample" – sledování), napětí na kondenzátoru sleduje vstupní napětí. S zůstane na kondenzátoru napětí odpovídající okamžiku rozepnutí spínače (režim "hold" – pamatování).

Při rozepnutí spínače Požadavkem je, aby se toto napětí po dobu jeho dalšího zpracování pokud možno neměnilo. Ve vzorkovacích obvodech pro přesnější aplikace a pomalejší děje lze použít např. zapojení na obr. 7.1, kde je napětí na kondenzátoru snímáno napěťovým sledovačem NS1 s co největším vstupním odporem a sledovačem NS2 s minimálním výstupním odporem je oddělen vstupní obvod, aby nabíjecí konstanta byla co nejmenší.

Spínač je většinou realizován FET tranzistorem. Při přechodu mezi stavy sledování a pamatování dochází k přechodovým dějům, jejichž tvar je závislý na použitém zapojení (může docházet i k překmitům).

7.2. Domácí příprava

7.2.1. Jakou vzorkovací frekvenci zvolíte k ovzorkování obdelníkového průběhu o základní frekvenci 1 kHz tak, aby rozdíl původního signálu a rekonstruovaného průběh byl menší než 10 %?

v matlabu jsme pomocí postupné aproximace obdelníku s jednotkovou amplitudou (relativní ke skutečné amplitudě) $o_k = \sum_{n=1,3,5,\dots}^k \frac{1}{0.8n} \sin(2\pi n f_0 t)$ a porovnáváním velikosti její STDA

 $\Delta_k = \sqrt{N^{-1} \sum_i^N (o_{k,i} - o_{ID,i})^2}$ od ideálního obdelníku o_{ID} hledali nejmenší ktakové, že $\Delta_k \stackrel{.}{<} 0.1,$ to nám vyšlo k=41,a tudíž $f_s=kf_0=41~\mathrm{kHz}$

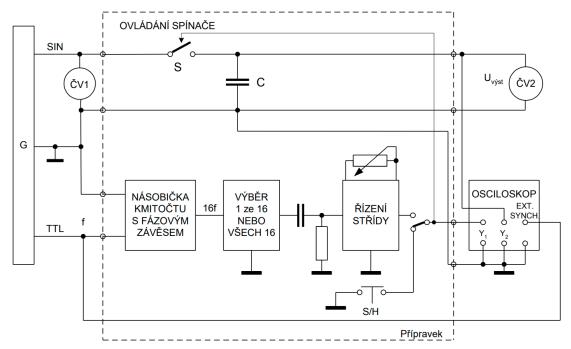
```
o ID=[ones([1 5000]) -1*ones([1 5000])];
o k=zeros([1 10000]);
t=linspace(0,0.9999,10000);
while sqrt(mean((o k-o ID).^2))>0.1 %STDA
    o k=0 k+(1/k/0.8)*sin(2*pi*f0*k*t);
    k=k+2;
end
k=k-2 %k-tá harmonická
```

7.2.2. Uveď te vztah pro výpočet efektivní hodnoty z ovzorkovaného signálu. $U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} U_k^2}$

7.3. Úkol měření

- **7.3.1.** Pomocí přípravku se vzorkovačem, jehož blokové schéma je nakresleno na obr. 7.2, zobrazte na osciloskopu ovzorkovaný průběh harmonického napětí z generátoru programovatelného průběhu uloženého v 2. paměti s frekvencí 1 kHz a efektivní hodnotou střídavé složky 2 V a se stejnosměrou složkou 0,5 V.
- 7.3.2. V režimu "ruční vzorkování" sledujte na číslicovém voltmetru změnu hodnoty ovzorkovaného výstupního napětí $U_{v\acute{y}st}$ v závislosti na čase (chyba v režimu pamatování), stanovte velikost této změny za 10 s a přepočtěte ji na mV/ms.
- **7.3.3.** S vhodně nastaveným rozlišením horizontální osy na osciloskopu zobrazte průběh napětí $U_{v\acute{u}st}$ na výstupu v časovém intervalu "upnutí" a určete přibližně upínací dobu.
- **7.3.4.** V režimu přípravku "1 ze 16" změřte pomocí stejnosměrného číslicového voltmetru postupně všech 16 hodnot vzorků napětí, časový průběh signálu graficky rekonstruujte, vypočtěte efektivní hodnotu rekonstruovaného signálu a porovnejte výsledek s hodnotou změřenou střídavým číslicovým voltmetrem přímo na výstupu funkčního generátoru. Případné rozdíly diskutujte.
- **7.3.5.** Připojte generátor programovatelného průběhu přímo k osciloskopu. Na generátoru nastavte postupně průběh obdélníkový, sinusový a trojúhelníkový, frekvenci 100 kHz, rozkmit 1 Všš. Stanovte 1. až 5. harmonickou jednotlivých průběhů.
- **7.3.6.** Načtěte postupně průběhy v 3. a 4. paměti generátoru, a zobrazte jejich spektrum. Diskutujte porovnání obou spekter s obdélníkovým průběhem v předchozím bodě a vysvětlete případné rozdíly. (tato úloha vynechána se svolením cvičícího)

7.4. Schéma zapojení



Obr. 7.2. Zapojení přípravku pro demonstraci principu vzorkování

7.5. Poznámky k měření

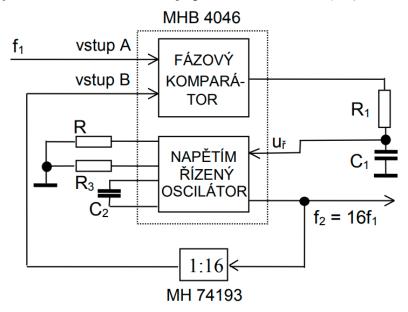
- **7.5.1.** Pomocí čtyř tlačítek (stisknuto = 1, nestisknuto = 0) můžeme postupně zvolit číslo vzorku 0 až 15 (binárně 0000 až 1111) a jednotlivé hodnoty změřit stejnosměrným číslicovým voltmetrem.
- 7.5.2. V přípravku, který máme k dispozici pro měření, je pro odvození vzorkovacího signálu použit obvod tzv. fázového závěsu, pomocí něhož je generován vzorkovací signál o kmitočtu 16 f (f je kmitočet vzorkovaného harmonického napětí odebíraného z funkčního generátoru). Časovou základnu osciloskopu musíme synchronizovat s měřeným signálem, k čemuž s výhodou použijeme obdélníkové napětí z druhého výstupu funkčního generátoru (výstup TTL).

Princip násobičky kmitočtu s fázovým závěsem - pro násobení kmitočtu se v obvodu fázového závěsu (obr. 7.3.) využívá napětím řízený oscilátor a fázový komparátor. Na vstup A fázového komparátoru je přiveden kmitočet f_1 , který chceme vynásobit, na vstup B výstupní kmitočet napětím řízeného oscilátoru vydělený šestnácti. Jako dělička

na vstup B výstupní kmitočet napětím řízeného oscilátoru vydělený šestnácti. Jako dělička je zde použit binární synchronní vratný čítač MH 74193. Výstupním napětím z fázového komparátoru je řízen napětím řízený oscilátor. Na jeho výstupu bude v ustáleném stavu kmitočet f_2 , pro který platí

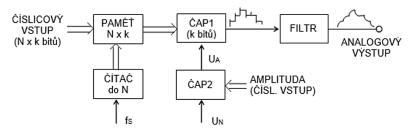
$$\frac{f_2}{16} = f_1$$
 a tedy $f_2 = 16f_1$

Kmitočtový rozsah NŘO se nastavuje pomocí rezistorů R_2 , R_3 a kondenzátoru C_2 .



Obr. 7.3. Principiální zapojení násobičky s fázovým závěsem

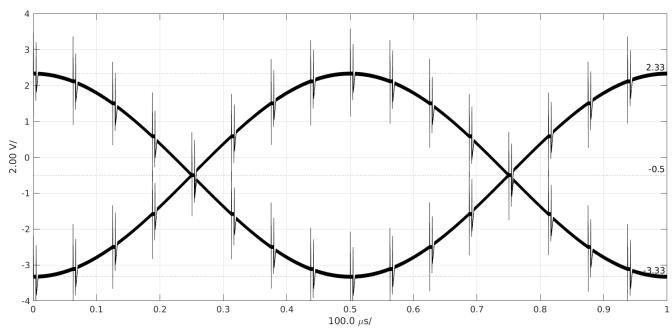
7.5.3. Blokové schéma generátoru programovatelného průběhu je na obr. 7.4. Pomocí těchto generátorů je možné generovat libovolný periodický průběh. Definuje se tvar a frekvence signálu. Posloupnost N hodnot signálu v jedné periodě je uložena v číslicové paměti generátoru. Jednotlivá slova v paměti vyjadřují amplitudu vzorků signálu. Čísla z paměti jsou převáděna na napětí pomocí převodníku ČAP1. Maximální hodnota výstupního signálu se nastavuje pomocí převodníku ČAP2. Výstupní signál je vyhlazen výstupním filtrem. Tvar průběhu je možné zadávat bod po bodu z klávesnice, vypočítat v počítači nebo z paměti např. osciloskopu.



Obr. 7.4. Blokové schéma generátoru programovatelného průběhu (ČAP1, ČAP2 – číslicově-analogové převodníky)

7.5.4. Rychlá Fourierova transformace (FFT) je algoritmem diskrétní Fourierovi transformace (DFT) umožňující určit jednotlivé koeficienty funkce. FFT je v osciloskopu implementována v matematických funkcích (červené tlačítko MATH). Nad výpočtem lze pracovat s lupou, s kurzory, je možné měnit šířku zobrazení v menu FFT. Pro DFT platí předpoklady, které u osciloskopu nelze splnit (ten hlavní je celistvý počet period v 2n vzorků). Použití oken a správného nastavení je tedy nezbytné.

7.3.1.



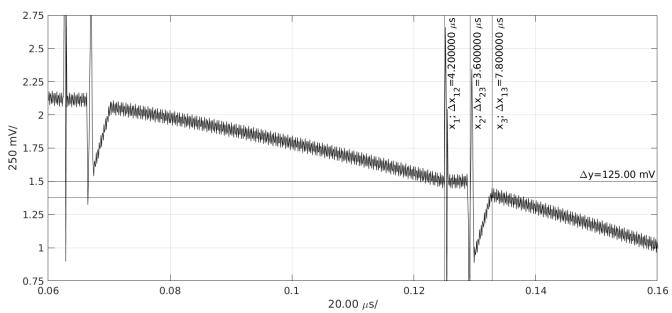
Obr. 7.5 Signál U_{OUT} zobrazený osciloskopem O

7.3.2.

T. 7.1. Měření výstupního mapětí U_{OUT} multimetrem M

	· -		
$U_{OUT}(t=0s)$	$U_{OUT}(t=10s)$	ΔU_{OUT}	$\Delta U_{OUT}/\Delta t$
0.19067 V	0.15038 V	-0.04029 V	$-0.00403 \; \text{mV/ms}$





Obr. 7.6 Přiblížení signálu U_{OUT} zobrazeného osciloskopem O

přibližná doba upnutí odpovídá Δx_{23} , tj. $t_u = 3.6 \ \mu s$

7.3.4.

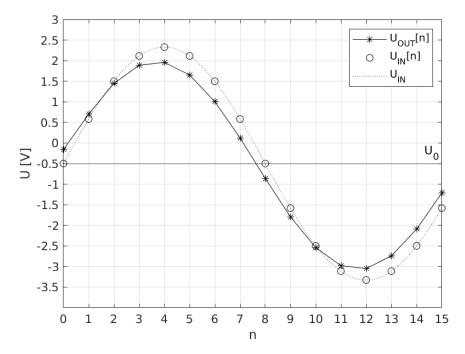
T. 7.6. Měření výstupního mapětí U_{OUT} v režimu "1 ze 16" multimetrem M

n	0	1	2	3	4	5	6	7
$U_{OUT}[n] [V]$	-0.162	0.703	1.4467	1.888	1.959	1.650	1.005	0.122
$U_{IN}[n] [V]$	-0.500	0.582	1.500	2.113	2.328	2.113	1.500	0.582
$U_{OUT}[n+8] [V]$	-0.860	-1.795	-2.539	-2.981	-3.050	-2.742	-2.093	-1.214
$U_{IN}[n+8] [V]$	-0.500	-1.582	-2.500	-3.113	-3.328	-3.113	-2.500	-1.582

$$U_{ef}(U_{IN}) = \sqrt{\frac{1}{N_{gen}} \sum_{k=0}^{N_{gen}-1} U_{IN}[n]^2} = 2.101 \text{ V}$$

$$U_{ef}(U_{OUT}) = \sqrt{\frac{1}{16} \sum_{k=0}^{15} U_{OUT}[n]^2} = 1.866 \text{ V}$$

výstupní napětí U_{OUT} je přibližně o deset procent menší, nežli napětí vstupní U_{IN} , to může být způsobeno ztrátou napětí na vodičích a odporu obvodu



Obr. 7.7. Rekonstrukce signálu výstupního napětí U_{OUT}

7.3.5.

T. 7.6. k-té harmonické signálů $X(f_0=100 \text{ kHz}, U_M=1 \text{ V})$

		0	() 0	, 1.1	,
k	1	2	3	4	5
$f(X = \sim)[k] \text{ kHz}$	100	200	300	400	500
$f(X = \square)[k] \text{ kHz}$	100	300	500	700	900
$f(X = \triangle)[k] \text{ kHz}$	100	300	500	700	900

6.6. Seznam použitých přístrojů a obvodvých prvků

zn	přístroj/prvek	specifikace
M	multimetr	HP 34401A
О	osciloskop	Keysight DSOX2002A 70 MHz
G1	generátor	Tektronix AFG 3022B 25 MHz
G2	generátor	TESLA BK 125: $UZ = 15V$

7.7. Závěrečné vyhodnocení

měření proběhlo úspěšně;

vyzkoušeli jsme si prracovat jak se vzorkovačem využívajícím obvod fázového závěsu, tak i laboratorním osciloskopemů s vysokou vzorkovací frekvencí; přibližně jsme určili chybu v režimu pamatování a upínací dobu; ověřili jsme pomocí FFT (pro prvních 5 k), že sinusový signál má $f[k] = kf_0$ a že jak obdelníkový, tak trojuhelníkový signál má $f[k] = (2k-1)f_0$