

OTE Semestrální úloha – Kapacitní snímač výšky hladiny

Vojtěch Michal

27. května 2022

1 Přenos kapacitního snímače

Pro odvození přenosu kapacitního snímače z budicího napětí U_1 (uzel *buzení* ve schématu 1) na výstupní napětí U_2 (uzel 15 ve schématu 1) je použit virtuální zkrat mezi vstupy operačního zesilovače U3A s imedančním děličem ve zpětné vazbě. Nechť Z_A označuje impedanci obecného prvku A , poté se dá virtuální zkrat vstupů popsat rovnicí

$$U_1 = U_2 \cdot \frac{Z_{C_x} || Z_{R_x}}{(Z_{C_x} || Z_{R_x}) + Z_{C_1}}. \quad (1)$$

Odtud je přenos ze vstupu na výstup roven

$$\begin{aligned} \frac{U_2}{U_1} &= \frac{(Z_{C_x} || Z_{R_x}) + Z_{C_1}}{Z_{C_x} || Z_{R_x}} = \frac{\frac{R_x}{R_x + \frac{1}{j\omega C_x}} + \frac{1}{j\omega C_1}}{\frac{R_x}{R_x + \frac{1}{j\omega C_x}}} \\ &= \frac{\frac{R_x}{R_x j\omega C_x + 1} + \frac{1}{j\omega C_1}}{\frac{R_x}{R_x j\omega C_x + 1}} = \frac{\frac{R_x j\omega C_x + 1 + R_x j\omega C_1}{j\omega C_1 (1 + R_x j\omega C_x)}}{\frac{R_x}{j\omega C_x R_x + 1}} \\ &= \frac{1 + R_x j\omega (C_x + C_1)}{j\omega R_x C_1} = \frac{1}{j\omega R_x C_1} + \frac{C_x + C_1}{C_1} \\ &= \frac{C_x + C_1}{C_1} - j \frac{1}{\omega R_x C_1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Pro měření neznámé kapacity C_x je tak postačující synchronním detektorem sledovat reálnou složku výstupního signálu (spínač bude řízen ve fázi s budícím signálem), jež bude afinní funkcí neznámé kapacity

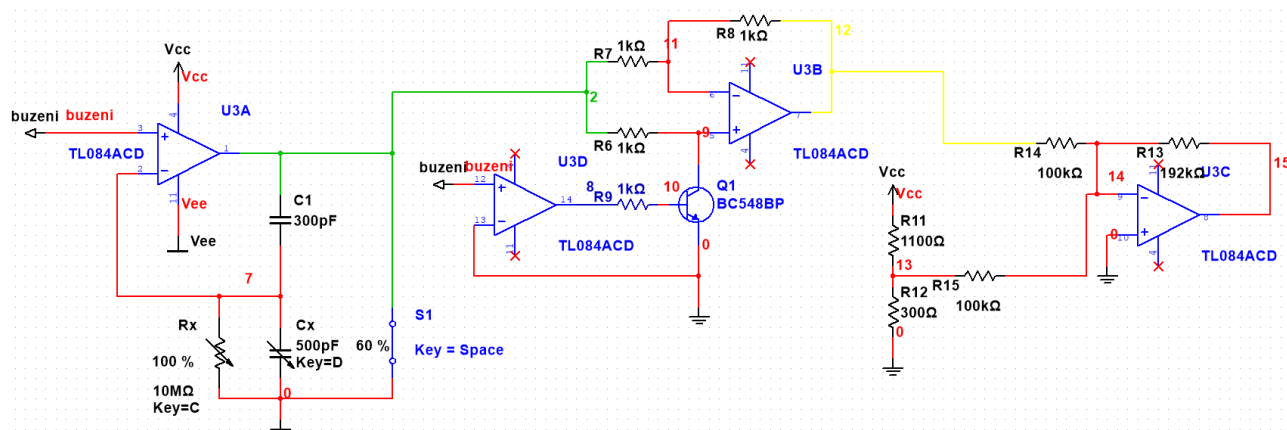
$$U_{\text{out}} = \left(1 + \frac{C_x}{C_1}\right) U_{\text{in}}. \quad (3)$$

Velikost ztrátového odporu R_x nemá ideálně na měřenou reálnou složku žádný vliv.

2 Návrh obvodu

Pro praktickou realizaci byl použit obvod Wienova oscilátoru napájeného z $\pm 5\text{ V}$, kterému je ve zpětné vazbě nastaven trimmer R1 na 38 % rozsahu $50\text{ k}\Omega$ tak, aby budicí signál měl amplitudu 1 V . Pro rozkmitání obvodu je potřeba na okamžik snížit nastavení R1 na 37 % rozsahu. Měřicí obvod je postaven ze čtyřnásobného operačního zesilovače TL084CD (součástka U3A) a jako spínač v synchronním detektoru je použit NPN tranzistor BC548BP (součástka Q1).

V měřicí části obvodu, viditelné na obrázku 1, je buzení vedeno na neinvertující vstup U3A, v jehož zpětné vazbě je zapojena měřená impedance R_x , C_x . Byla zvolena kapacita $C_1 = 300\text{ pF}$, aby bylo zesílení měřicího obvodu dle rovnice (3) omezeno na rozsah 1 až 2 a nedocházelo tak k saturaci operačního zesilovače, který dle produktového listu není rail-to-rail.



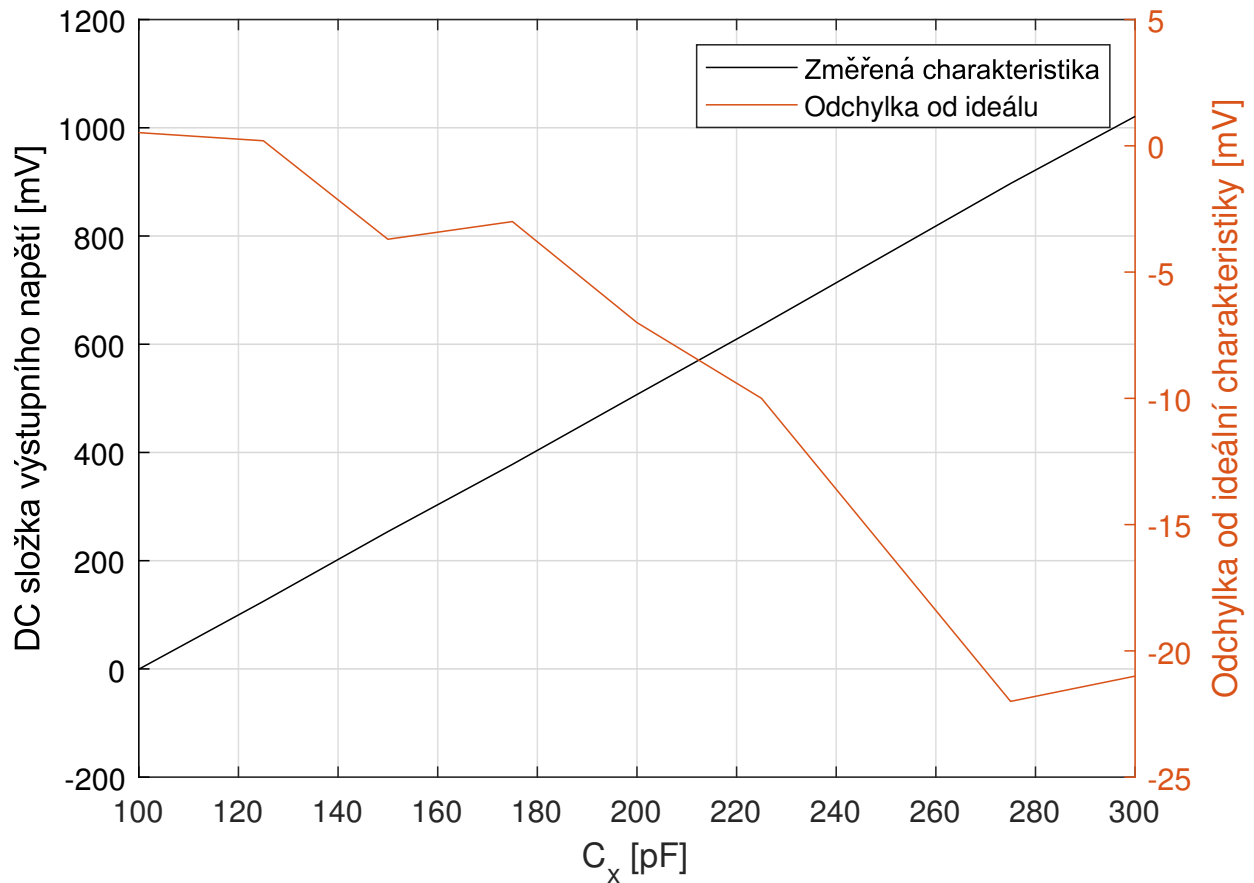
Obrázek 1: Simulační schéma

Kanál U3B slouží jako zesilovač s přepínatelným zesílením ± 1 , jehož spínací tranzistor je řízen kanálem U3D použitým v roli komparátoru budicího signálu s nulou. Poslední kanál v pouzdře TL084 je použit jako sčítací zesilovač, který odstraňuje experimentálně naměřenou stejnosměrnou složku 1070 mV z výstupu synchronního detektoru a zajišťuje, že výstup celého obvodu (uzel 15) je v rozsahu 0 až 1 V dle požadavků zadání. Pro realizaci obvodu byla zvolena řada odporů E24, proto dělič R11, R12 s výstupním napětím 1070 mV sestává z odporů $1100\text{ }\Omega$ a $300\text{ }\Omega$ a ve zpětné vazbě U3C je odpor $192\text{ k}\Omega$, jenž lze vytvořit seriovým zapojením odporů $180\text{ k}\Omega$ a $12\text{ k}\Omega$.

3 Měření kapacity C_x

3.1 Harmonické buzení bez rušení

Bez připojení rušivého napětí byla změřena charakteristika uvedená v tabulce 1 a na obrázku 2. Směrodatná odchylka od ideální lineární převodní charakteristiky je $\sigma = 8.7 \text{ mV}$ a rozptyl $\sigma^2 = 75.78 \text{ mV}^2$.



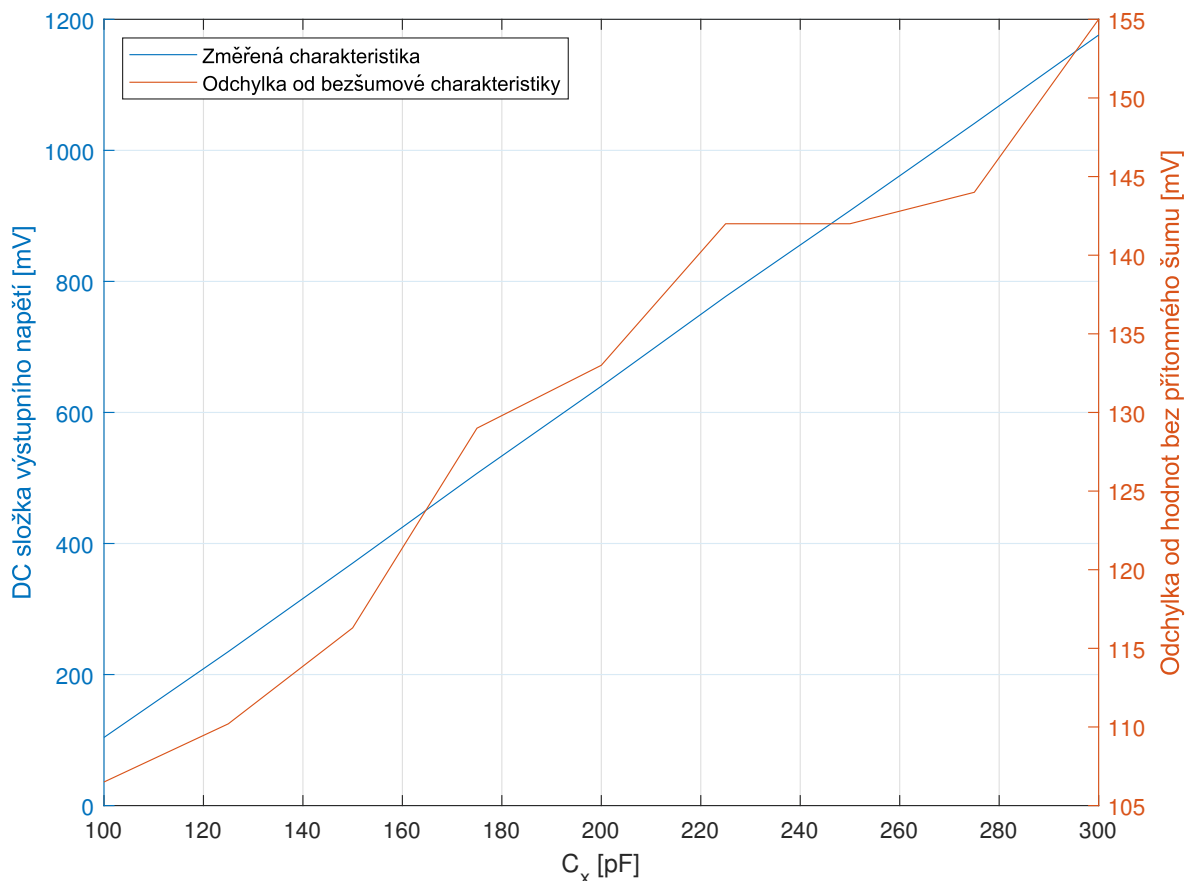
Obrázek 2: Převodní charakteristika z kapacity C_x na výstup bez rušení

kapacita C_x [pF]	Změřený výstup [mV]	Ideální výstup [mV]	Odchylka [mV]
100	-0.5	0	0.5
125	124	125	0.2
150	253	250	-3.7
175	378	375	-3
200	507	500	-7
225	635	625	-10
250	766	750	-16
275	897	875	-22
300	1021	1000	-21

Tabulka 1: Změřené body převodní charakteristiky z kapacity C_x na výstup bez rušení

3.2 Harmonické buzení s rušením

Po připojení rušivého napětí o amplitudě 100 mV a frekvenci 50 Hz byly změřeny body charakteristiky uvedené v tabulce 2 a na grafu 3. Je vidět, že rušivé napětí způsobilo přibližně lineárně rostoucí odchylku od měření provedeného bez rušení (tabulka 1), jejíž směrodatná odchylka je $\sigma = 16.74 \text{ mV}$ a rozptyl $\sigma^2 = 280.48 \text{ mV}^2$. Je očekávatelné, že je na výstupu odlišné napětí, protože modulované rušení způsobilo nepřesnost synchronní detekce. Proto se na výstup začala propisovat i imaginární složka signálu.



Obrázek 3: Převodní charakteristika z kapacity C_x na výstupní napětí s rušením

kapacita C_x [pF]	Změřený výstup [mV]	Ideální výstup [mV]	Odchylka [mV]
---------------------	---------------------	---------------------	---------------

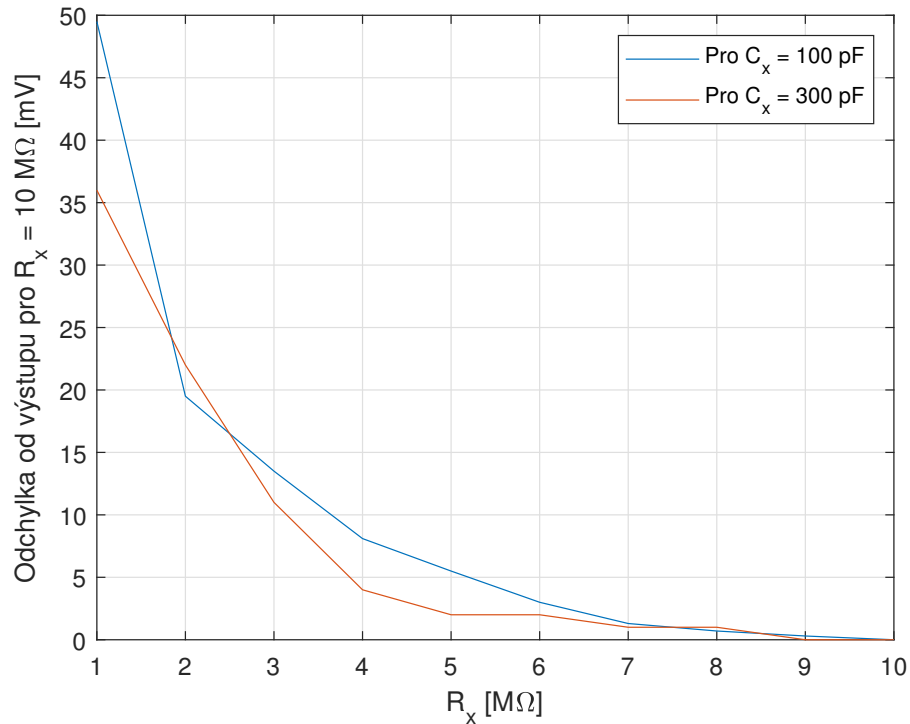
Tabulka 2: Změřené body převodní charakteristiky z kapacity C_x na výstupní napětí s rušením

3.3 Obdélníkové buzení

Při buzení obvodu pomocí *clock voltage* o frekvenci 1 kHz a amplitudě 1 V se nepodařilo změřit žádné rozumné charakteristiky, protože výstupy operačních zesilovačů rychle odcházely do saturace bez zřejmé závislosti na velikosti neznámé kapacity C_x .

4 Potlačení změny R_x

Výstupní napětí by dle (3) mělo být málo závislé na velikosti ztrátového odporu R_x . V tabulce 3 a na grafu 4 jsou zachyceny body převodní charakteristiky obvodu. Hodnoty v grafu jsou vztaženy k "ideálním" hodnotám naměřeným při největším nastaveném odporu $R_x = 10 \text{ M}\Omega$.



Obrázek 4: Převodní charakteristika z odporu R_x na výstup

odpor R_x [MΩ]	Výstup pro $C_x = 100 \text{ pF}$ [mV]	Výstup pro $C_x = 300 \text{ pF}$ [mV]
1	47	1055
2	17	1041
3	11	1030
4	5.6	1023
5	3.0	1021
6	0.5	1021
7	-1.2	1020
8	-1.8	1020
9	-2.2	1019
10	-2.5	1019

Tabulka 3: Změřené body převodní charakteristiky z odporu R_x na výstup