

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

Digitální multimetry

Přednáška KET/ELM

J. Švarný



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Digitální multimetry

Obsah

- Vlastnosti digitálních multimetrů (DMM)
- Blokové uspořádání DMM
- A/D převodník v DMM
- Odolnost DVM vůči vnějšímu rušení
- Literatura



(převzato z: http://www.educatorscorner.com/images/cartoon_digitalb-lg.gif)

Vlastnosti digitálních multimetrů

Digitální multimetr (**DMM**) je měřicí přístroj s digitálním displejem používaný pro měření více veličin (typicky DC a AC proudy a napětí, odpor + popř. další veličiny).

Výhody DMM oproti ručkovým (analogovým) přístrojům

- Přesnost měření
- Jednoznačnost údaje
- Možnost automatické volby rozsahů (Autorange)
- Vyšší odolnost proti přetížení
- Možnost dálkového ovládání
- Možnost přenosu měřených dat k dalšímu zpracování

Vlastnosti digitálních multimetrů

Základní charakteristiky DMM

- Počet míst na displeji

(3 až 8,5)



- Počet a hodnoty vstupních rozsahů (Ranges)
Typicky 4 až 6 pro každou veličinu.

Vlastnosti digitálních multimetrů

Základní charakteristiky DMM

- Přesnost a časová stálost (Accuracy)

Specifikována pro každou veličinu i rozsah zvlášť. Udává se pro různé časové intervaly od kalibrace (24 hod, 3 měsíce, 1 rok).

Accuracy Specifications $\pm$ (% of reading + % of range)¹

Function	Range ³	Frequency, etc.	24 Hour ² 23°C $\pm$ 1°C	90 Day ² 23°C $\pm$ 5°C	1 Year ² 23°C $\pm$ 5°C	Temperature Coefficient 0°C – 18°C 28°C – 55°C
DC voltage	100.0000 mV		0.0030 + 0.0030	0.0040 + 0.0035	0.0050 + 0.0035	0.0005 + 0.0005
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
	10.00000 V		0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
	1000.000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0010	0.0045 + 0.0010	0.0005 + 0.0001
True rms AC voltage ⁴	100.0000 mV	3 Hz – 5 Hz	1.00 + 0.03	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	0.100 + 0.004
		5 Hz – 10 Hz	0.35 + 0.03	0.35 + 0.04	0.35 + 0.04	0.035 + 0.004
		10 Hz – 20 kHz	0.04 + 0.03	0.05 + 0.04	0.06 + 0.04	0.005 + 0.004
		20 kHz – 50 kHz	0.10 + 0.05	0.11 + 0.05	0.12 + 0.05	0.011 + 0.005
		50 kHz – 100 kHz	0.55 + 0.08	0.60 + 0.08	0.60 + 0.08	0.060 + 0.008
		100 kHz – 300 kHz ⁶	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	0.20 + 0.02
	1.000000 V to 750.000 V	3 Hz – 5 Hz	1.00 + 0.02	1.00 + 0.03	1.00 + 0.03	0.100 + 0.003
		5 Hz – 10 Hz	0.35 + 0.02	0.35 + 0.03	0.35 + 0.03	0.035 + 0.003
		10 Hz – 20 kHz	0.04 + 0.02	0.05 + 0.03	0.06 + 0.03	0.005 + 0.003
		20 kHz – 50 kHz	0.10 + 0.04	0.11 + 0.05	0.12 + 0.04	0.011 + 0.005
		50 kHz – 100 kHz ⁵	0.55 + 0.08	0.60 + 0.08	0.60 + 0.08	0.060 + 0.008
		100 kHz – 300 kHz ⁶	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	0.20 + 0.02
Resistance ⁷	100.0000 Ω	1 mA Current Source	0.0030 + 0.0030	0.008 + 0.004	0.010 + 0.004	0.0006 + 0.0005
	1.000000 k Ω	1 mA	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	10.00000 k Ω	100 μ A	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	100.0000 k Ω	10 μ A	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001

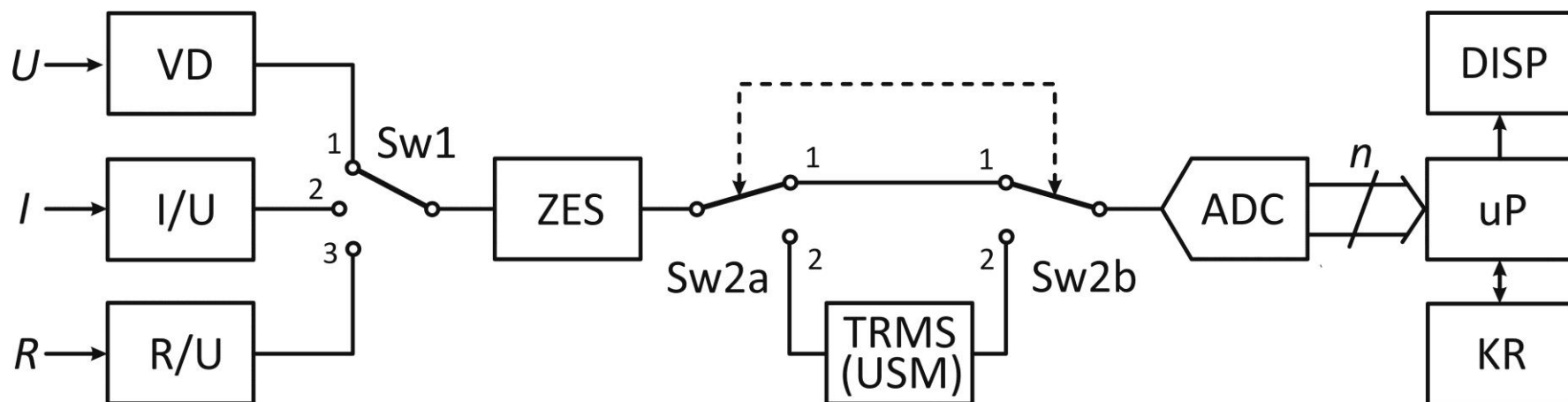
Příklad specifikace (DMM Agilent 34401A), [2]

Vlastnosti digitálních multimetrů

Základní charakteristiky DMM

- **Rozlišovací schopnost (Resolution)**
Vyjadřuje nejmenší zobrazitelnou změnu veličiny na daném rozsahu. Odpovídá pojmu “digit”.
- **Vstupní odpor resp. impedance**
Při měření DC napětí: $10\text{ M}\Omega$
Při měření AC napětí: $1\text{ M}\Omega \parallel (50\text{--}100\text{ pF})$
Při měření proudu: různé hodnoty dle bočníku pro daný rozsah. Uvádí se úbytek při plném rozsahu (typ. $< 1\text{ V}$).
- **Typ převodníku pro měření AC napětí a proudů**
Aktivní usměrňovač
True RMS převodník
- **Komunikační rozhraní**
(RS232, USB, GPIB, ...)

Blokové uspořádání DMM



VD...vstupní dělič

I/U...převodník proudu na napětí

R/U...převodník odporu na napětí

ZES...zesilovač

TRMS... True RMS převodník

USM...usměrňovač

ADC...A/D převodník

μP ...mikro počítač

DISP...displej

KR...komunikační rozhraní

A/D převodník v DMM

A/D převodník (**ADC**) = obvod provádějící tzv. **kvantování** spojitého analogového signálu tj. převod hodnoty vstupního napětí U_x na číslo ve dvojkové soustavě.

Rozlišení převodníku odpovídá hodnotě tzv. kvantovacího kroku q :

$$q = \frac{U_R}{2^n}$$

U_R ...referenční napětí (obvykle platí $U_R = U_{max} + q$)

n ...počet bitů ADC

ADC realizuje funkci:

$$D = \text{round} \left(\frac{U_x}{q} \right) = \text{round} \left(\frac{U_x}{U_R} 2^n \right)$$

A/D převodník v DMM

D ...dekadická hodnota výsledného čísla

$$D = a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_12^1 + a_02^0$$

a_i ...jednotlivé bity binární interpretace (0 nebo 1) hodnoty D

a_{n-1} ...MSb – bit s nejvyšší vahou

a_0 ...LSb – bit s nejnižší vahou

Dle akceptovatelné polaroty vstupního napětí rozlišujeme ADC unipolární a bipolární.

BASE 10 NUMBER	SCALE	+10 V FS	BINARY
+15	+FS – 1 LSB = 15/16 FS	9.375	1111
+14	+7/8 FS	8.750	1110
+13	+13/16 FS	8.125	1101
+12	+3/4 FS	7.500	1100
+11	+11/16 FS	6.875	1011
+10	+5/16 FS	6.250	1010
+9	+9/16 FS	5.625	1001
+8	+1/2 FS	5.000	1000
+7	+7/16 FS	4.375	0111
+6	+3/8 FS	3.750	0110
+5	+5/16 FS	3.125	0101
+4	+1/4 FS	2.500	0100
+3	+3/16 FS	1.875	0011
+2	+1/8 FS	1.250	0010
+1	1 LSB = +1/16 FS	0.625	0001
0	0	0.000	0000

Figure 5.4: Unipolar Binary Code, 4-Bit Converter

(převzato z [3])

A/D převodník v DMM

Kvantovací chyba – kvantizační šum

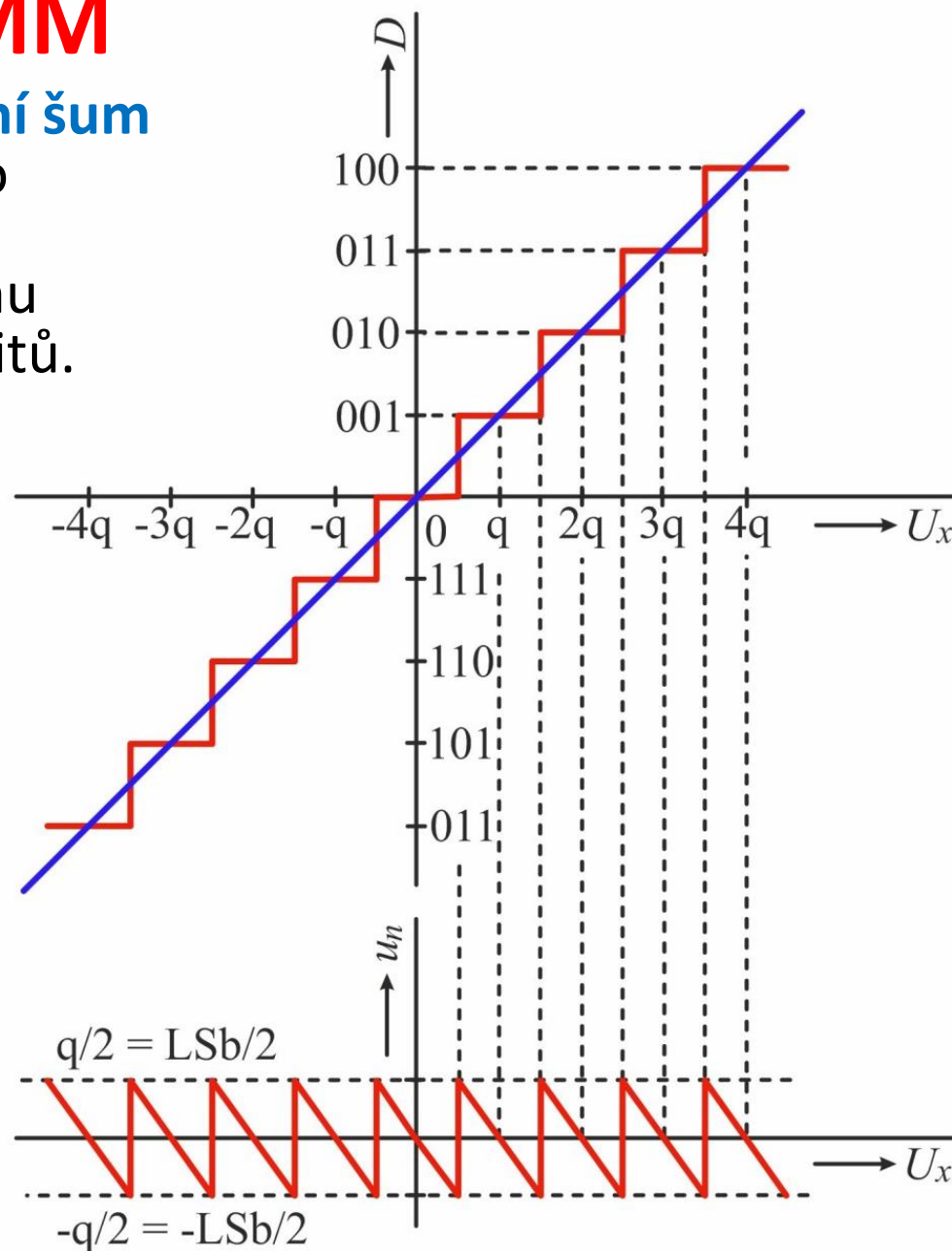
- Přírozená vlastnost každého A/D převodníku.
- Hodnota kvantizačního šumu klesá s rostoucím počtem bitů.

$$SNR = 20 \log \frac{U_{SINef}}{U_{Nef}} \cong \\ \cong 6,02 \cdot n + 1,76 \text{ (dB)}$$

U_{SINef} ... RMS hodnota vst. napětí při naplněném rozsahu převodníku

U_{Nef} ... RMS hodnota kvantizačního šumu

- Vyrábějí se různé ADC s různým počtem bitů (běžně 8 až 24 bit)



A/D převodník v DMM

RESOLUTION N	2^N	VOLTAGE (10V FS)	ppm FS	% FS	dB FS
2-bit	4	2.5 V	250,000	25	– 12
4-bit	16	625 mV	62,500	6.25	– 24
6-bit	64	156 mV	15,625	1.56	– 36
8-bit	256	39.1 mV	3,906	0.39	– 48
10-bit	1,024	9.77 mV (10 mV)	977	0.098	– 60
12-bit	4,096	2.44 mV	244	0.024	– 72
14-bit	16,384	610 μ V	61	0.0061	– 84
16-bit	65,536	153 μ V	15	0.0015	– 96
18-bit	262,144	38 μ V	4	0.0004	– 108
20-bit	1,048,576	9.54 μ V (10 μ V)	1	0.0001	– 120
22-bit	4,194,304	2.38 μ V	0.24	0.000024	– 132
24-bit	16,777,216	596 nV*	0.06	0.000006	– 144

*600nV is the Johnson Noise in a 10kHz BW of a 2.2k Ω Resistor @ 25°C

Remember: 10-bits and 10V FS yields an LSB of 10mV, 1000ppm, or 0.1%.
All other values may be calculated by powers of 2.

Velikost LSb v závislosti na počtu bitů převodníku (převzato z [3])

A/D převodník v DMM

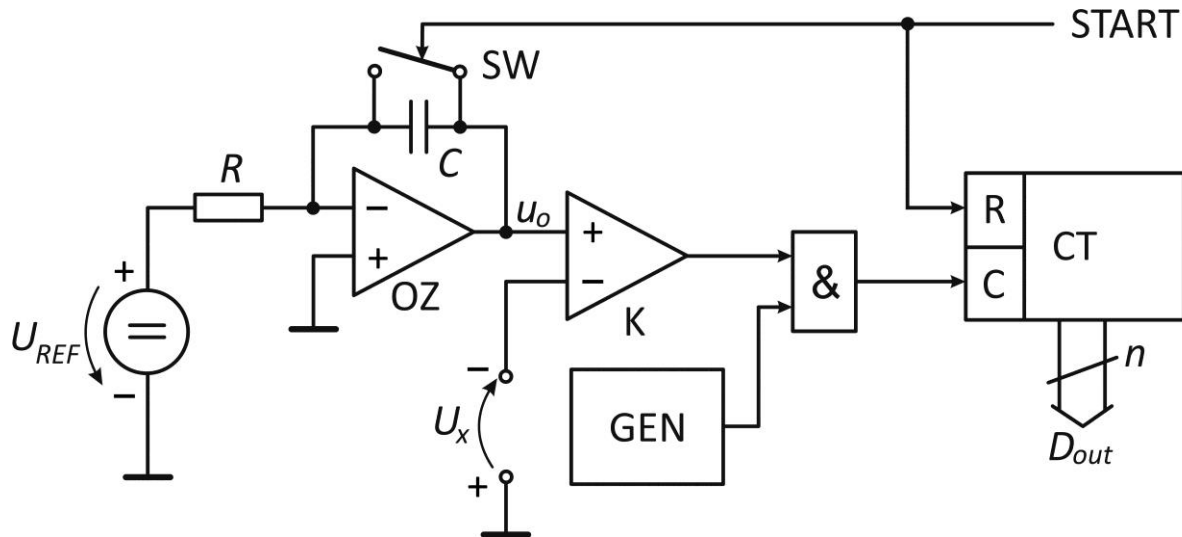
Vlivem různých nedokonalostí převodní charakteristiky vznikají kromě chyby kvantováním také tzv. **statické chyby**:

- Chyba nuly (offset – posuv převodní charakteristiky)
- Chyba zisku (nesprávný sklon převodní charakteristiky)
- Integrální nelinearita (změna zisku v závislosti na měřené hodnotě)
- Diferenciální nelinearita (výpadek ve výstupním kódu)

Při vyšších rychlostech převodu pak vznikají **dynamické chyby**, které dále snižují tzv. efektivní počet bitů převodníku.

A/D převodník v DMM

Integrační A/D převodník



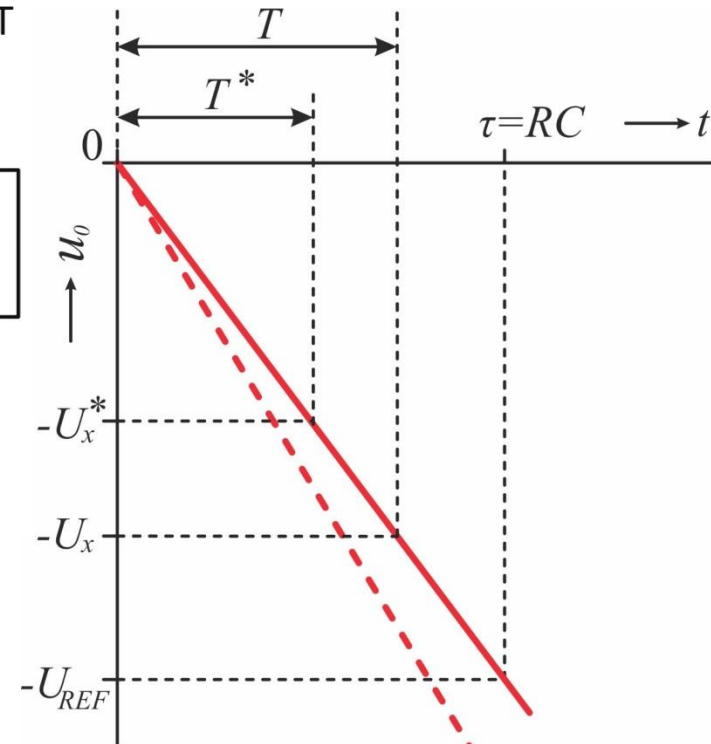
Princip ADC s jednoduchou integrací

- Pro $\tau = RC = konst.$ platí:

$$\frac{U_x}{U_{REF}} = \frac{t}{\tau} = \frac{D_{out}}{D_{max}} \Rightarrow U_x = U_{REF} \frac{D_{out}}{D_{max}}$$

Nevýhody ADC s jednoduchou integrací:

- silná teplotní závislost zapojení
- nízká odolnost vůči rušivému AC signálu



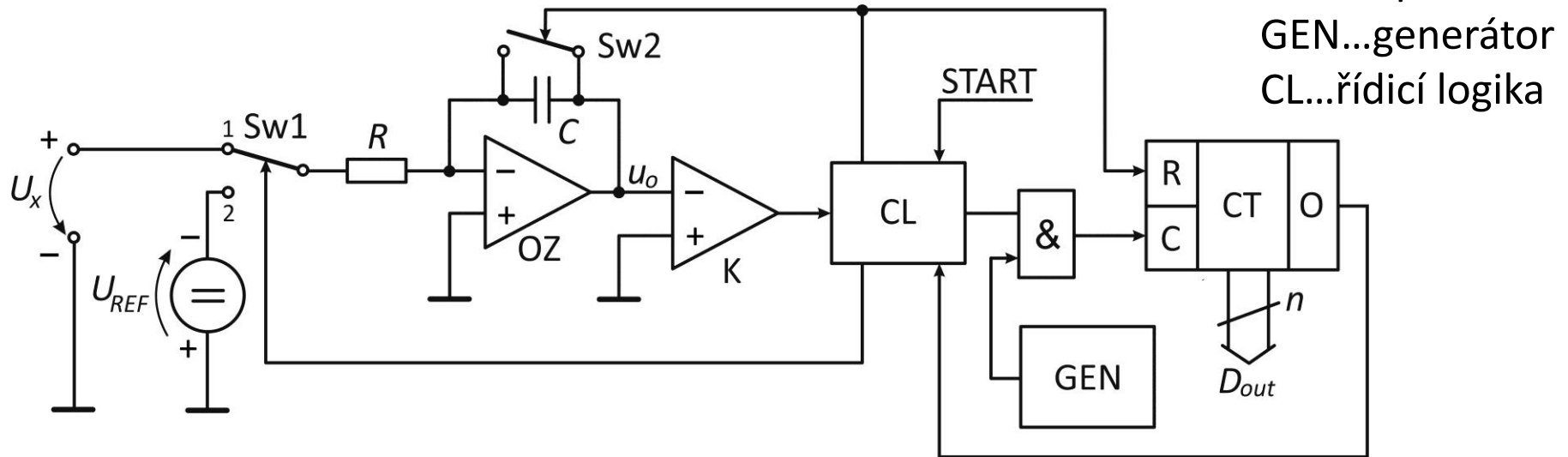
CT...čítač

K...komparátor

GEN...generátor

A/D převodník v DMM

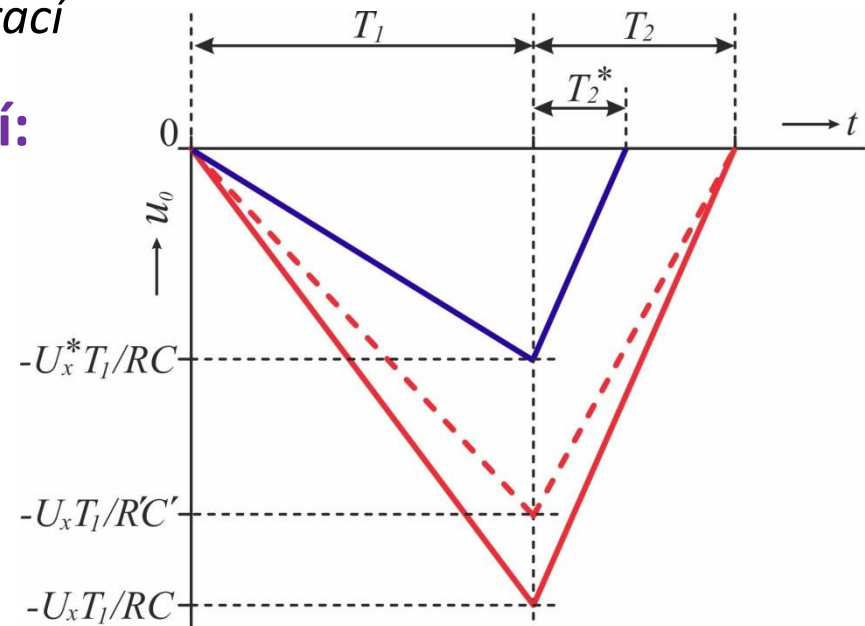
Integrační A/D převodník



Princip ADC s dvojitou integrací

Vlastnosti ADC s dvojitou integrací:

- Teplotní závislost R a C je výrazně potlačena
- Za určitých okolností vykazuje vysokou odolnost vůči AC rušivému signálu



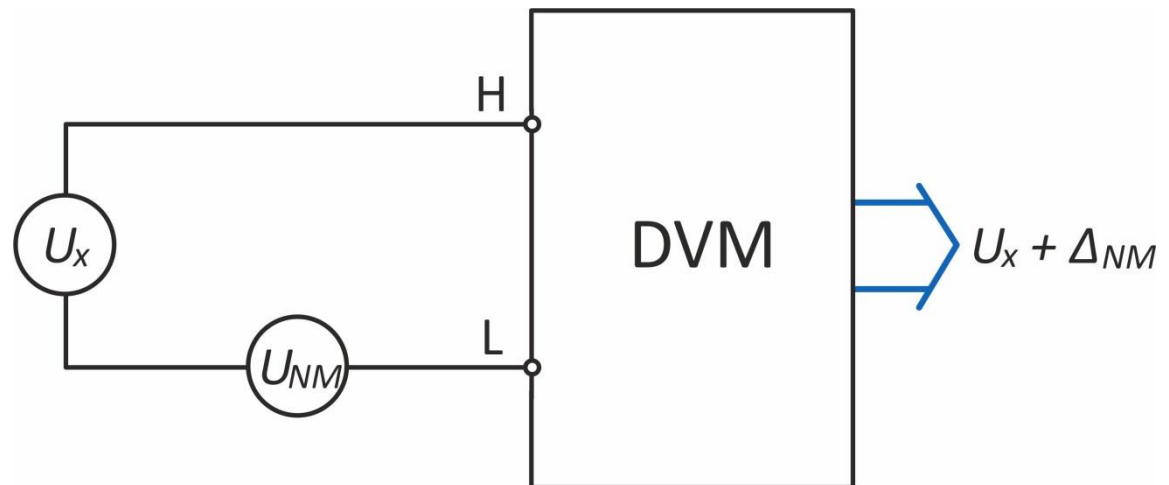
Odolnost DVM vůči vnějšímu rušení

Podle působení na vstup digitálního V-metru (DVM) rozlišujeme:

- Sériové rušení
- Souhlasné rušení

Sériové rušení (Serial Mode resp. Normal Mode)

- Působí v sérii s měřeným zdrojem.
- Vzniká galvanickou, elektrickou nebo magnetickou vazbou přívodního kabelu s okolím. Rušivý signál může mít DC i AC charakter.



U_x ...měřený signál

U_{NM} ...rušivé napětí

Δ_{NM} ...změna výstupního údaje přístroje vlivem U_{NM}

Odolnost DVM vůči vnějšímu rušení

Sériové rušení (Serial Mode resp. Normal Mode)

Odolnost přístroje vůči sériovému rušení se udává činitelem potlačení **NMR** (**N**ormal **M**ode **R**ejection)

$$NMR = 20 \log \left| \frac{U_{NM}}{\Delta_{NM}} \right| \quad (\text{dB})$$

Různé způsoby potlačení NM rušení:

Případ	Měřený signál	Rušivý signál	Způsob potlačení
#1	DC	DC	Kalibrace při $U_x = 0$
#2	DC	AC	Integrační ADC s dvojitou integrací, filtrace (DP, PZ)
#3	AC	DC	Oddělení DC složky
#4	AC	AC	Filtrace

Odolnost DVM vůči vnějšímu rušení

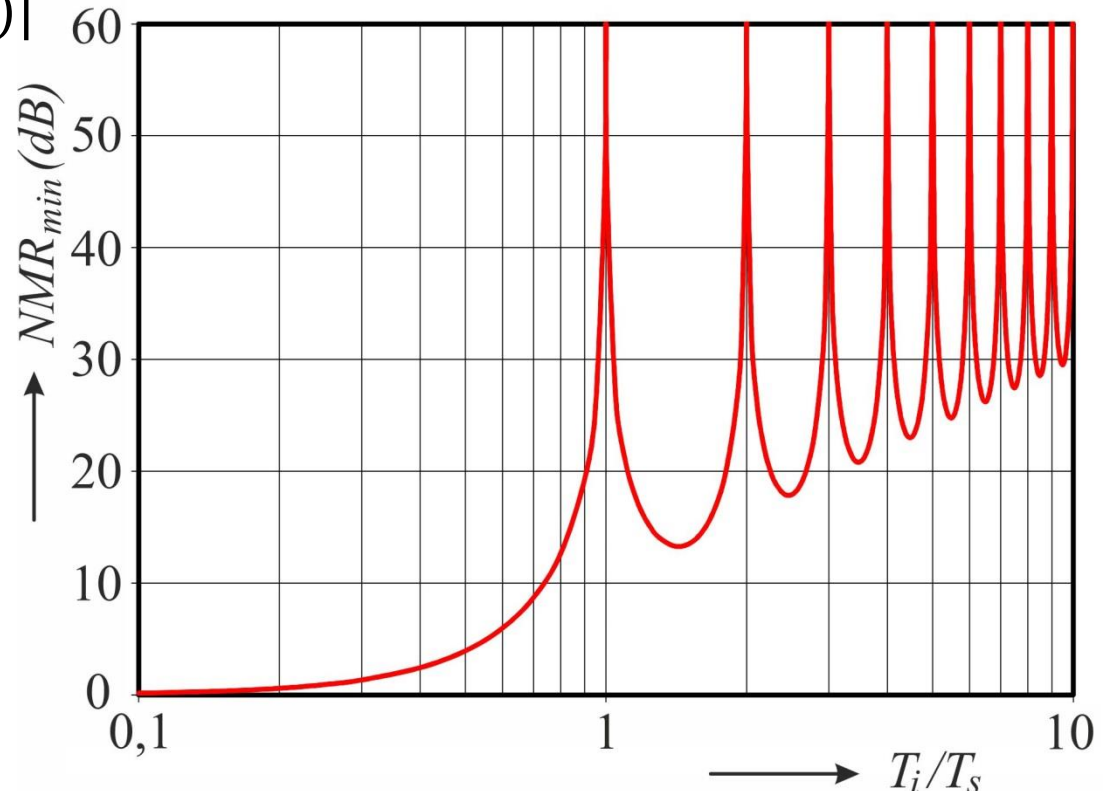
Sériové rušení (Serial Mode resp. Normal Mode)

Integrační převodník s dvojitou integrací výrazně potlačuje všechny složky spektra, které mají periodu odpovídající celočíselnému podílu doby integrace měřeného napětí.

$$NMR = 20 \log \frac{\pi T_i / T_s}{|\sin(\pi T_i / T_s)|}$$

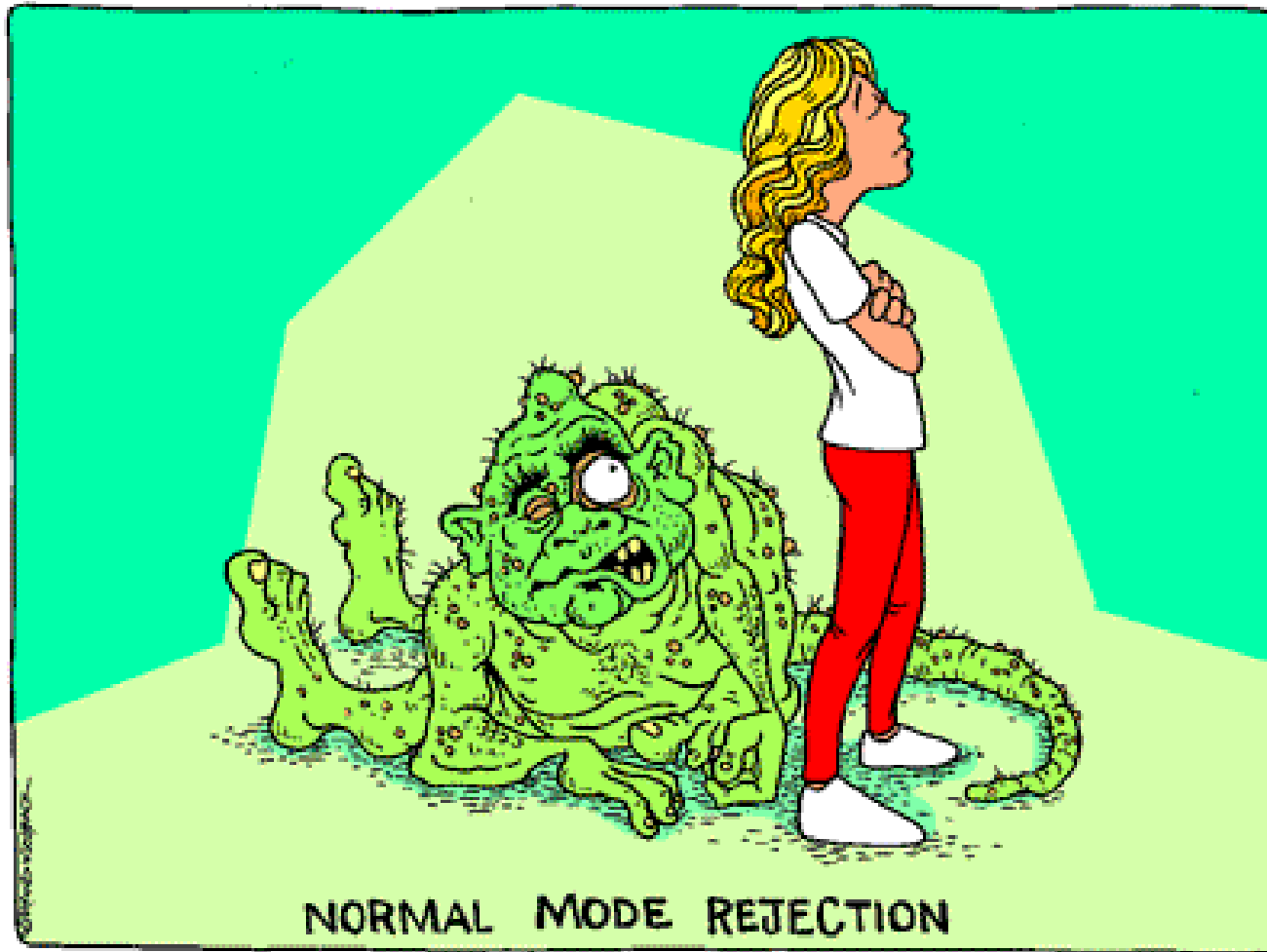
T_i ...doba integrace
měřeného napětí

T_s ...perioda rušivého
signálu



Odolnost DVM vůči vnějšímu rušení

Sériové rušení (Serial Mode resp. Normal Mode)



(převzato z: http://www.educatorscorner.com/images/cartoon_nrmlmodeb-lg.gif)

Odolnost DVM vůči vnějšímu rušení

Souhlasné rušení (Common Mode)

Souhlasné = působí na oba dva vstupy (H, L) stejným způsobem.

Vzniká vlivem rozdílu potenciálu země měřeného zdroje a země měřicího přístroje. Rozdíl potenciálů zemí může být způsoben:

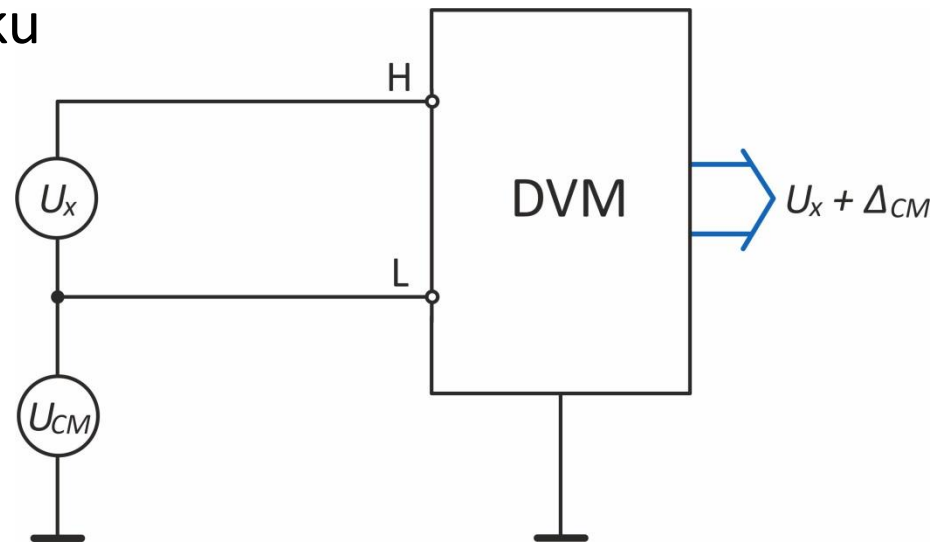
- Bludnými proudy procházejícími uzemňovacími obvody rozvodné sítě
- Napětím vznikajícím v důsledku funkce měřeného objektu (měření úbytku na plovoucí zátěži výkonového H-můstku)

Rušivý signál může být DC i AC.

U_x ...měřený signál

U_{CM} ...rušivé napětí

Δ_{CM} ...změna výstupního údaje přístroje vlivem U_{NM}



Odolnost DVM vůči vnějšímu rušení

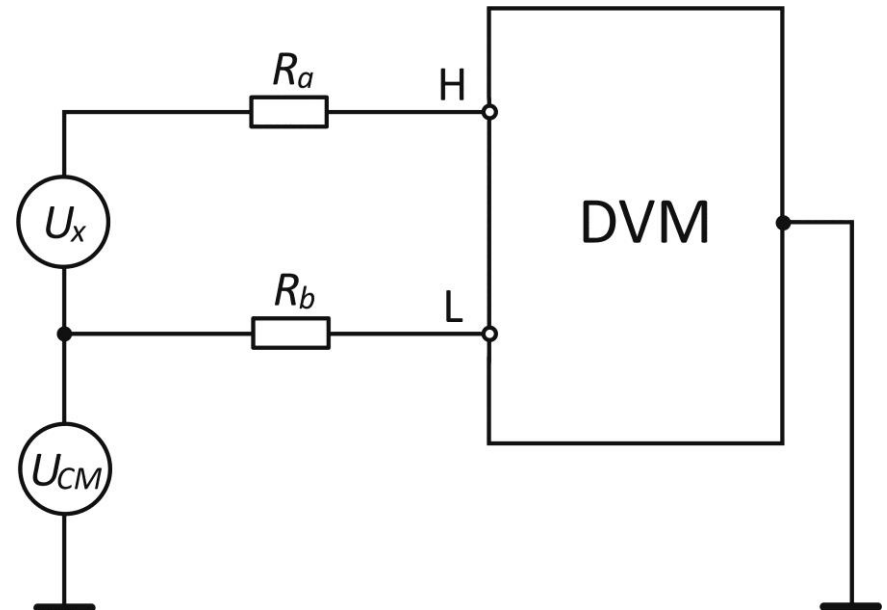
Souhlasné rušení (Common Mode)

Odolnost přístroje vůči souhlasnému rušení se udává činitelem potlačení **CMR** (Common Mode Rejection)

$$CMR = 20 \log \left| \frac{U_{CM}}{\Delta_{CM}} \right| \quad (\text{dB})$$

- Míra působení rušení je významně ovlivněna velikostí odporů přívodních kabelů.
- Aby bylo možné *CMR* přístrojů lépe porovnávat provádí se měření odolnosti proti souhl. rušení při:

$$R_a = 0 \, \Omega, R_b = 1 \, \text{k}\Omega$$

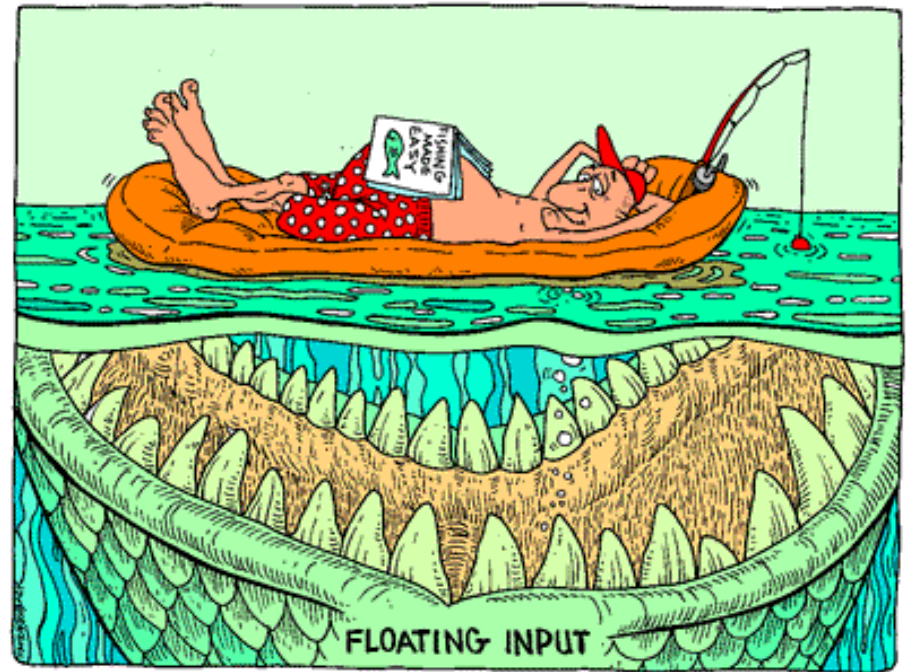
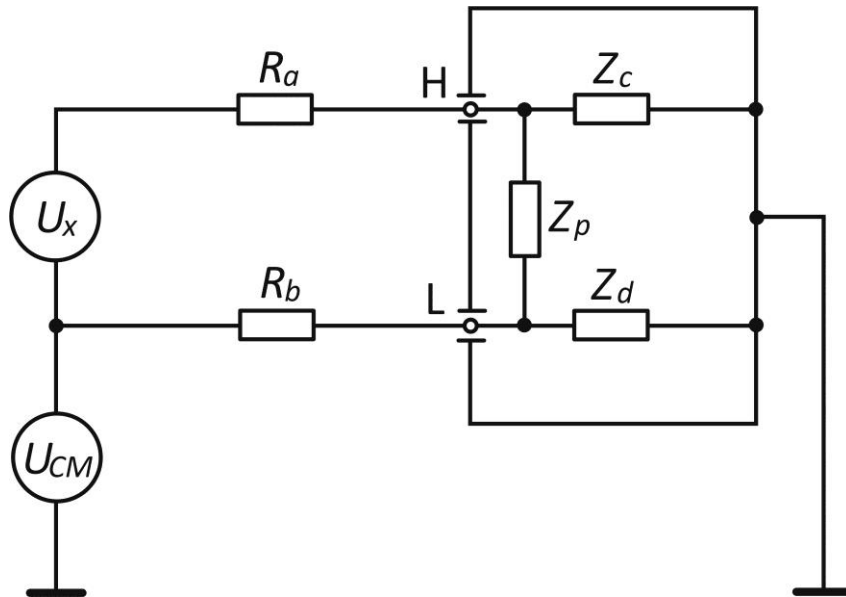


Odolnost DVM vůči vnějšímu rušení

Souhlasné rušení (Common Mode)

Potlačení souhlasného rušení – voltmetry s plovoucím vstupem

Plovoucí vstup = ani jedna ze vstupních svorek není přímo spojena se zemí. Vazební impedance mezi vstupní svorkou a zemí (Z_c, Z_d) jsou velmi vysoké.)



Dosažitelné hodnoty:

$CMR = 100 \text{ dB}$ (pro DC rušení)

$CMR = 60 \text{ dB}$ (pro AC rušení 50Hz)

(http://www.educatorscorner.com/images/cartoon_floatingb-lg.gif)

Odolnost DVM vůči vnějšímu rušení

Souhlasné rušení (Common Mode)

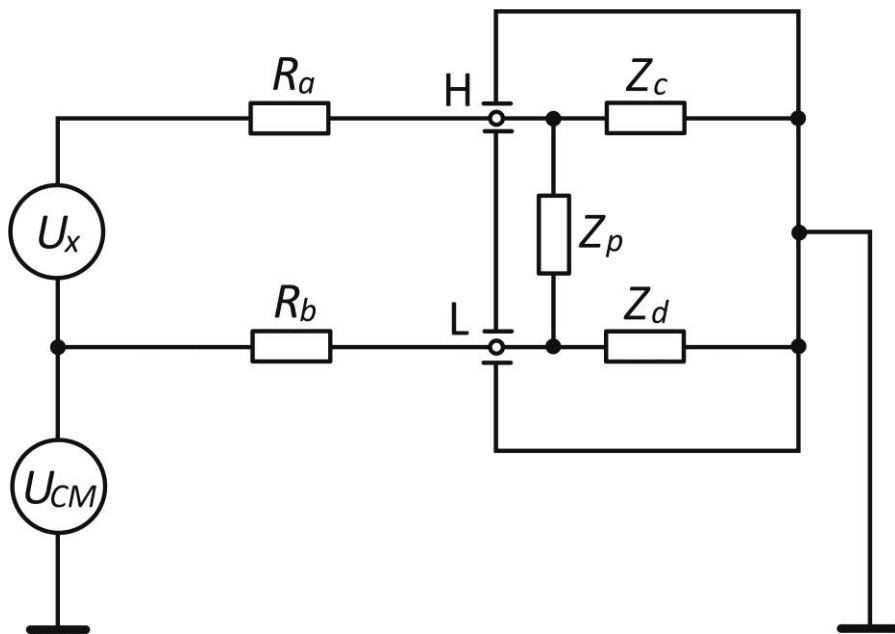
Potlačení souhlasného rušení – symetrizace vstupu

Teoreticky lze vliv souhlasného rušení na voltmetr s plovoucím vstupem snížit vyvážením impedancí.

Pro:

$$\frac{R_i + R_a}{Z_c} = \frac{R_b}{Z_d}$$

je vliv U_{CM} nulový.



R_i ...vnitřní odpor měřeného zdroje

Pozn.: V praxi je toto řešení obtížně realizovatelné.

Odolnost DVM vůči vnějšímu rušení

Souhlasné rušení (Common Mode)

Potlačení souhlasného rušení – voltmetry s plovoucím stíněním

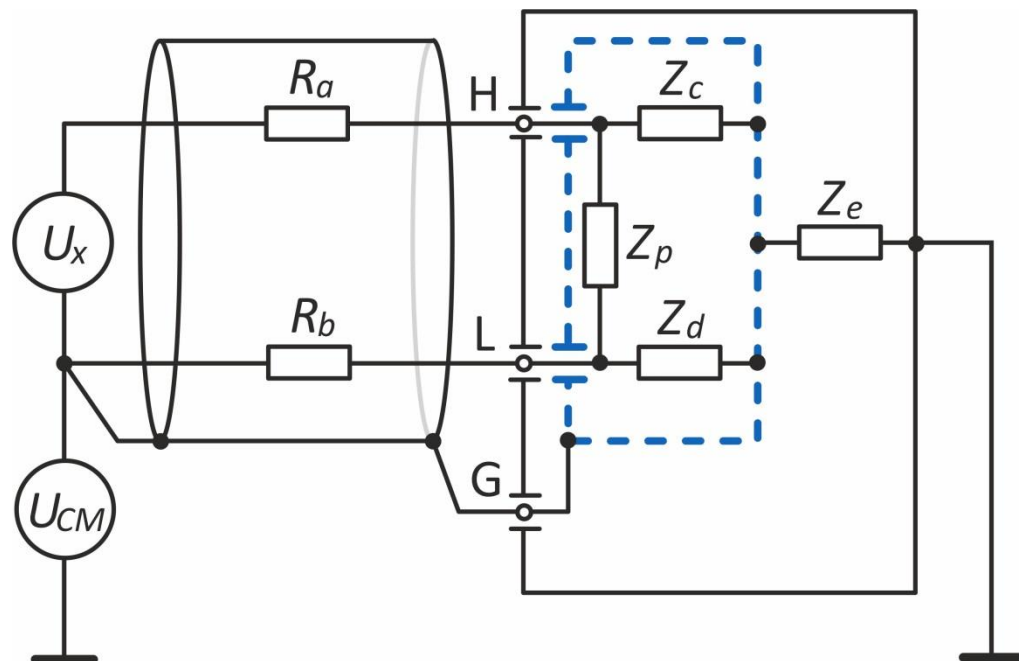
Celá analogová část V-metru je umístěna do vnitřního stínícího krytu. Vazba s digitální částí je zajištěna pouze pomocí optronů a galv. odd. DC/DC měničů.

G...Guard – plovoucí stínění

Dosažitelné hodnoty:

$CMR = 160 \text{ dB}$
(pro DC rušení)

$CMR = 120 \text{ dB}$
(pro AC rušení 50 Hz)



Potlačení souhlasného rušení – bateriové napájení

Bateriové napájení zajistí téměř dokonalou izolaci od země.

(Pozn.: Stále ale zůstává kapacitní vazba mezi přístrojem a zemí.)

Literatura

- [1] Haasz V.: Elektrická měření – přístroje a metody, ČVUT 2018.
- [2] Keysight Technologies: 34401A Digital Multimeter, Data Sheet, April 2020, www.keysight.com
- [3] Hank Zumbahlen: Basic Linear Design, Analog Devices, 2007, www.analog.com
- [4] Analog Devices: Linear Design Seminar, 1995, www.analog.com
- [5] Vedral J., Svatoš J.: Zpracování a digitalizace analogových signálů v měřicí technice, ČVUT, 2018.