Merilna instrumentacija

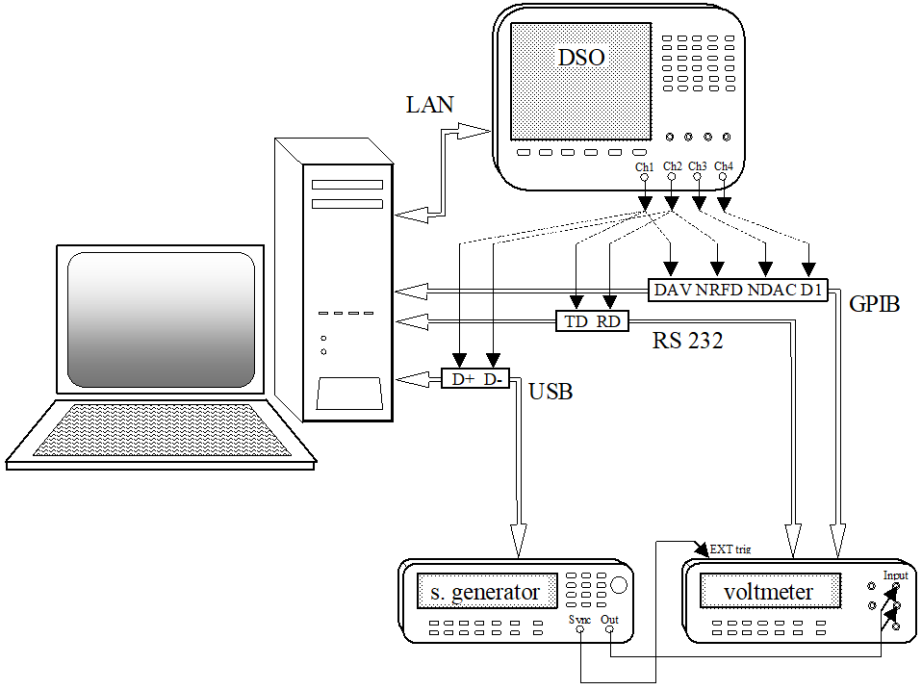
UNI

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

VAJA 4

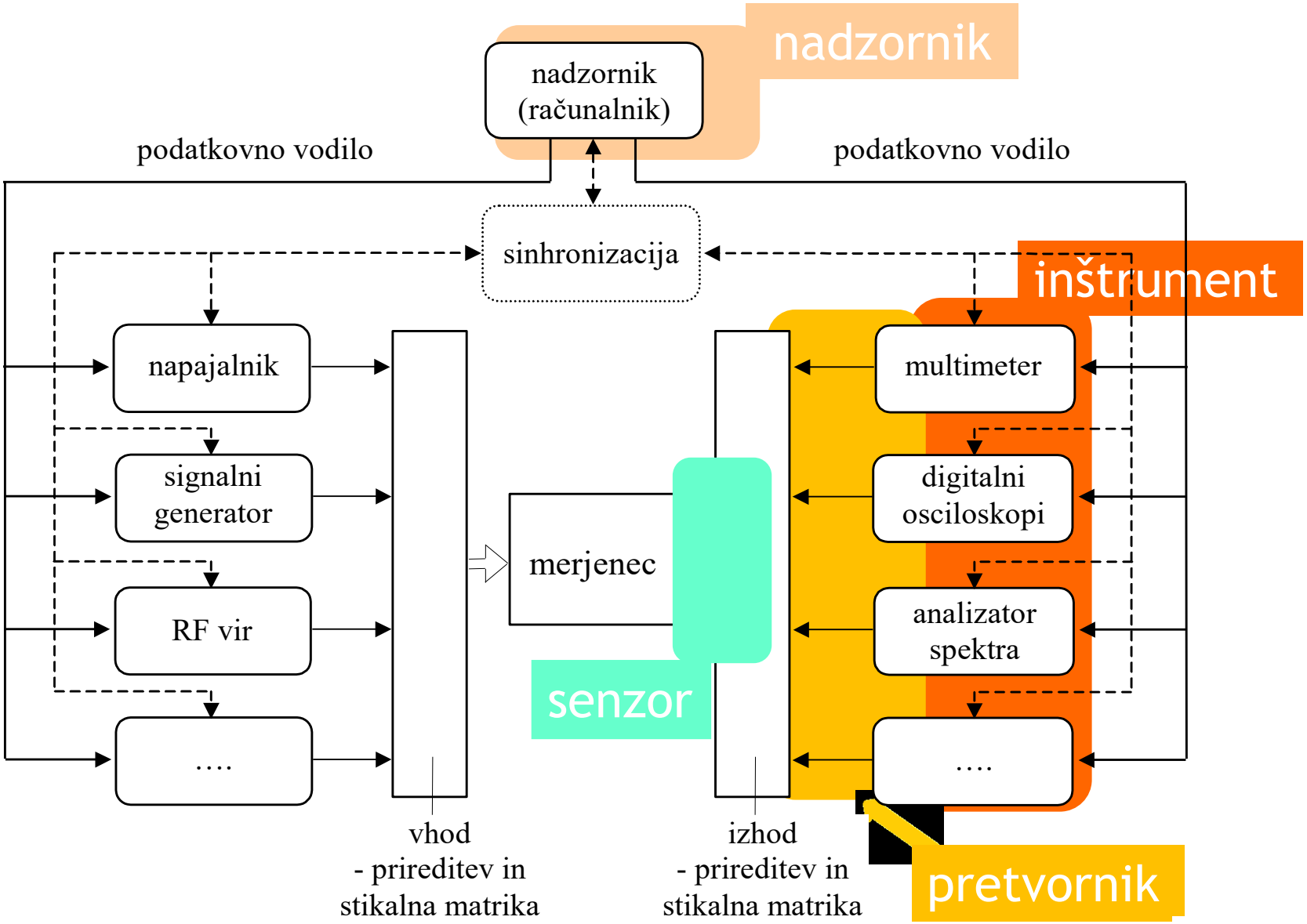
Besedilo naloge

S pomočjo osciloskopa analizirajte delovanje <u>računalniško podprtega merilnega sistema</u> povezanega s procesnimi vodili po standardih <u>RS232, GPIB, USB in LAN</u>. Primerjajte <u>hitrosti prenosa podatkov za RS232 in GPIB</u> vodili pri različnih parametrih delovanja.



rano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merilni sistem



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Vodilo

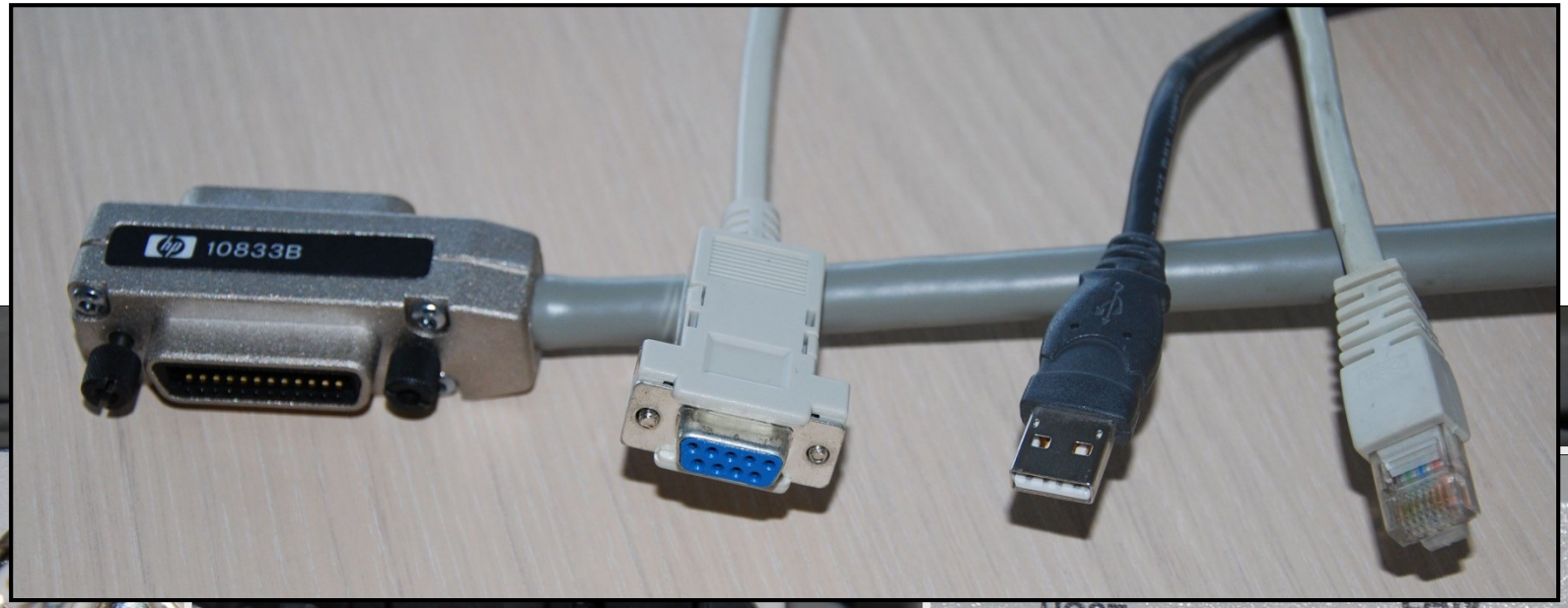
Podatkovna vodila (npr. RS232, GPIB, USB, LAN itd.)

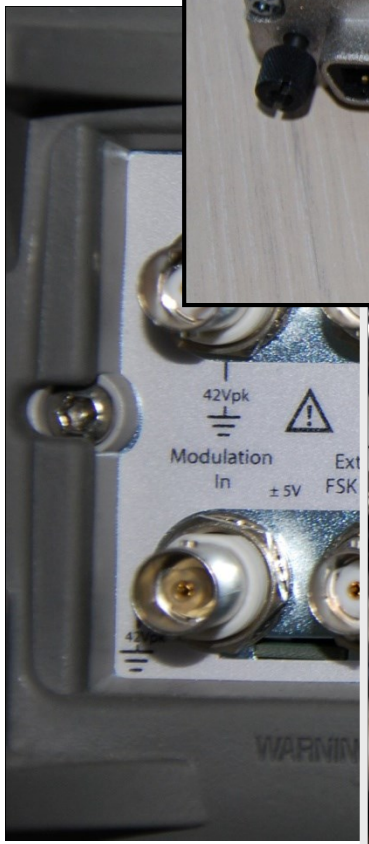
- Povezljivost merilnih členov
- Boljša koordinacijo merjenja
- Omogočajo prenos ukazov, naslovov naprav in podatkov v organizirani obliki

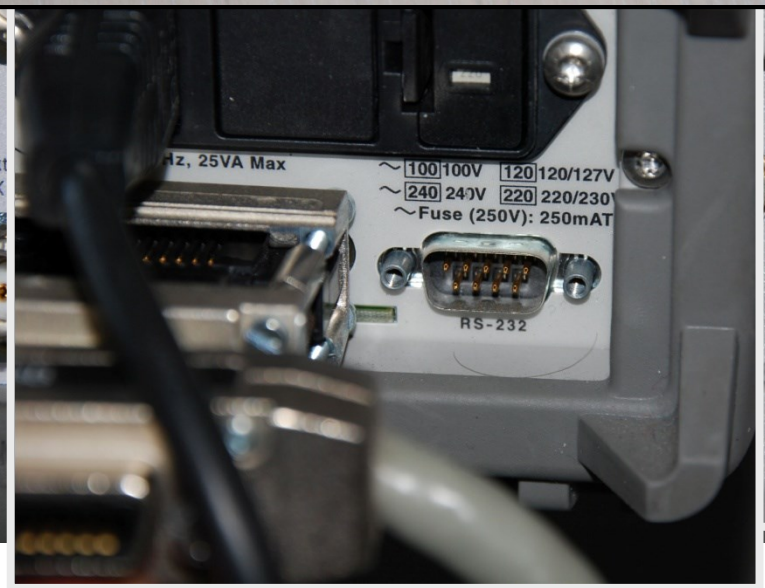
Ločimo:

- serijska vodila, biti znaka se prenašajo **zaporedno** (RS 232 in USB vodilo)

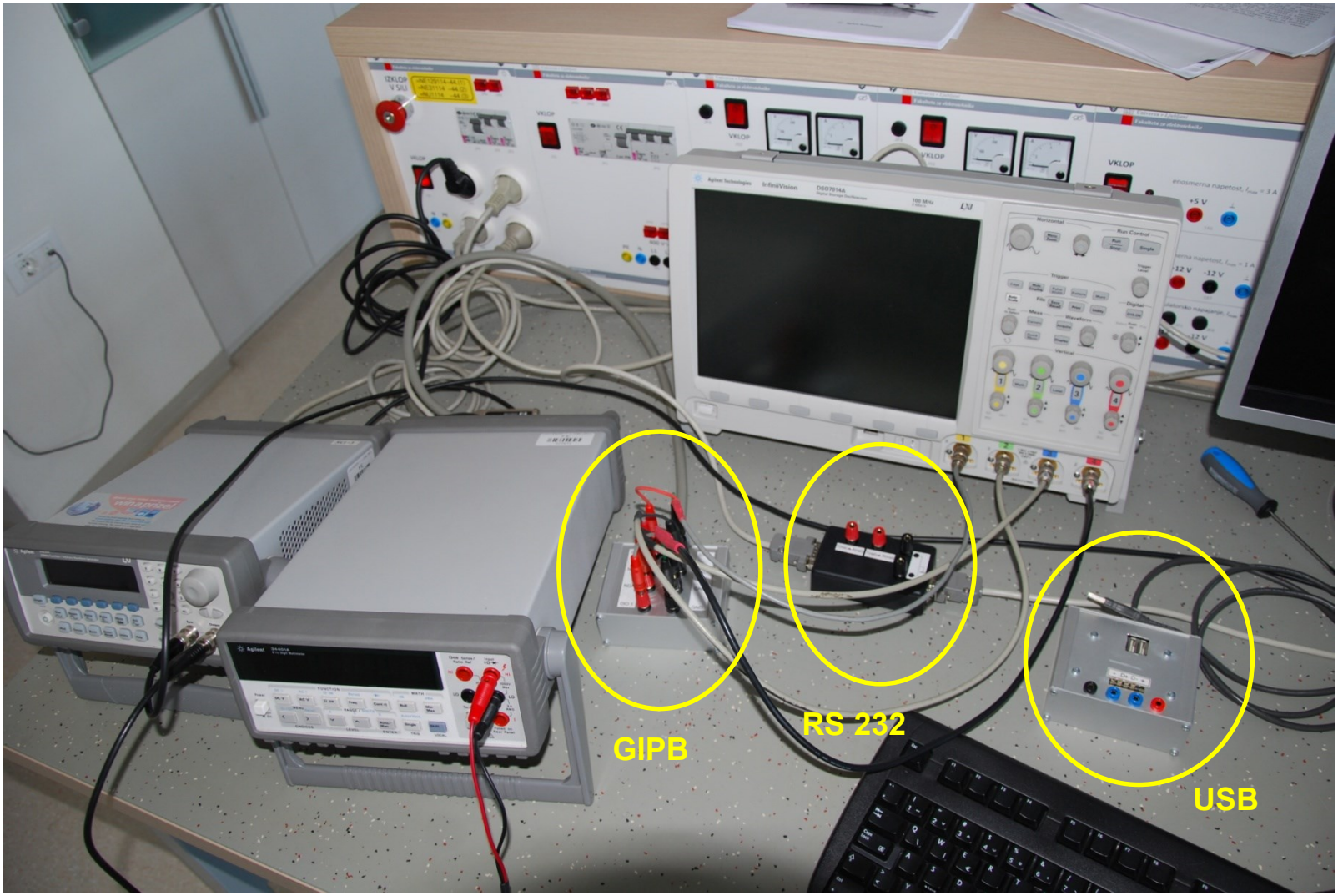
- paralelna vodila, biti znaka se prenašajo **vzporedno** (GPIB vodilo).







LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Standardni jezik za programabilne instrumente SCPI

SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) - programski jezik za programiranje instrumentov (pošiljanje ukazov in branje rezultatov) ne glede na vodilo.

Ukazi so **v obliki ASCII** kodiranih nizov.

***RST**	(postavitev v osnovno stanje)
CONFigure:VOLTage:DC 1V, 0.01	(nastavitev parametrov merjenja)
INITiate;FETCh? (=READ?)	(sprožitev in branje podatkov)

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Dodatek:

a) Vodilo po standardu RS 232
b) Paralelno vodilo GPIB po standardu IEEE 488.2
c) USB vodilo
d) LAN

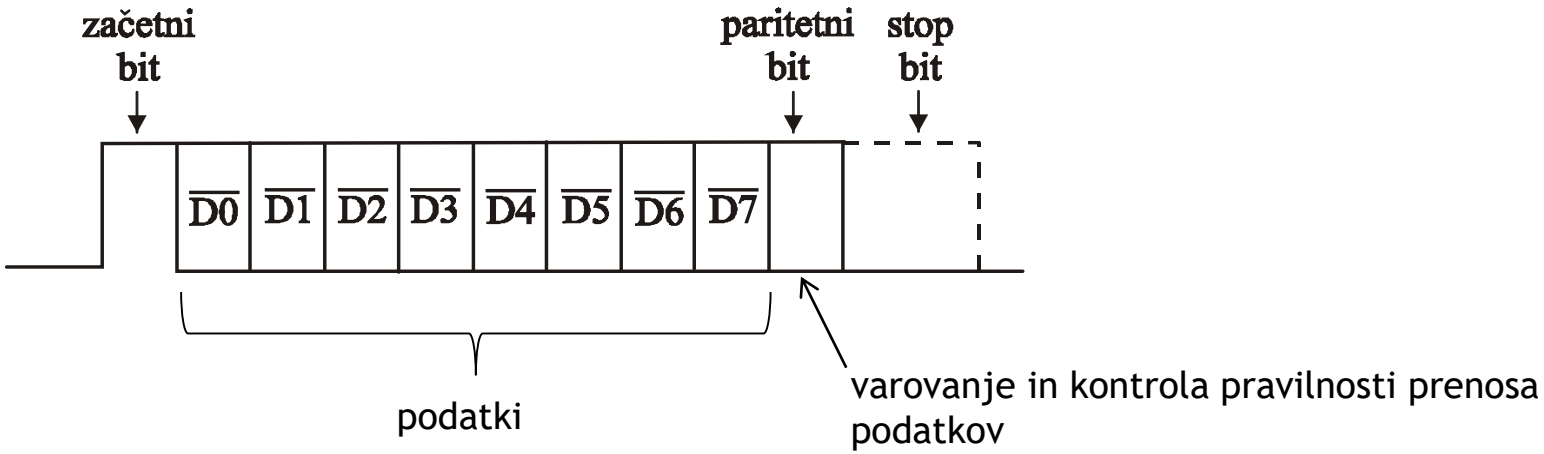
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

a) Vodilo po standardu RS-232

RS - Recommended Standard 232

Na vodilu je naenkrat samo **en par naprav**.

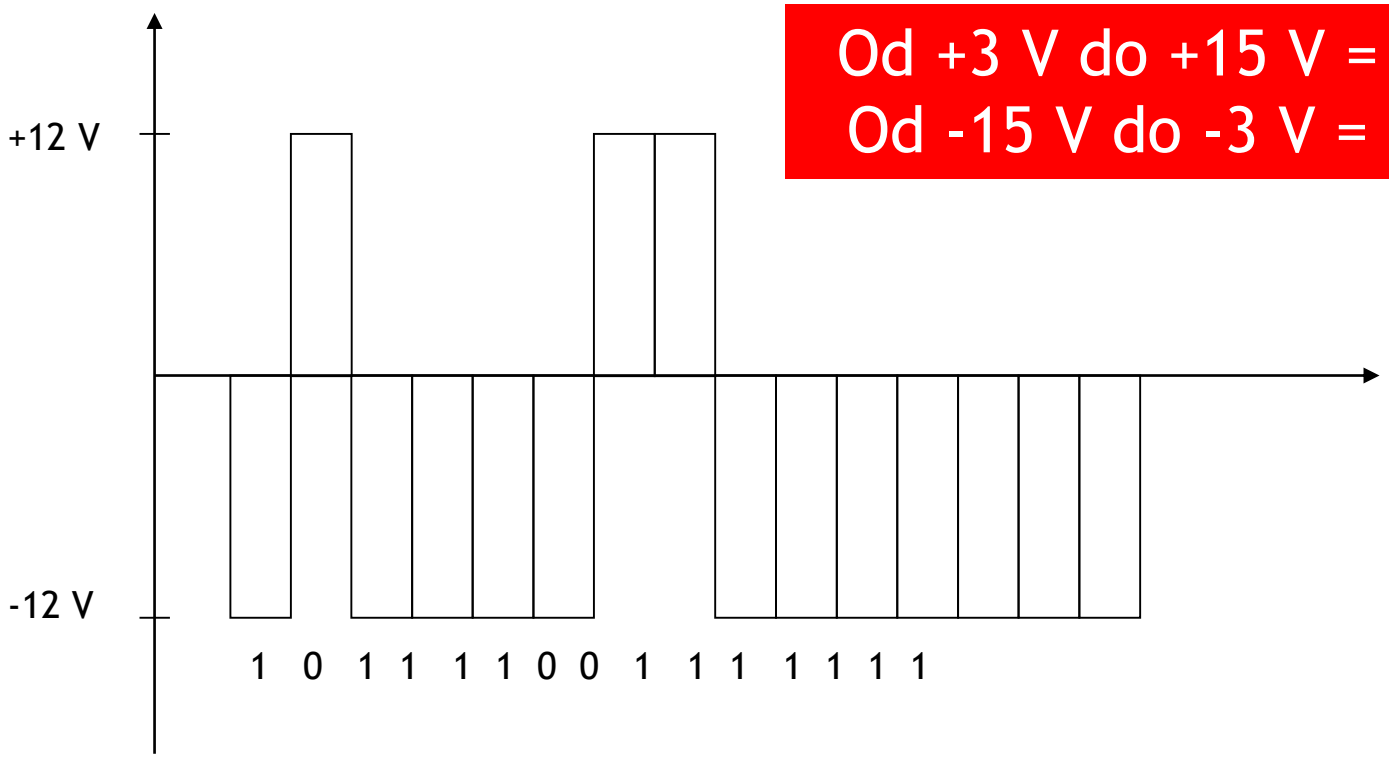
Podatki se lahko prenašajo na tri načine:
- prenos podatkov samo v eni smeri;
- prenos podatkov v obeh smereh, vendar ne istočasno (Half Duplex);
- prenos podatkov v obeh smereh istočasno (Full Duplex).



Dolžina kabla naj ne bo večja kot **15 metrov**.

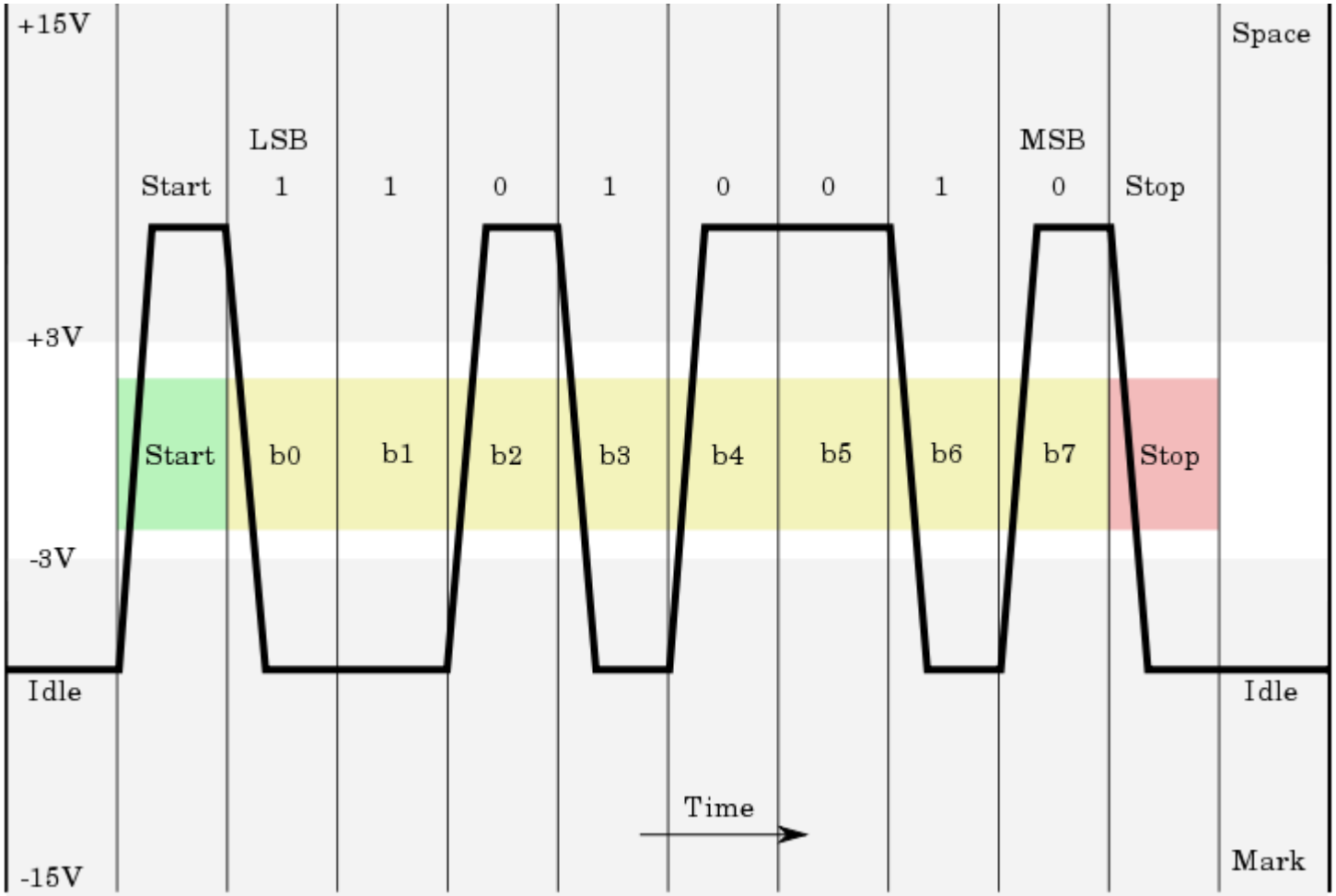
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Podatki po RS-232 vodilu



Od +3 V do +15 V = “0“
Od -15 V do -3 V = “1“

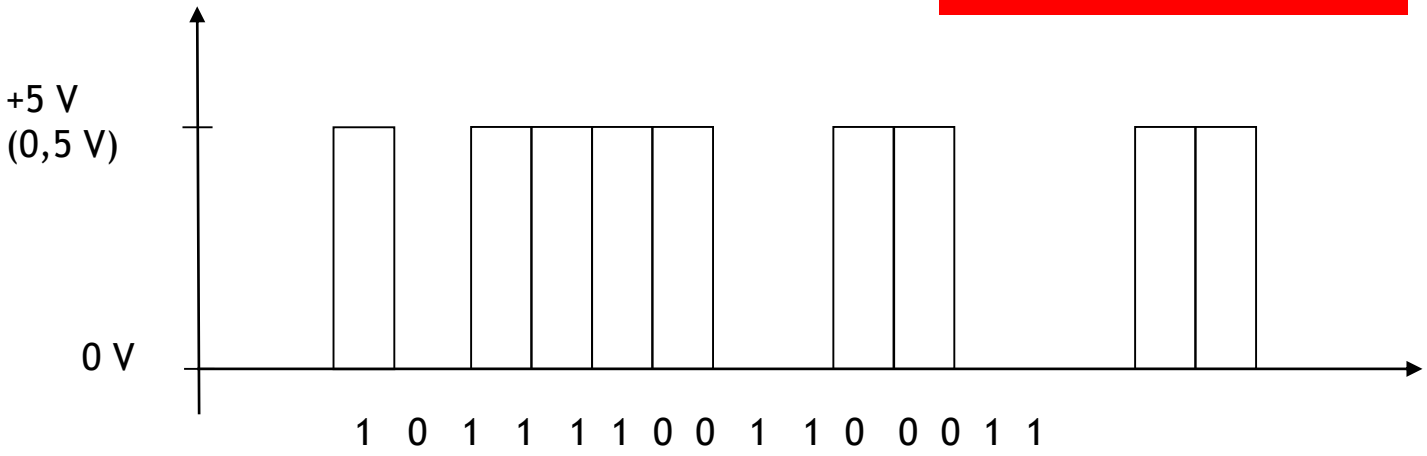
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Podatki po USB vodilu

+ 5 V = “1“
0 V = “0“



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

b) Paralelno vodilo GPIB po standardu IEEE 488.2

GPIB - General Purpose Interface Bus
IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

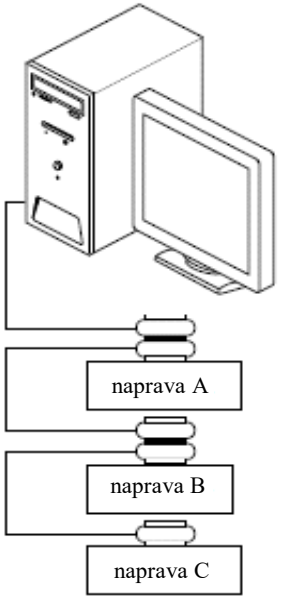
Komunikacijo med napravami omogočajo funkcije:
- oddajnika (talker),
- sprejemnika (listener) in
- nadzornika (controller).

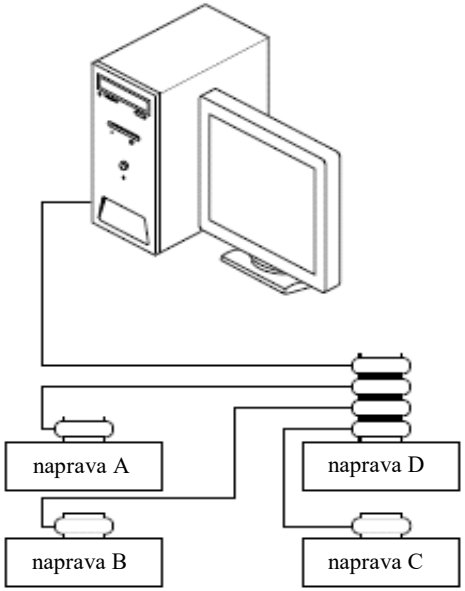
Vsaka svoj naslov oziroma hišno številko.

Največ 15
maksimalna skupna dolžina vodila 20 m (tipično 2 metra med napravama

Prenos podatkov preko vodila je omejen na 1 MB/s, omejena je s hitrostjo najpočasnejše naprave v sistemu.

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.





LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Paralelno vodilo GPIB

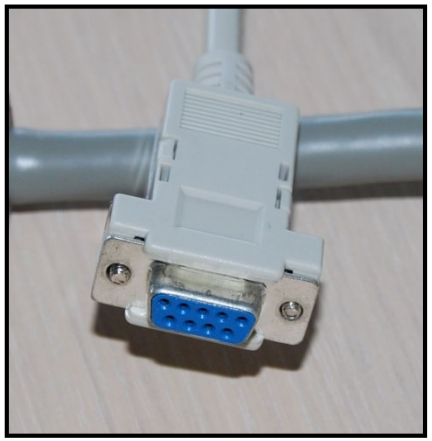
- GPIB vodilo je sestavljeno iz 24 linij, ki si jih delijo vsi priklopljeni instrumenti.
- 16 linij se uporablja za prenos podatkov oziroma za signale, ostalih 8 linij je ozemljitev. Signalne linije so razdeljene v naslednje skupine:
  - 8 podatkovnih linij; 5 linij za nadzor in urejanje vodila; 3 linije za nadzor prenosa podatkov – handshake.

pin	oznaka	Ime signala	pin	oznaka	Ime signala
1	DIO1	Podatki	13	DIO5	Podatki
2	DIO2	Podatki	14	DIO6	Podatki
3	DIO3	Podatki	15	DIO7	Podatki
4	DIO4	Podatki	16	DIO8	Podatki
5	EOI	Podatki	17	REN	Remote Enable
6	DAV	Data Valid	18	GND	DAV ground
7	NRFD	Not Ready For Data	19	GND	NRFD ground
8	NDAC	Not Data Accepted	20	GND	NDAC ground
9	IFC	Interface Clear	21	GND	IFC ground
10	SRQ	Service Request	22	GND	SRQ ground
11	ATN	Attention	23	GND	ATN ground
12	Shield	Chassis ground	24	GND	Signal ground

Meritve

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Rezultati meritev



RS-232

- Slika prenosa enega ASCII znaka (npr.. '0' ali '1').
- Merjenje časa prenosa podatkov izmerjene napetosti:

N	T(skupni) / s
1	
2	
4	
8	
16	
32	
64	
128	

N – število izmerjenih vrednosti napetosti

T(vzorec) – čas prenosa vzorca z N meritvami (10xprenesti, $\bar{X}$, s)

$$T(\text{vzorec})/\text{s} = \frac{T_{N_2\,(\text{npr.}\bar{T}\text{ pri }128)} - T_{N_1\,(\text{npr.}\bar{T}\text{ pri }64)}}{N_2 - N_1}$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Rezultati meritev

GPIB

- Slika prenosa enega ASCII znaka (npr.. '0' ali '1').
- Merjenje časa prenosa podatkov izmerjene napetosti:

N	T(skupni) / s
1	
2	
4	
8	
16	
32	
64	
128	

N – število izmerjenih vrednosti napetosti

T(vzorec) – čas prenosa vzorca z N meritvami (10xprenesti, $\overline{X}$, s)

$$T(\text{vzorec})/\text{s} = \frac{T_{N_2\,(\text{npr.}\overline{T}\text{ pri}128)} - T_{N_1\,(\text{npr.}\overline{T}\text{ pri}64)}}{N_2 - N_1}$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Meritve časov

Skupni čas prenosa podatkov razdelimo v:

- čas prenosa *N* vzorcev po vodilu ($N \cdot T$(vzorec)),

- ostali čas ki ga zahteva merilni sistem (tako programski kot strojni del).

$$T(\text{skupni}) = T(\text{sistem}) + N \cdot T(\text{vzorec})$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Rezultati meritev

Če merimo z različnim številom vzorcev, je čas prenosa vzorcev odvisen od tega števila, ostali čas pa je pogojno konstanten
(npr.: ne sme priti do začasne prekinitev programa zaradi opravil višje prioritete – akcija z miško itd.).

Iz dveh skupnih časov pri različnem številu vzorcev *N* izračunamo čas prenosa enega vzorca z izločitvijo časa *T*(sistem) :

$$T_{N_1}(\text{skupni}) = T(\text{sistem}) + N_1 \cdot T(\text{vzorec})$$

$$T_{N_2}(\text{skupni}) = T(\text{sistem}) + N_2 \cdot T(\text{vzorec})$$

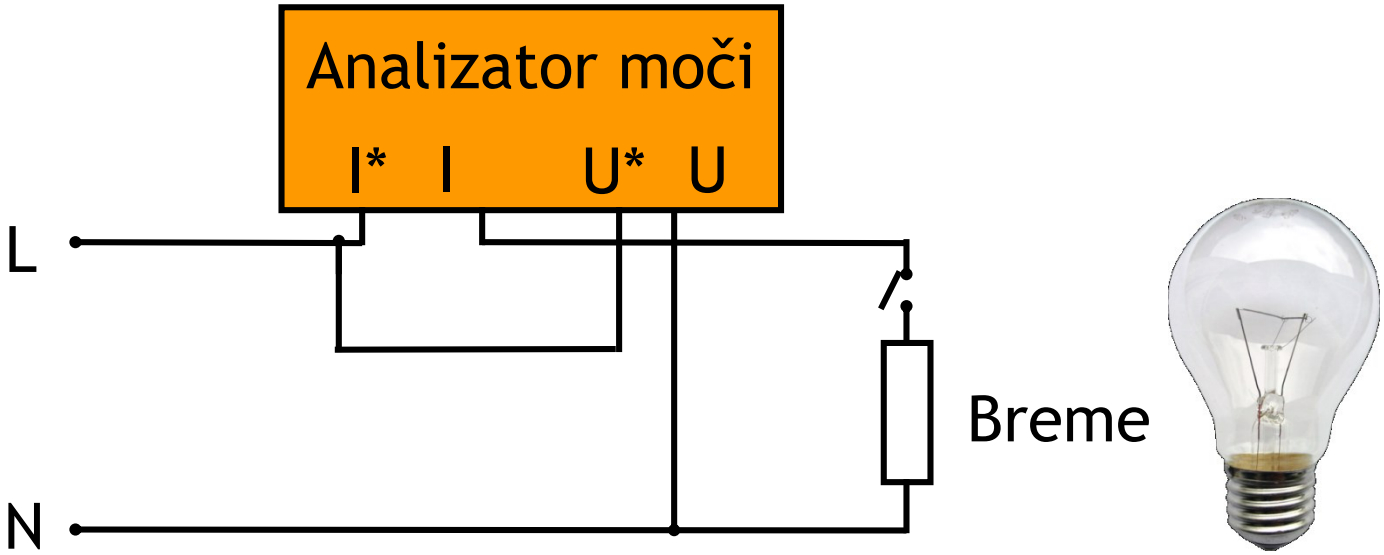
$$T(\text{vzorec}) = \frac{T_{N_2}(\text{skupni}) - T_{N_1}(\text{skupni})}{N_2 - N_1}$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

VAJA 5

Besedilo naloge

Z analizatorjem moči izmerite **faktor moči λ** za različne porabnike. Opazujte časovni potek toka posameznih porabnikov ter določite **faktor popačenja THD_{IEC}**.



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Definicije moči

Trenutna moč $$p = u \cdot i$$

Delovna moč $$P = \overline{p} = \frac{1}{T}\int_0^T ui \, \mathrm{d}t$$

Če sta u in i sinusna $$P = UI \cos\varphi$$

Navidezna moč $$S = UI$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Faktor moči λ

Faktor moči $$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}$$

če sta *u* in *i* sinusna $$\lambda = \cos\varphi$$

Merjenje λ

Omrežna napetost ima ponavadi sinusno obliko.

Če je tok sinusne oblike $\rightarrow$ λ merimo preko φ

Sicer $\rightarrow$ λ merimo preko U_{ef} , I_{ef} in delovne moči

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Negotovost faktorja moči λ

$$u(\lambda) = \frac{M_\lambda}{\sqrt{3}}$$

λ_{izm} odčitamo z analizatorja moči.

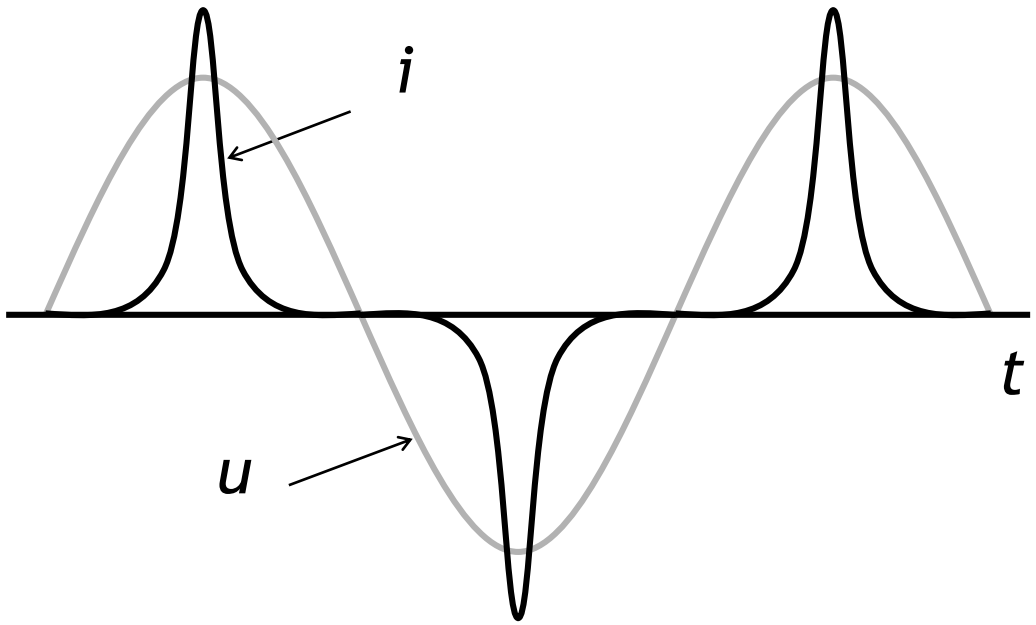
λ=……, $u(\lambda)$=….., n=…….

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Oblika toka skozi breme

Primer toka skozi breme:

(*THD*)



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Oblika toka skozi breme

Popačenost oblike toka

...pomeni odstopanje dejanske oblike od sinusne oblike.

$\Rightarrow$ Faktor popačenja *THD* (Total Harmonic Distortion)

Harmonska analiza (Fourierova vrsta):

$$i(t) = \hat{i}_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \hat{i}_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \ldots + \hat{i}_n \sin(n\omega t + \varphi_n) + \ldots$$

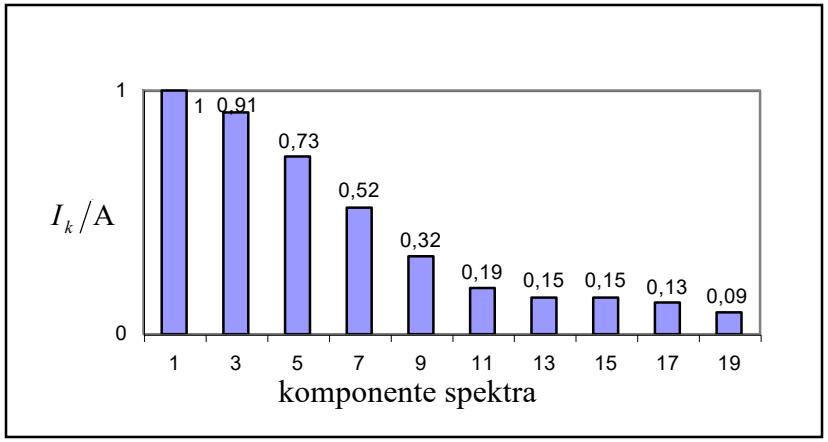
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Oblika toka skozi breme

Popačenost oblike toka

$$THD_{IEC} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{n} I_k^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1}$$

$$THD_{DIN} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I}$$



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

VAJA 6

Besedilo naloge

Izmerite delovno in jalovo moč v trifaznem trivodnem sistemu!

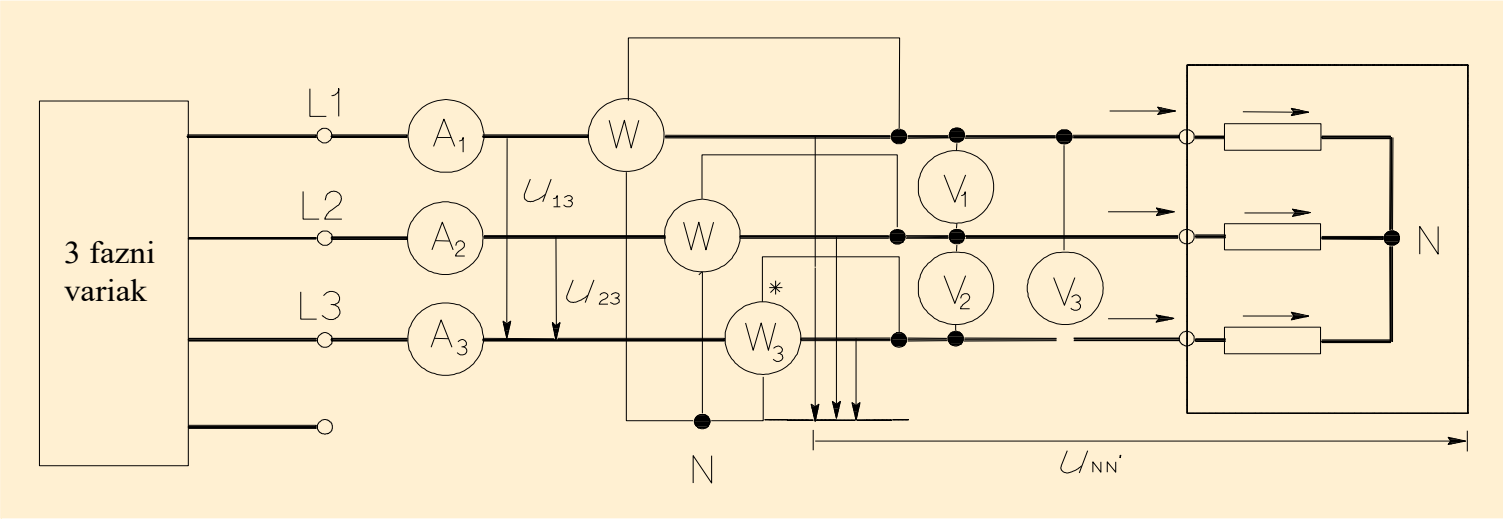
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

VAJA 6

Besedilo naloge

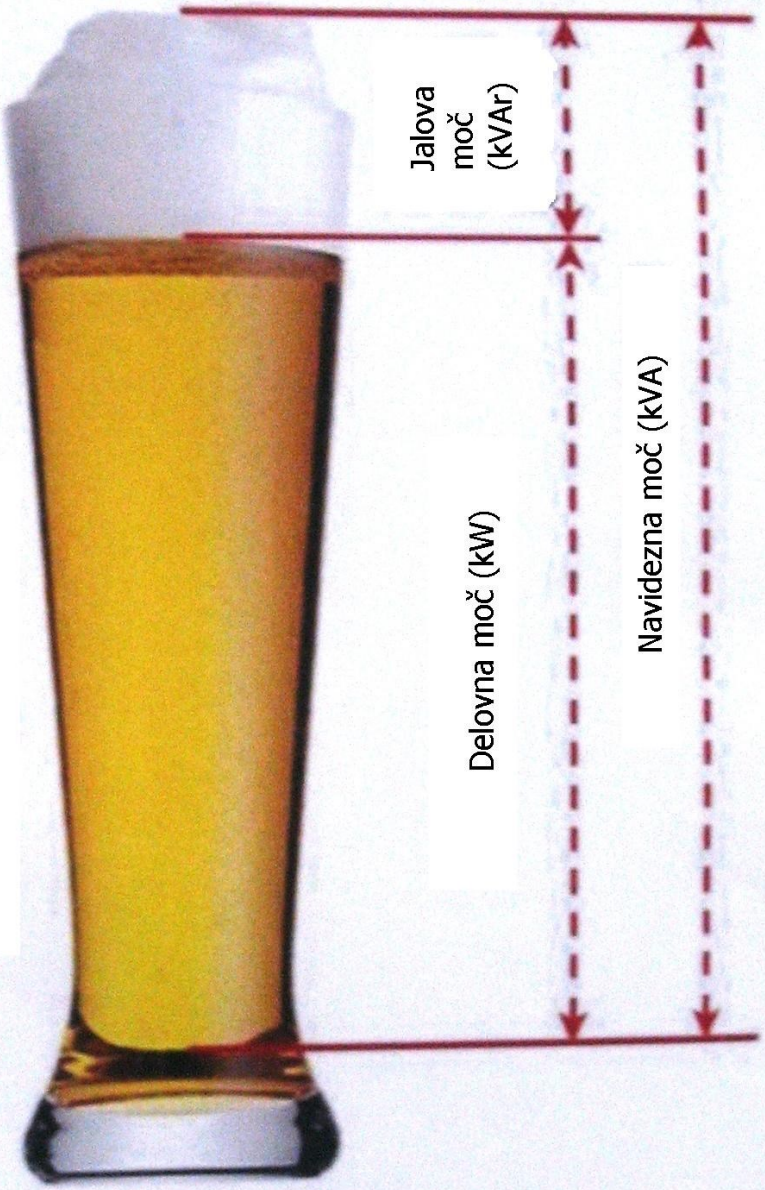
Izmerite delovno in jalovo moč v trifaznem trivodnem sistemu!

Merilno vezje – delovna moč



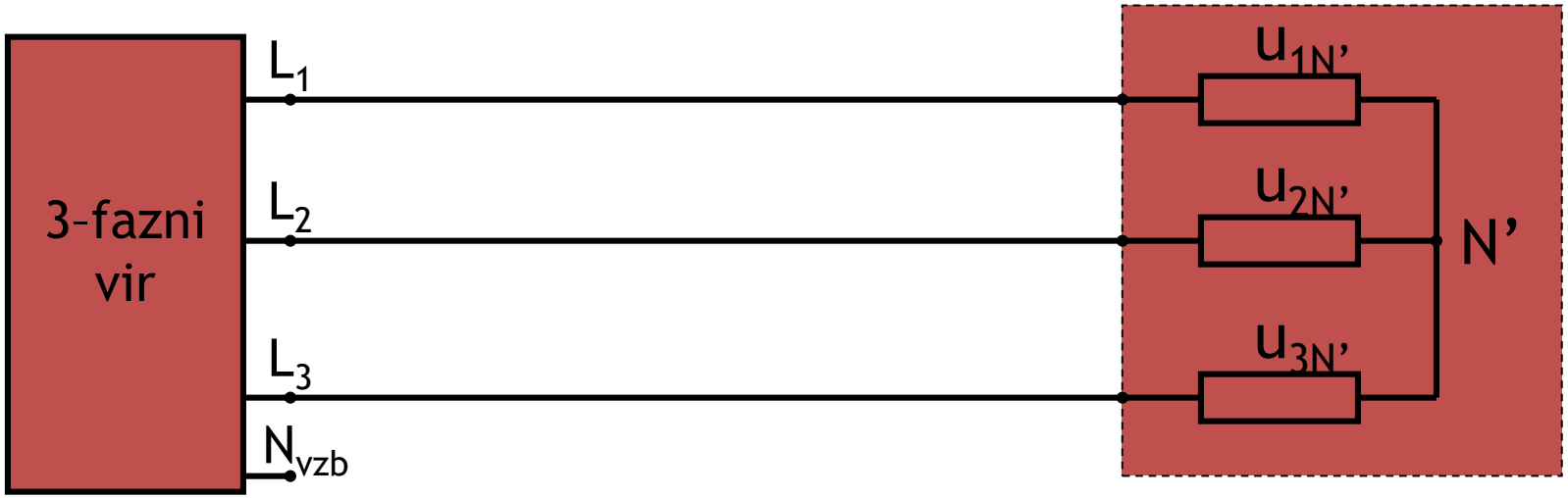
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Končno dobra razlaga, kaj je delovna navidezna in jalova moč, tudi za tiste, ki niso štromarji



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

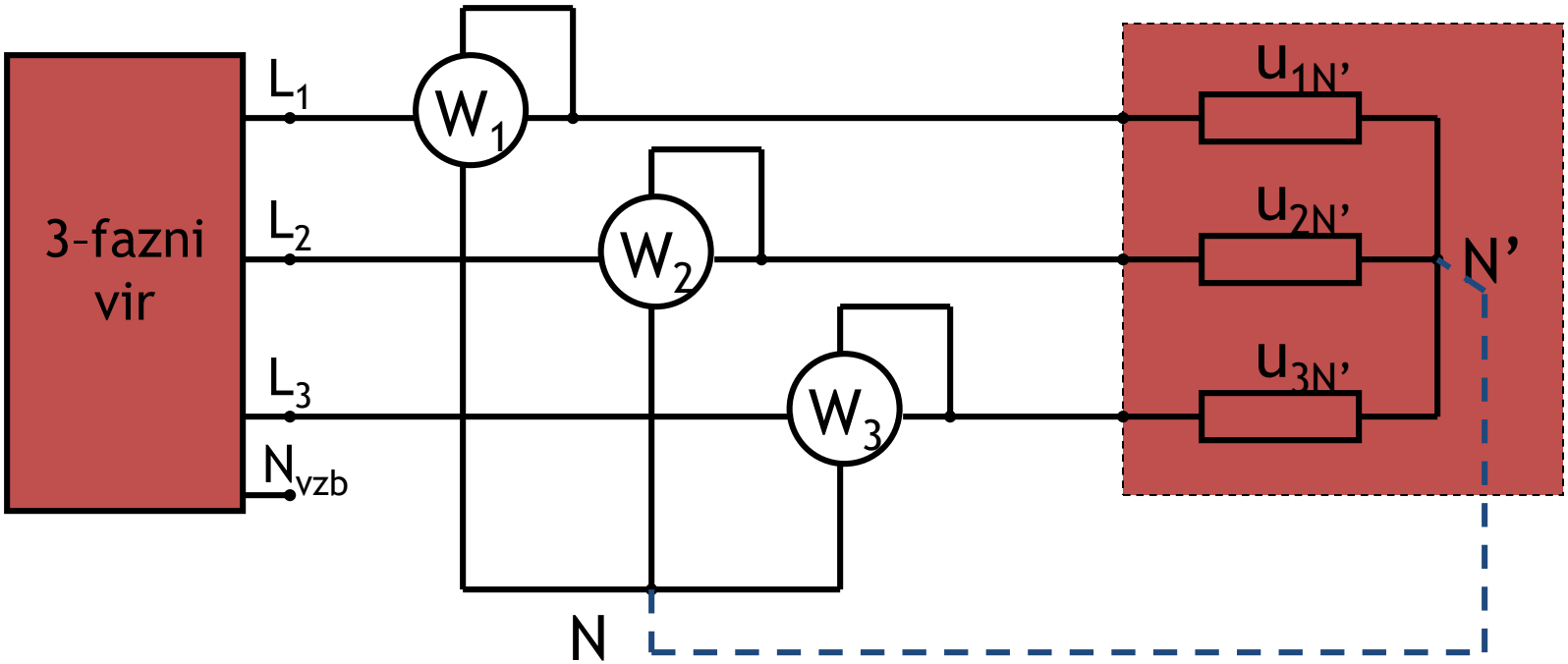
Merjenje delovne moči s tremi vatmetri



$$P = \overline{u_{1N'} \cdot i_1} + \overline{u_{2N'} \cdot i_2} + \overline{u_{3N'} \cdot i_3}$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merjenje delovne moči s tremi vatmetri



$$P = \overline{u_{1N'} \cdot i_1} + \overline{u_{2N'} \cdot i_2} + \overline{u_{3N'} \cdot i_3} = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} \; ?$$

Kaj če $u_{NN'} \neq 0$?

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merjenje delovne moči s tremi vatmetri

$$P = \overline{u_{1N'} i_1} + \overline{u_{2N'} i_2} + \overline{u_{3N'} i_3} = \ldots$$

$$u_{1N'} = u_{1N} + u_{NN'}$$

$$u_{2N'} = u_{2N} + u_{NN'}$$

$$u_{3N'} = u_{3N} + u_{NN'}$$

$$\ldots = \overline{u_{1N} i_1} + \overline{u_{2N} i_2} + \overline{u_{3N} i_3} + \overline{u_{NN'} \cancel{(i_1 + i_2 + i_3)}} \rightarrow 0$$

$$P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}$$

Ne glede, kje je točka N!

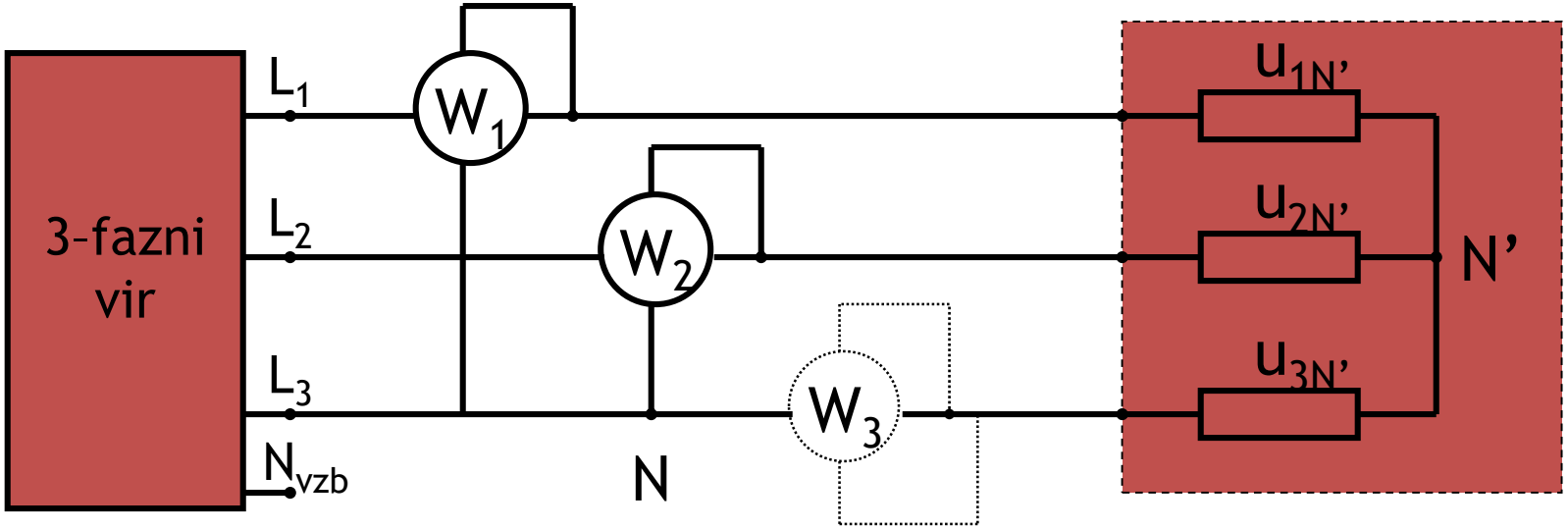
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Kamor koli vežemo skupno točko vatmetrov N, bo VSOTA moči vatmetrov ostala enaka.

$$P = P1 + P2 + P3 = konst$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

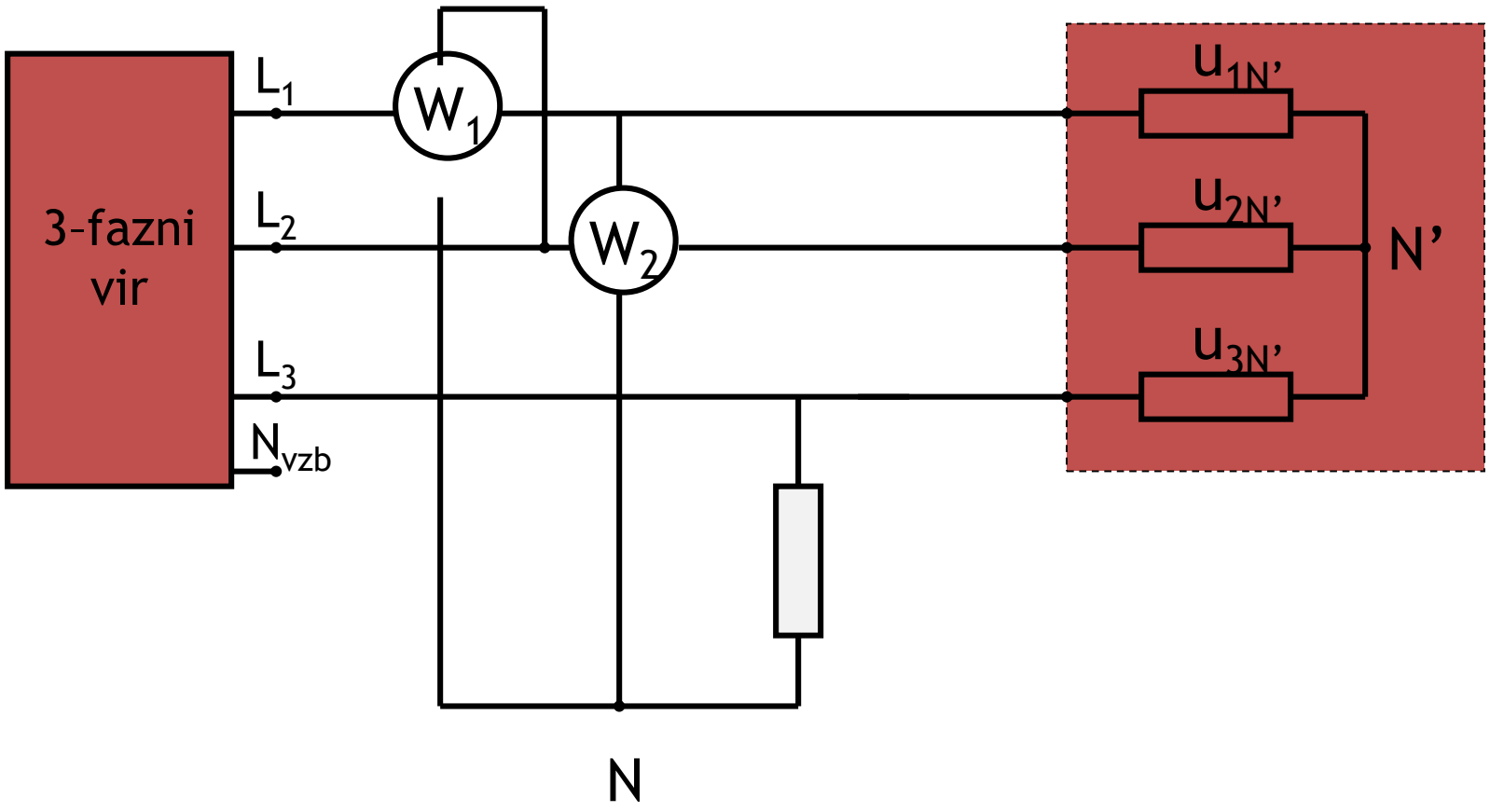
Merjenje delovne moči s tremi vatmetri



Zato sta dovolj le dva vatmetra – ARONOVA VEZAVA.

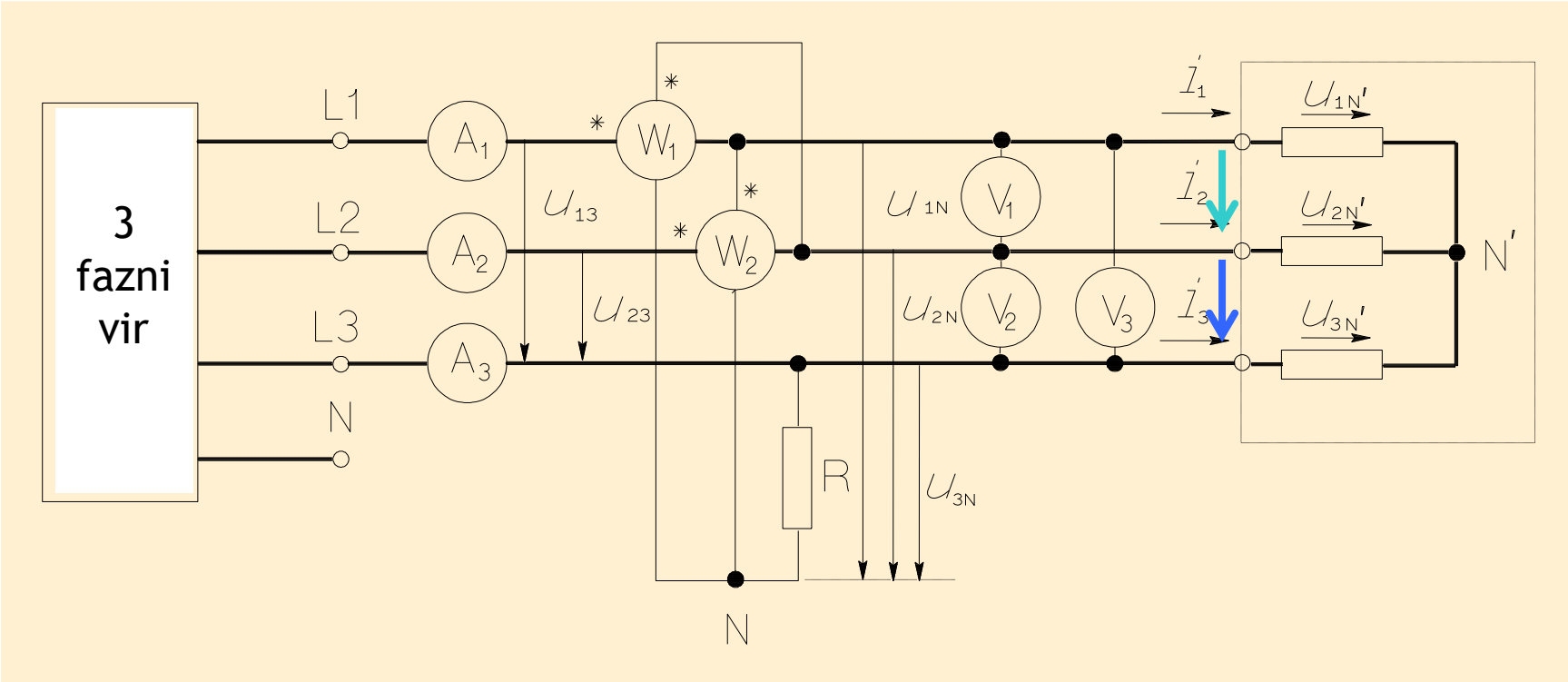
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merjenje jalove moči z dvema vatmetroma in uporom



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merjenje jalove moči z dvema vatmetroma



$$Q = \frac{1}{2}\mathrm{Im}\left\{ \underline{U}_{1N'}\, \underline{I}_1^* + \underline{U}_{2N'}\, \underline{I}_2^* + \underline{U}_{3N'}\, \underline{I}_3^* \right\}$$

$$\underline{I}_3^* = -\left(\underline{I}_1^* + \underline{I}_2^*\right)$$

$$Q = \frac{1}{2}\mathrm{Im}\left\{ \boxed{\left(\underline{U}_{1N'} - \underline{U}_{3N'}\right)} \underline{I}_1^* + \boxed{\left(\underline{U}_{2N'} - \underline{U}_{3N'}\right)} \underline{I}_2^* \right\}$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

b) jalova moč motorja

$$Q = \sqrt{3}\left(P_{\mathrm{W}_1} - P_{\mathrm{W}_2}\right).$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Rezultati

	U_1/	U_2/	U_3/	I_1/	I_2/	I_3/	P_{W1}/	P_{W2}/	P_{W3}/	P/	Q/

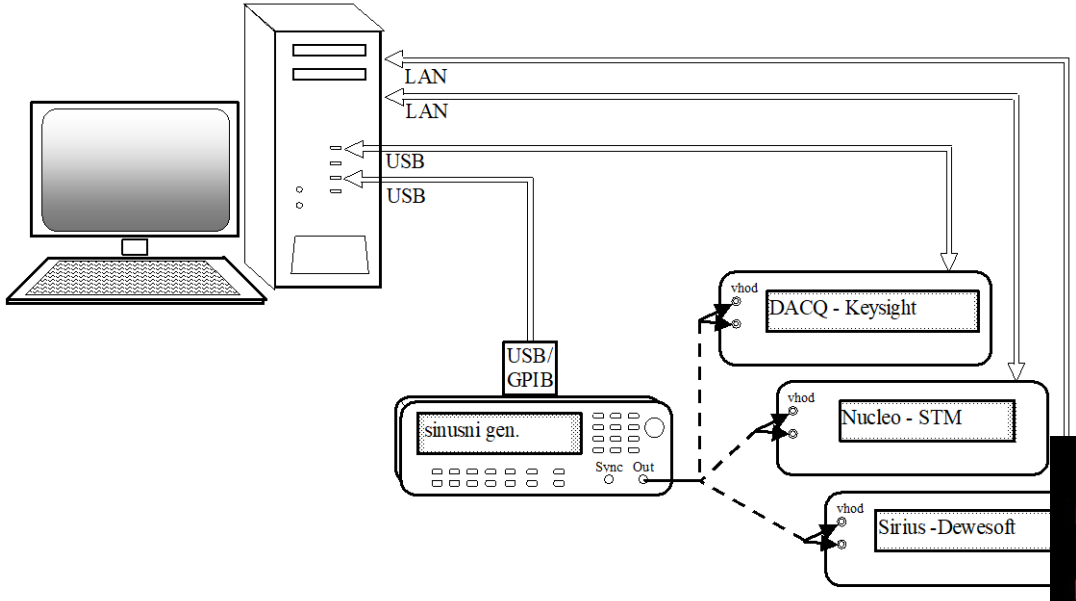
- nevtralna točka na različnih mestih
- fazno zaporedje pri jalovi moči

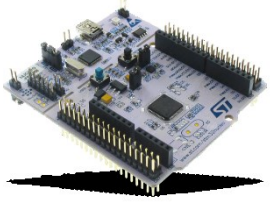
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

VAJA 7

Besedilo naloge

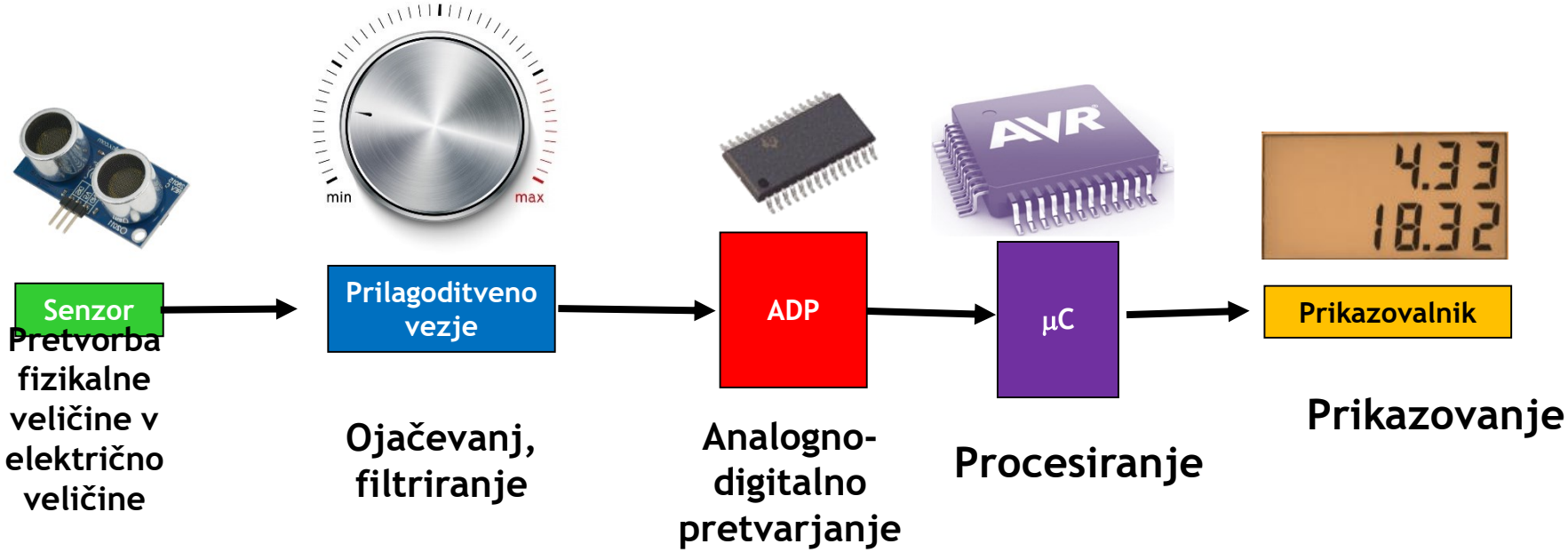
Izmerite in določite efektivno število uporabnih bitov (ENOB –Effective Number Of Bits) vzorčevalnega merilnega kanala za zajemanje signalov, kjer je ključni element analogno-digitalni pretvornik. Preverite spreminjanje ENOB realnega merilnega sistema v odvisnosti od frekvence referenčnega sinusnega signala na vhodu.





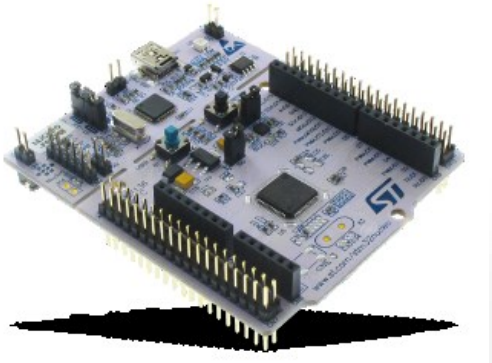
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano

Blokovna shema merilnega instrumenta



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Nucleo F429ZI(STM)
12 bit



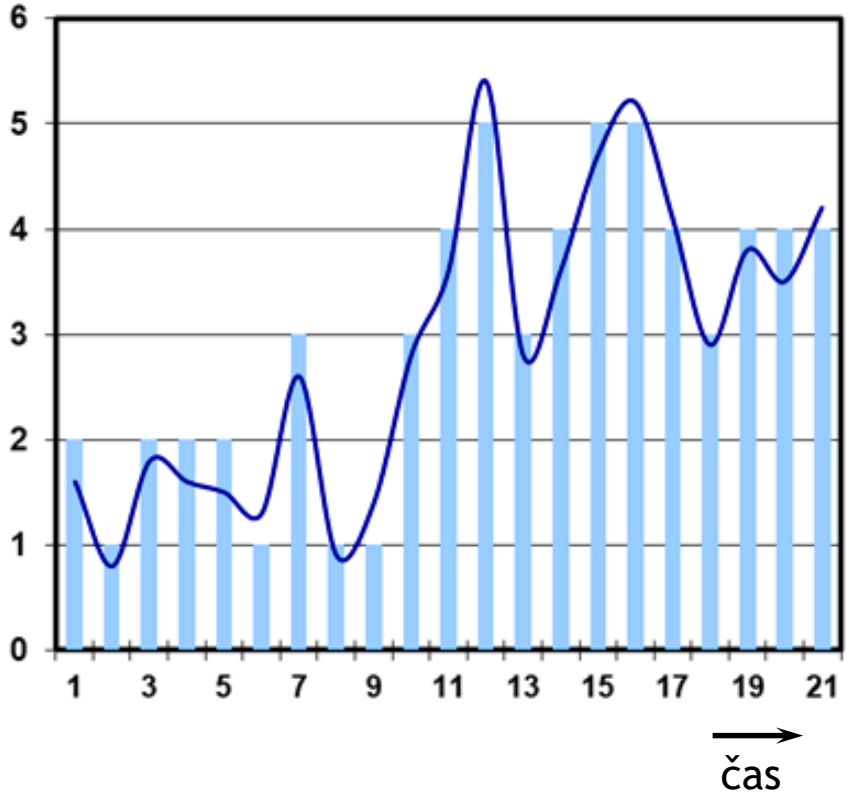
Sirius(Dewesoft)
16 bit

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

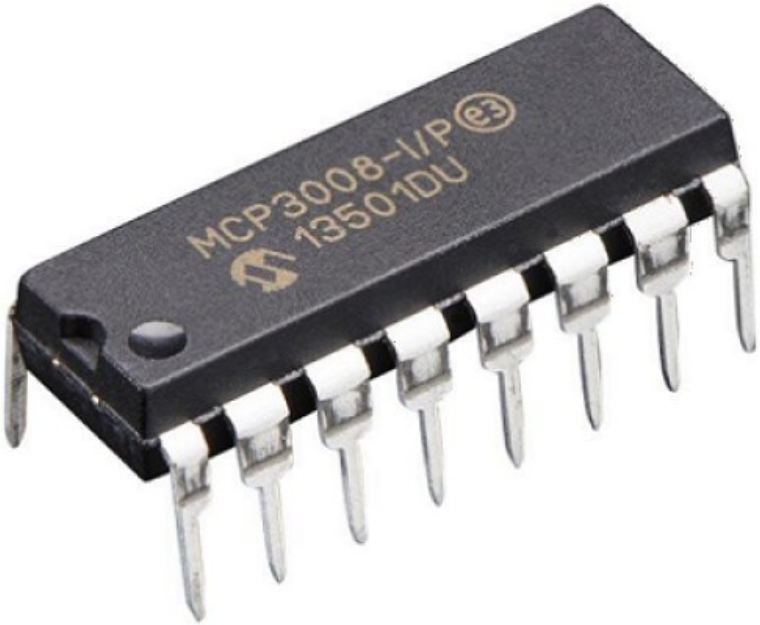
Merjenje signalov

- **Kvantizacija signala:** signal ima samo določene vrednosti
  - Koliko vrednosti – b
- **Vzorčenje signala:** merjenje samo v določenih časovnih intervalih (periodičnih)
  - Frekvenca vzorčenja f_s

Analogni signal (zvezen)
Digitalni signal (diskreten)



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

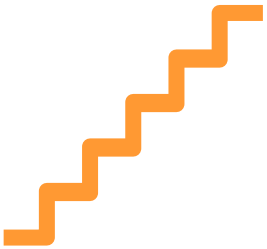


t merilnega sistema je
od števila bitov *b*, ki ga ima
za vzorčenje signalov (DAQ,
ampler, itd)

Nivo = Δ

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

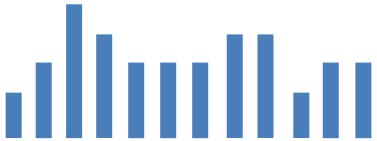
- Kvantizacija signala



Število bitov *b*	Število nivojev
8	256
10	1024
12	4096
16	65 536
24	16 777 216

- Frekvenca vzorčenja f_s

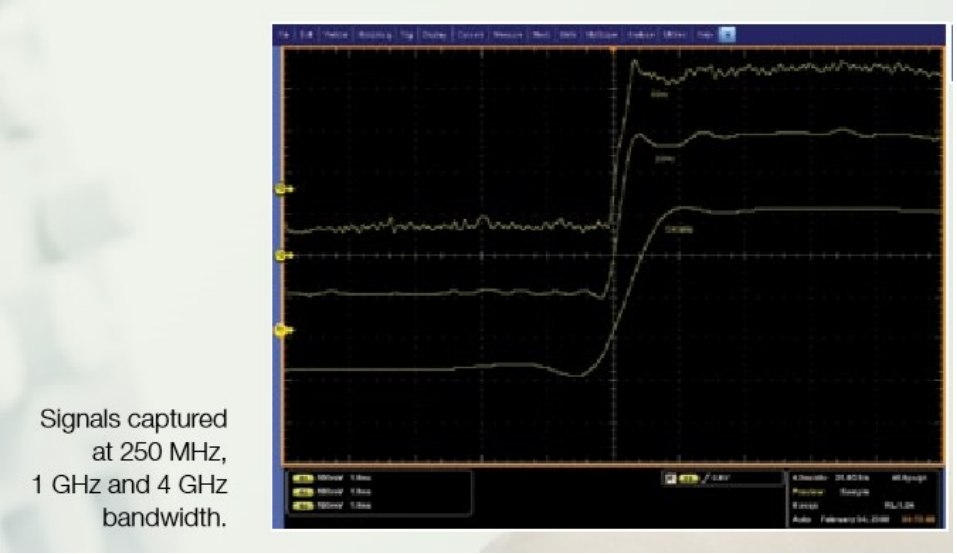
  Odvisna od namena, npr. 0.04 Hz (2/min) do 384 kHz



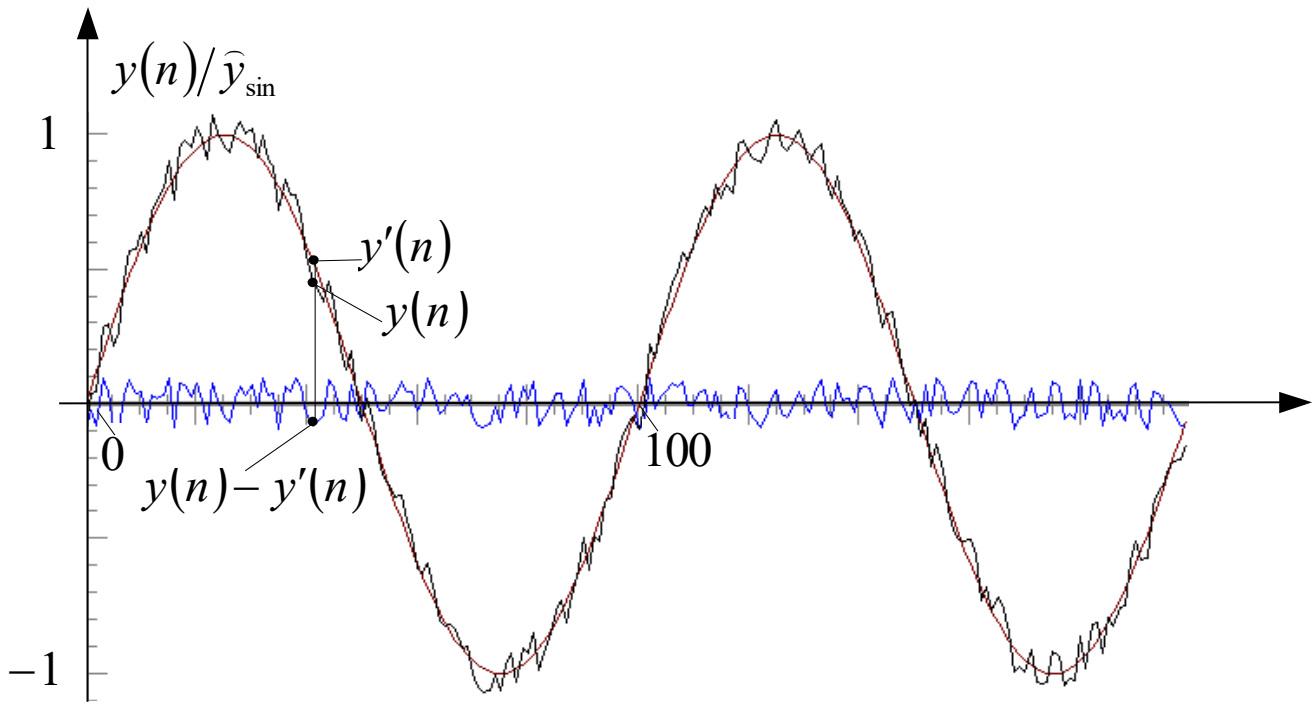
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Tipične frekvence vzorčenja

- Avdio CD
  - 16 bit; 44,1 kHz; PCM
- DVD
  - 16 bit; 48 kHz; PCM
  - 24 bit; 96 kHz; tudi 192 kHz; PCM
- Telefonija
  - 8 bit, 8 kHz
- Osciloskop
  - 8 bit, 1 GS/s do 10 GS/s



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.



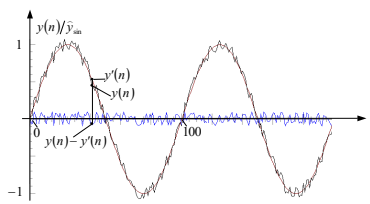
$$E(n) = y(n) - y'(n)$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

$$\sigma_Q = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}} = \frac{U_D}{2^b}\frac{1}{\sqrt{12}}$$

efektivna vrednost kvantizacijskega pogreška

$$\mathrm{NAD} = \sqrt{\frac{1}{N}E^2(n)} = \sqrt{\frac{1}{N}\left(y(n)-y'(n)\right)^2}$$



NAD - efektivna vrednost realnega šuma in popačenja vzorčenja (Noise And Distortion)

NAD sestavljata dva bistvena prispevka: **šum** (posledica kvantizacije in naključnega šuma) in **popačenja** (posledica nelinearnosti merilnih pretvornikov).

$$\mathrm{ENOB} \le b$$

$$\mathrm{ENOB} = b - \log_2\left(\frac{\mathrm{NAD}}{\sigma_Q}\right) = \log_2\left(\frac{U_D}{\mathrm{NAD}\cdot\sqrt{12}}\right)$$

ENOB - efektivno število uporabnih bitov

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

$$\mathrm{SINAD} = \frac{A_{\sin}}{\sqrt{2} \cdot \mathrm{NAD}}$$

SINAD (Signal-to-Noise And Distortion ratio) = razmerje med signalom in (šum+popačitve)

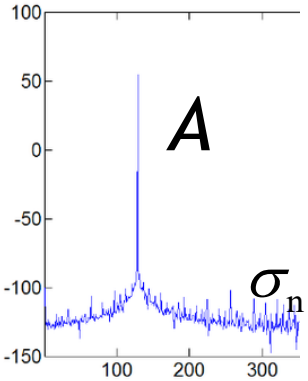
kvaliteta čistosti sinusnega signala

$$\mathrm{THD}_{\mathrm{IEC}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H} Y_h^2}}{Y_1} = \frac{\sqrt{Y^2 - Y_1^2}}{Y_1}$$

THD faktor popačenja (Total Harmonic Distortion) - ocena harmonskega popačenja sinusnega signala

$$\mathrm{SNR} = \frac{A_{\sin}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{\mathrm{n}}} = \sqrt{\mathrm{NAD}^2 - Y_{\sin}^2 \cdot \mathrm{THD}^2}$$

SNR - razmerje signala proti šumu (Signal to Noise Ratio)
- čisti sinus proti ef. šumu

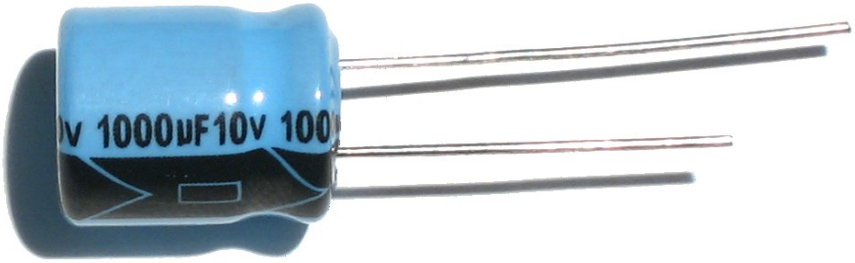


LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

VAJA 8

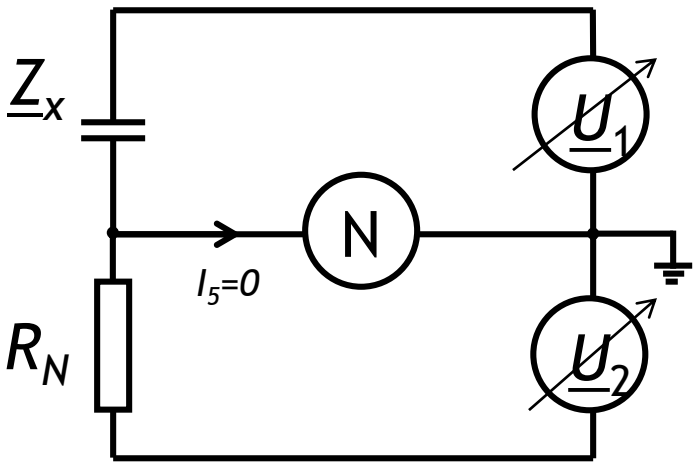
Besedilo naloge

Izmerite impedanco (C_x,d_x) z **aktivnim izmeničnim mostičem** v odvisnosti od frekvence.



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Princip merjenja Z_X



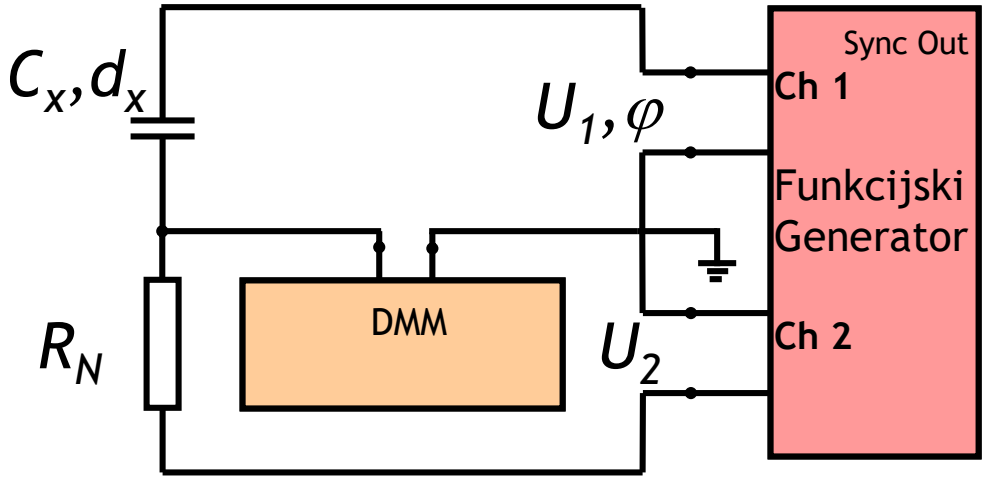
$$\frac{\underline{Z}_x}{\underline{Z}_R} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} \qquad \Rightarrow \underline{Z}_X = R_N \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = R_N \frac{U_1}{U_2} e^{j\varphi}$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

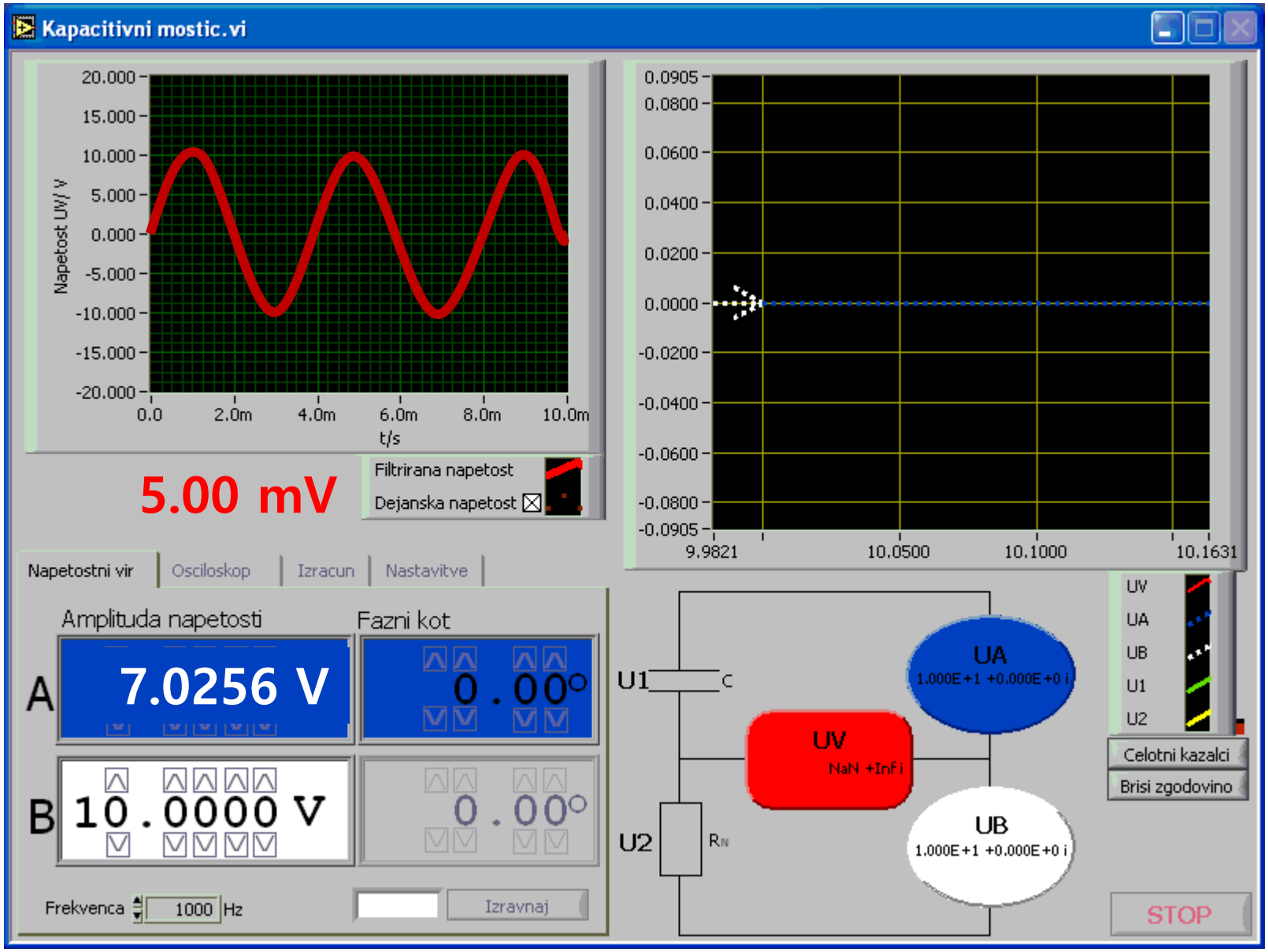
VAJA 8

Besedilo naloge

Izmerite impedanco (C_x,d_x) z **aktivnim izmeničnim mostičem** v odvisnosti od frekvence.



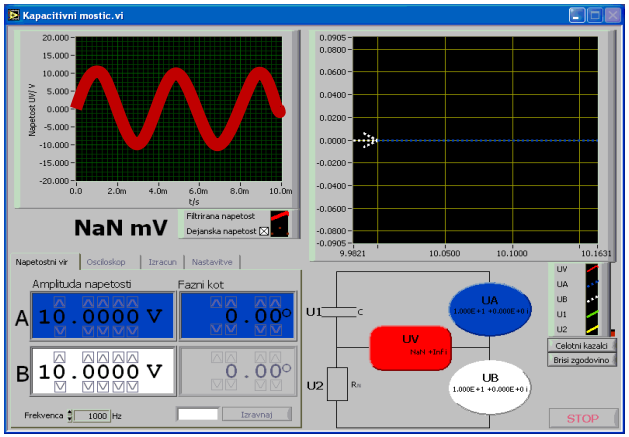
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.



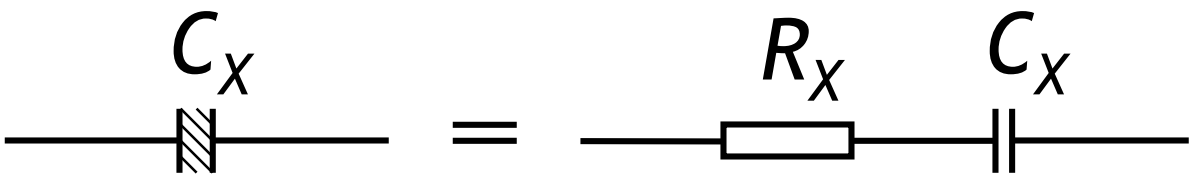
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

$$C_X = \frac{U_2}{R_N U_1 \omega} \frac{1}{\sin \varphi}$$

$$\Rightarrow R_X = R_N \frac{U_1}{U_2} \cos\varphi$$



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.



$$\underline{Z}_X = R_X + \frac{1}{j\omega C_X} = R_N \frac{U_1}{U_2}(\cos\varphi + j\sin\varphi)$$

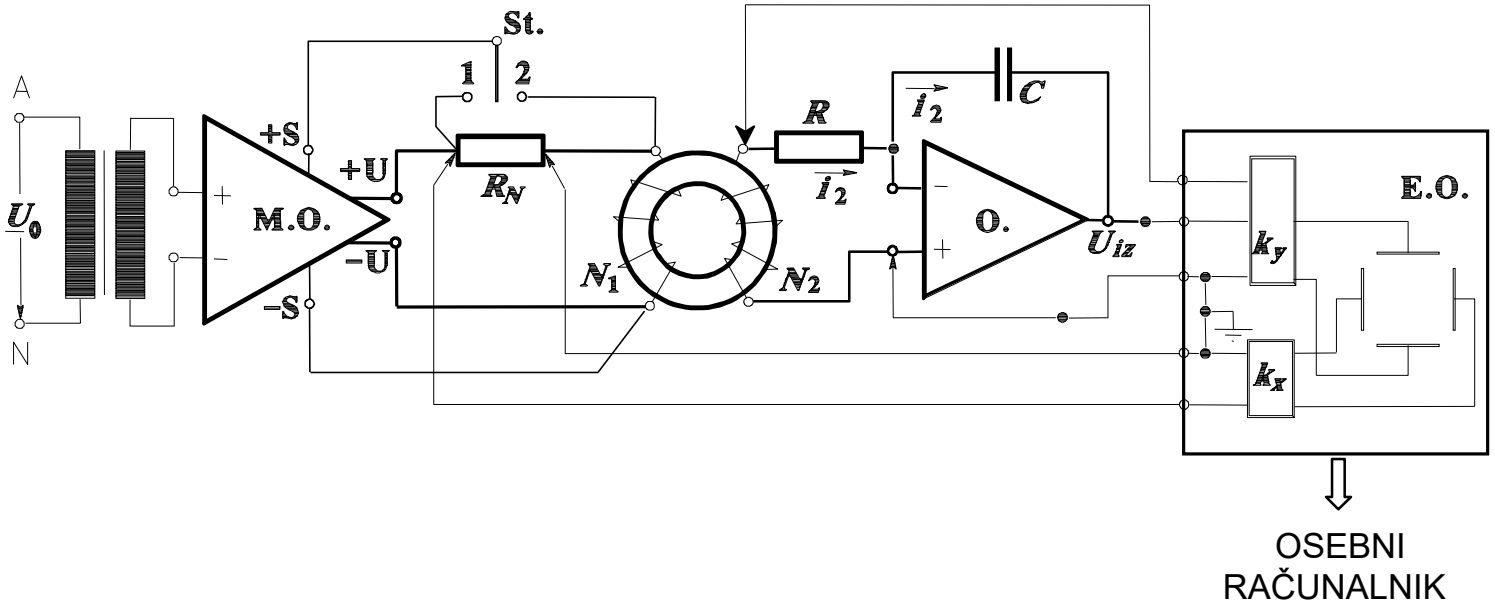
$$d_X = \frac{R_X}{\omega C_X} = \frac{1}{\tan\varphi}$$

Faktor izgub

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

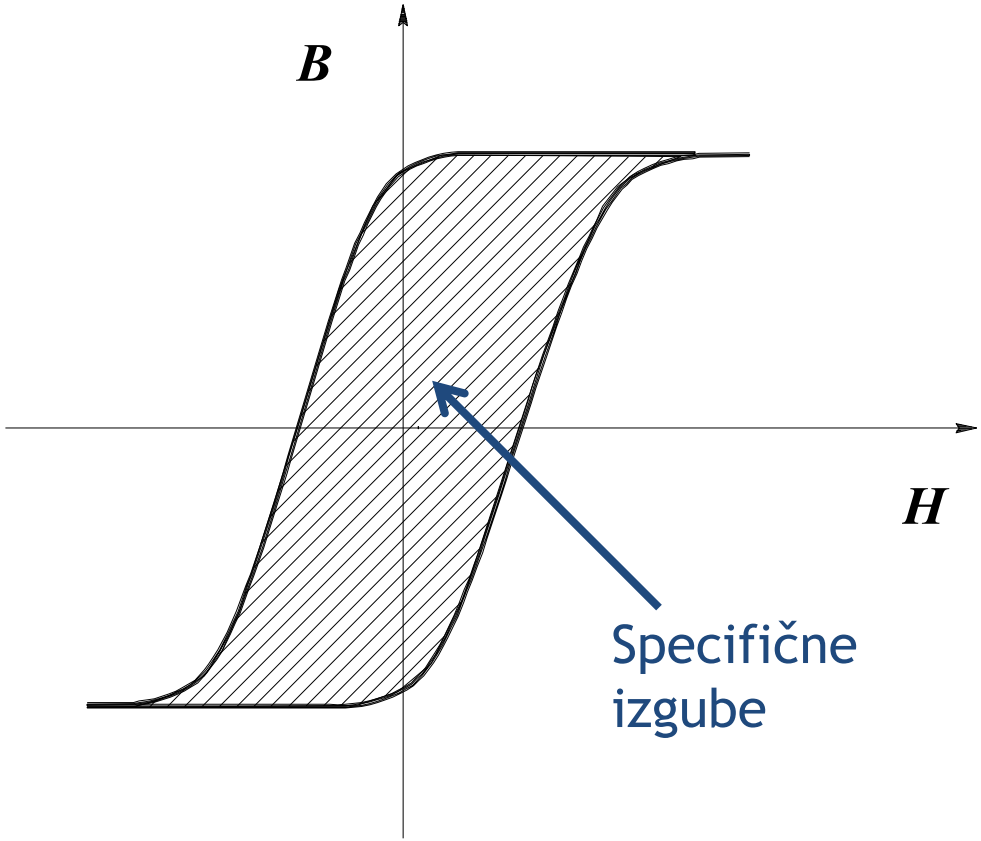
VAJA 9

Izmerite dinamično histerezno zanko feromagnetnega toroidnega jedra z elektronskim osciloskopom in podajte specifične izgube za sinusno obliko gostote magnetnega pretoka *B*.



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Dinamična histerezna zanka feromagnetnega toroidnega jedra



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

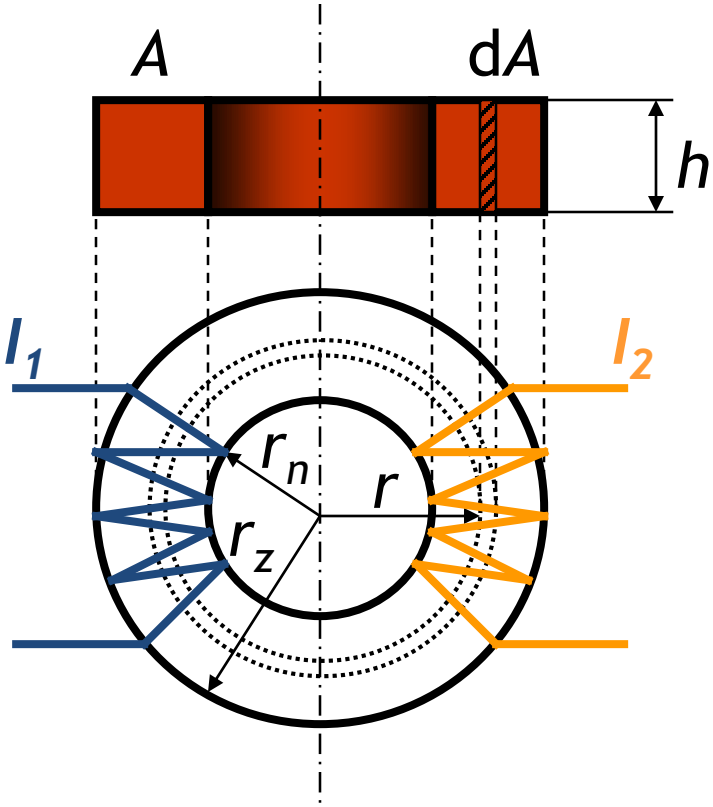
Specifične izgube feromagnetika P_S

Specifične izgube feromagnetika P_S so podane kot razmerje moči, potrebne za magnetenje feromagnetika, in njegove mase

$$P_s = \frac{P_{\mathrm{Fe}}}{m}$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merjenje jakosti magnetnega polja *H*



$$\oint H_r \, ds = i_1 N_1 - i_2 N_2 \approx i_1 N_1$$

$$i_2 \approx 0$$

$$\Rightarrow \quad H = \frac{i_1 N_1}{l_{sr}} = k \cdot i_1$$

$$l_{sr} = 2\pi \frac{r_z - r_n}{\ln\left(r_z / r_n\right)}$$

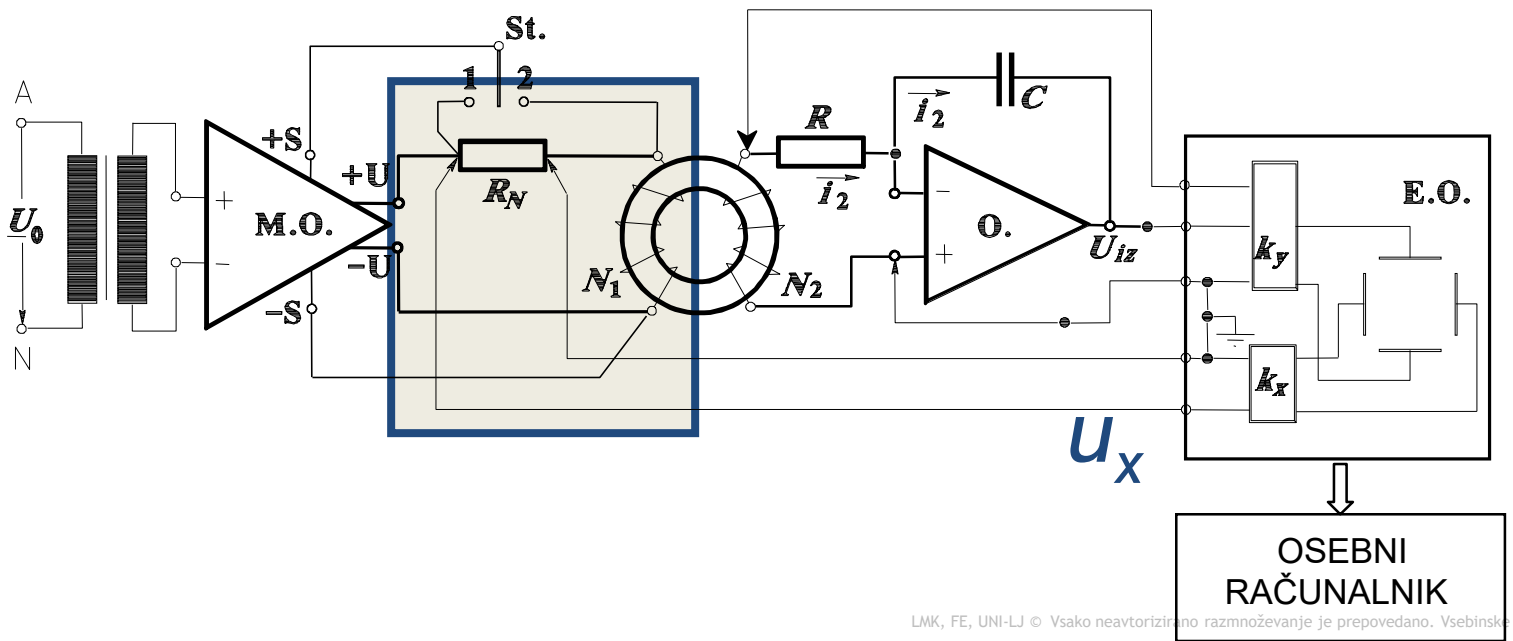
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merjenje jakosti magnetnega polja *H*

$$H = \frac{i_1 N_1}{l_{sr}}$$

$$\Downarrow$$

Merjenje toka i_1



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

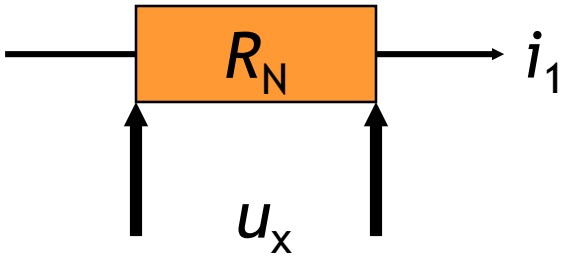
Merjenje jakosti magnetnega polja *H*

$$H = \frac{i_1 N_1}{l_{sr}}$$

$$\Downarrow$$

Merjenje toka i_1

Tok i_1 teče skozi referenčni upor R_N in ga merimo s pomočjo merjenja napetosti z osciloskopom.

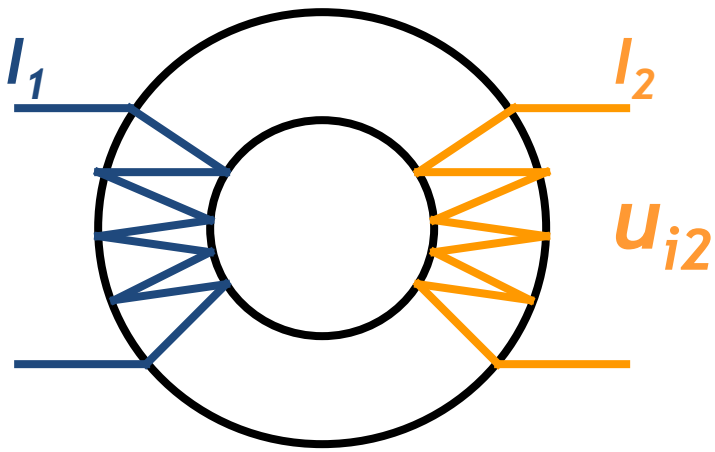


$$u_x = i_1 R_N \qquad H = \frac{u_x N_1}{R_N l_{sr}}$$

$$u_x = k_x x \qquad \Rightarrow \qquad H = \frac{N_1 k_x}{R_N l_{sr}} x$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

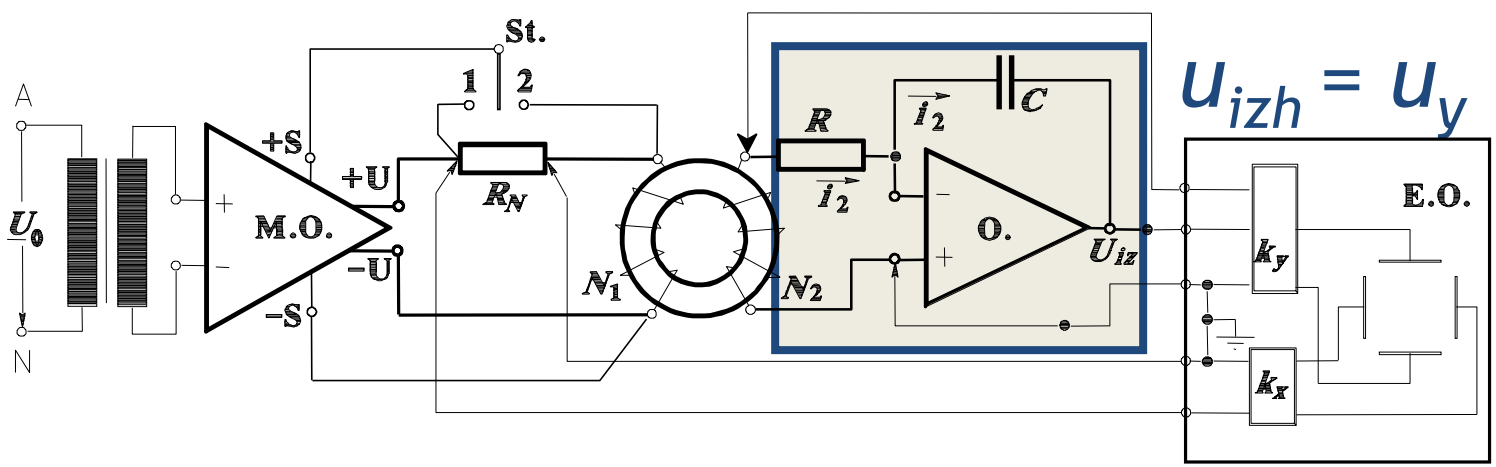
Merjenje gostote magnetnega pretoka *B*



$$u_{i2} = -N_2 \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = -N_2 \, A \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$$

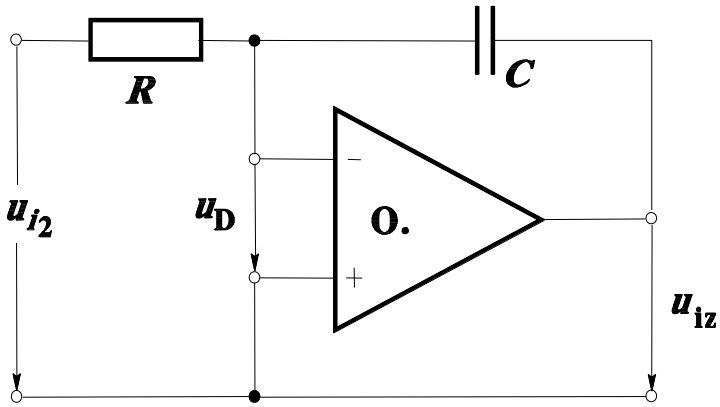
$$\Rightarrow \quad B = -\frac{1}{N_2 \, A} \int u_{i2} \, \mathrm{d}t$$

Merjenje $\int u_{i2} \, \mathrm{d}t$



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merjenje gostote magnetnega pretoka *B*



$$\frac{u_{i2} - u_D}{R} + C\frac{\mathrm{d}(u_{iz} - u_D)}{\mathrm{d}t} = 0$$

$$u_D \approx 0$$

$$u_{iz} = -\frac{1}{C}\int \frac{u_{i2} - u_D}{R}\mathrm{d}t + u_D = -\frac{1}{RC}\int u_{i2}\,\mathrm{d}t + \frac{u_D}{RC}t + u_D = -\frac{1}{RC}\int u_{i2}\,\mathrm{d}t$$

$$u_{i2} = -N_2\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = -N_2\,A\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \qquad \Rightarrow \qquad B = -\frac{1}{N_2\,A}\int u_{i2}\,\mathrm{d}t$$

$$u_{iz} = k_y\,y$$

$$\boxed{B = \frac{RC\,k_y}{N_2\,A}y}$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Ločitev specifičnih izgub feromagnetika

$$P_s = P_h + P_e$$

P_h histerezne specifične izgube

P_e vrtinčne specifične izgube

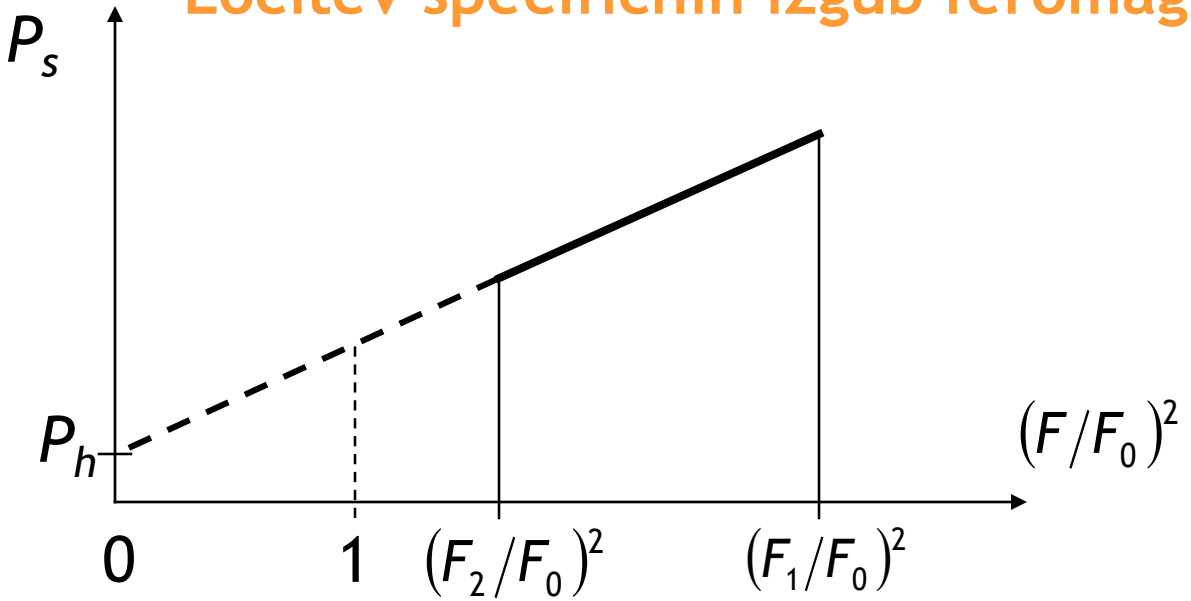
$$P_s = P_h + k \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^2$$

oblikovni faktor $F = \frac{U}{U_r}$

oblikovni faktor za sinus
$F_0 = 1{,}111$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Ločitev specifičnih izgub feromagnetika

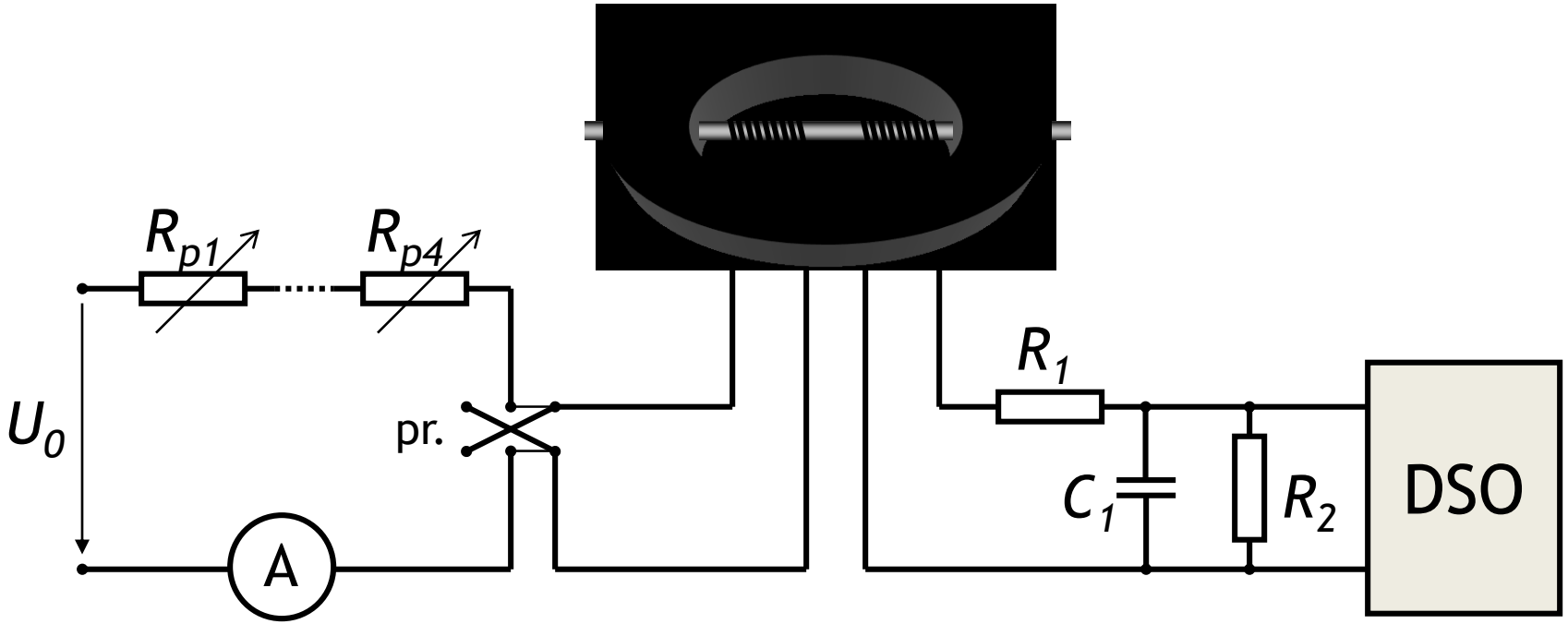


$$P_s = P_h + k \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^2$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

VAJA 10

Izmerite statično komutacijsko *B* - *H* magnetilno krivuljo feromagnetne palice s Hopkinsonovim jarmom.



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merilna instrumentacija, Merilna tehnika - vaja 10 (pripravil: Gregor Geršak)

www.lmk.si

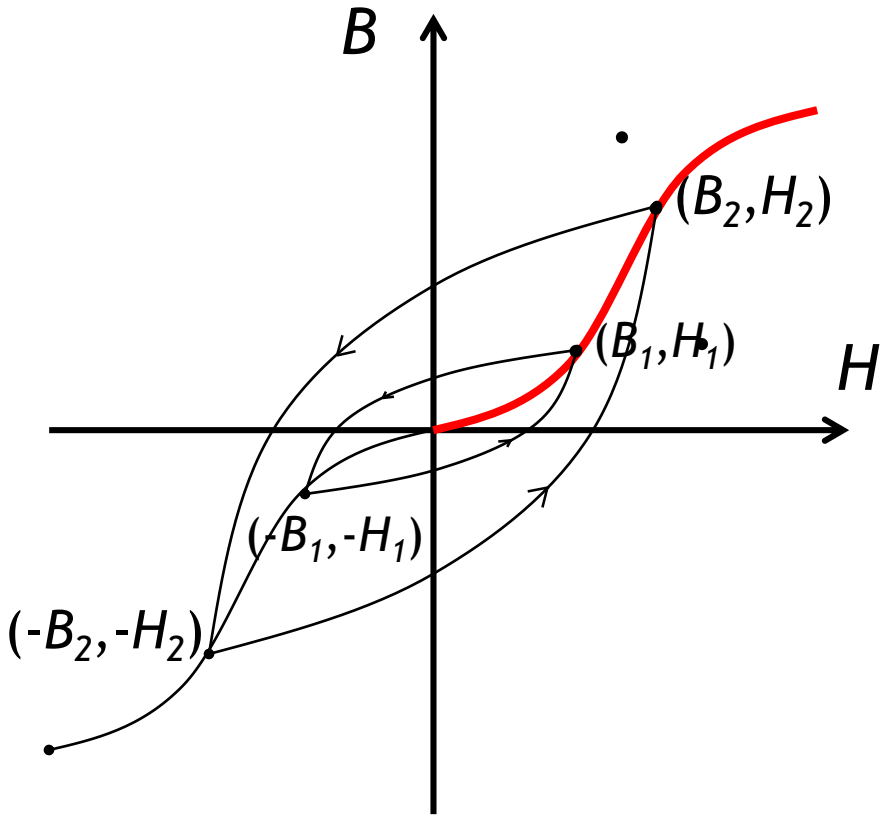
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merjenje magnetnih lastnosti feromagnetnih materialov

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Statična komutacijska magnetilnica

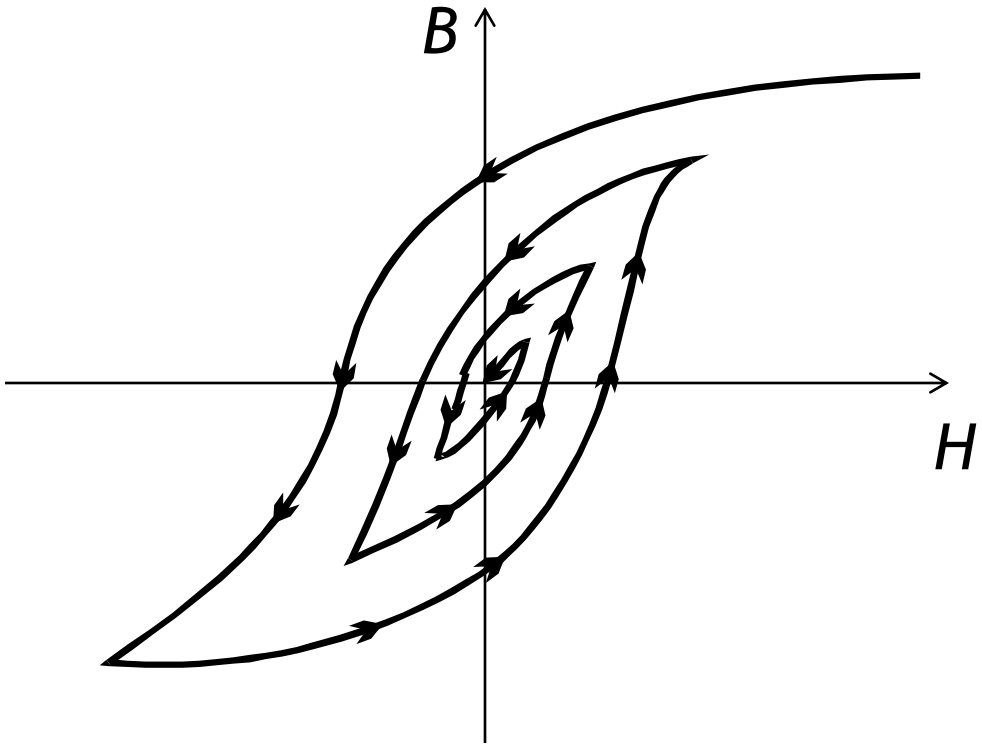
...je krivulja, ki povezuje vrhove družine statičnih histereznih zank za različne stopnje vzbujanja.



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

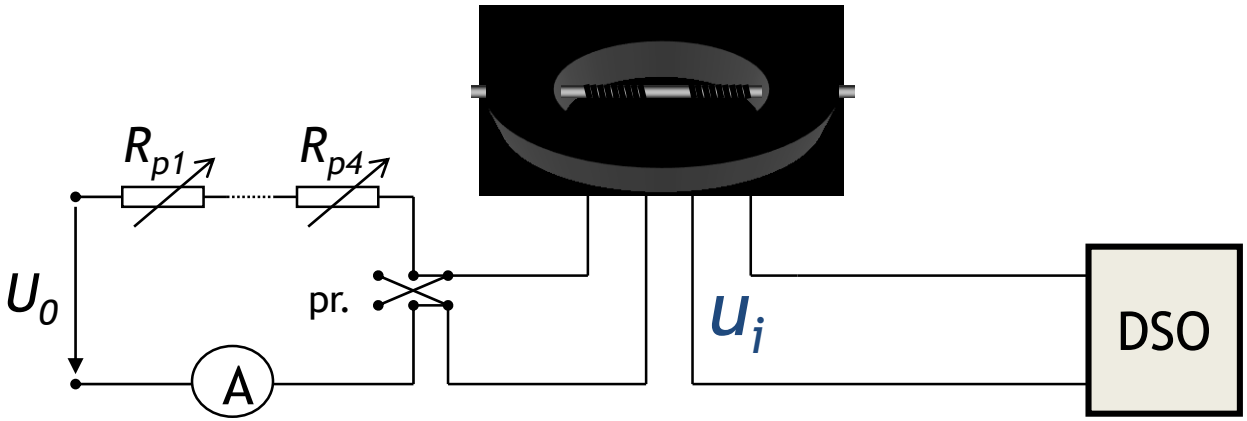
Razmagnetenje vzroca

Pred pričetkom snemanja statične magnetilne krivulje je potrebno vzorec razmagnetiti!

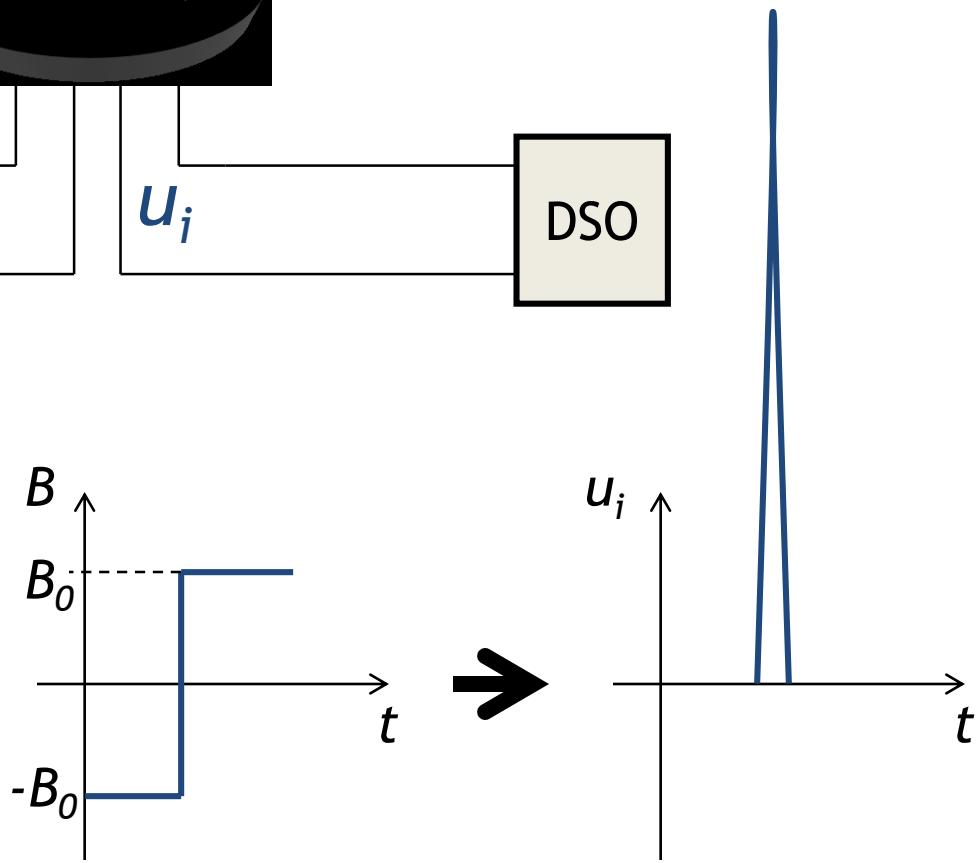


LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merjenje gostote magnetnega pretoka *B*

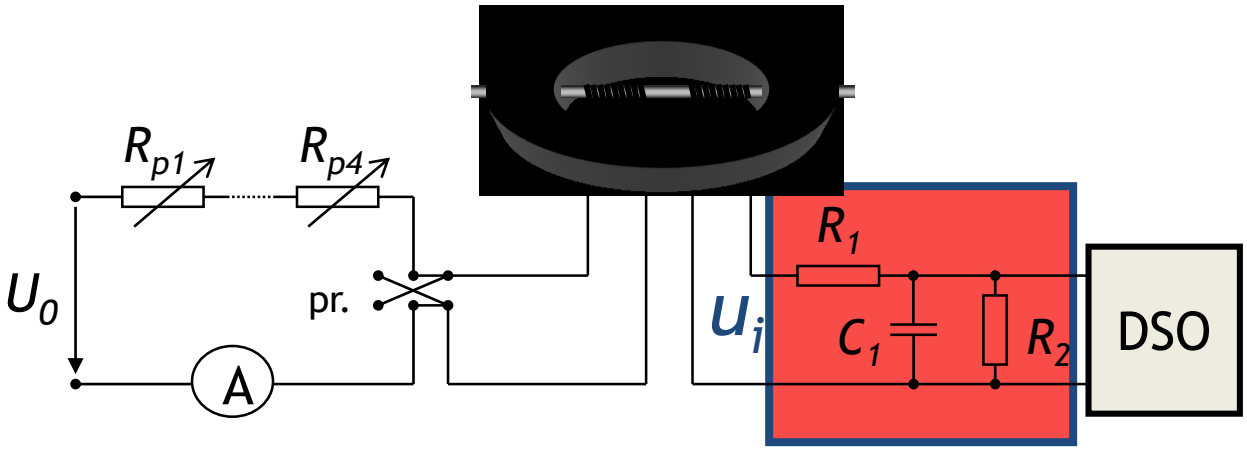


$$u_i = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \, A \frac{dB}{dt}$$

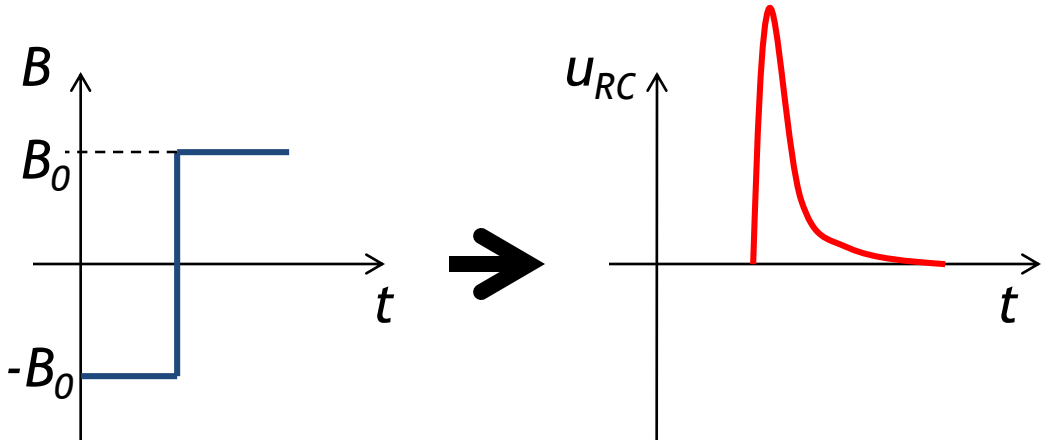


LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merjenje gostote magnetnega pretoka *B*



$$u_i = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \, A \frac{dB}{dt}$$



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Razmagnetenje materialov

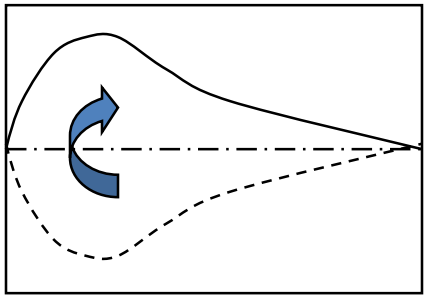
LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Merjenje gostote magnetnega pretoka *B*

Izločanje parazitne enosmerne prednapetosti

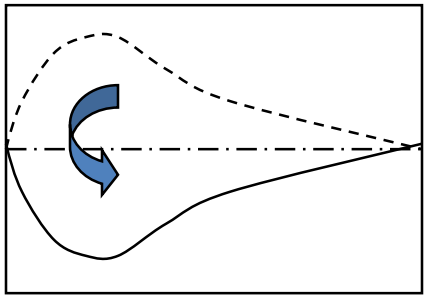
Sprememba iz – *B* v + *B*:

$$\frac{1}{T_\mathrm{M}}\int_0^{T_\mathrm{M}}\left(u+u_0\right)\mathrm{d}t=\frac{1}{T_\mathrm{M}}\int_0^{T_\mathrm{M}}u\ \mathrm{d}t+\frac{1}{T_\mathrm{M}}\int_0^{T_\mathrm{M}}u_0\ \mathrm{d}t=\overline{U}_1$$



Sprememba iz + *B* v – *B*:

$$\frac{1}{T_\mathrm{M}}\int_0^{T_\mathrm{M}}\left(-u+u_0\right)\mathrm{d}t=\frac{1}{T_\mathrm{M}}\int_0^{T_\mathrm{M}}-u\ \mathrm{d}t+\frac{1}{T_\mathrm{M}}\int_0^{T_\mathrm{M}}u_0\ \mathrm{d}t=\overline{U}_2$$



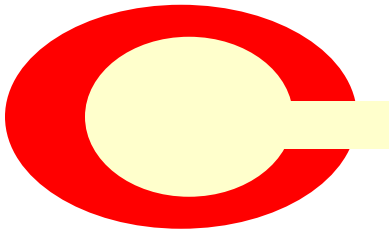
Povprečna vrednost je:

$$\overline{U}=\frac{1}{T_\mathrm{M}}\int_0^{T_\mathrm{M}}u\ \mathrm{d}t=\frac{\overline{U}_1-\overline{U}_2}{2}$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

a) merjenje jakosti magnetnega polja H

$$\oint H \mathrm{d}s = I\,N_1 \quad : \quad H_\mathrm{v}\,l_\mathrm{v} + H_\mathrm{z}\,l_\mathrm{z} + H_\mathrm{j}\,l_\mathrm{j} = I\,N_1$$



- majhna zračna reža in velik presek
- jarem majhne dolžine in velikega prereza in visoko permeabilen material

$$H_\mathrm{v} = \frac{I\,N_1}{l_\mathrm{v}}$$

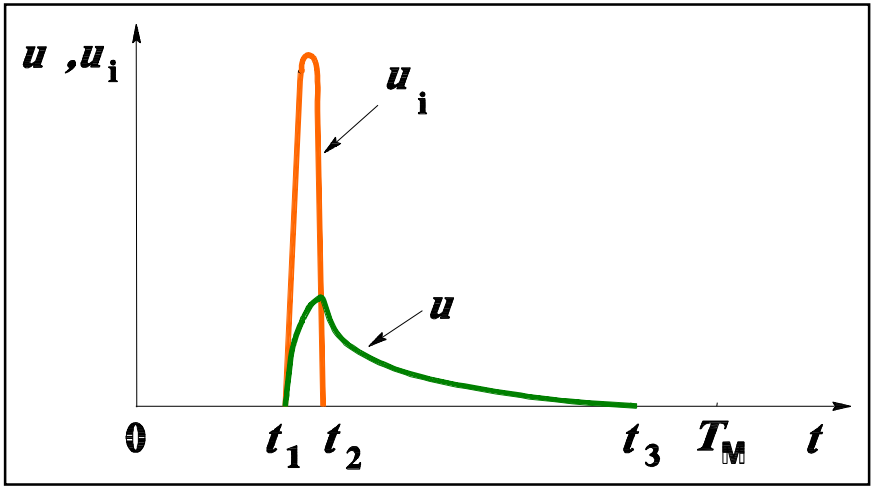
$$H = 4000\,I \qquad \left(H/(\mathrm{A/m}),\, I/\mathrm{A}\right)$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

b) merjenje gostote magnetnega pretoka B

Magnetno indukcijo *B* ugotovimo z meritvijo ploščine impulza inducirane napetosti v sekundarnem navitju.

$$u_i = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 A \frac{dB}{dt}$$

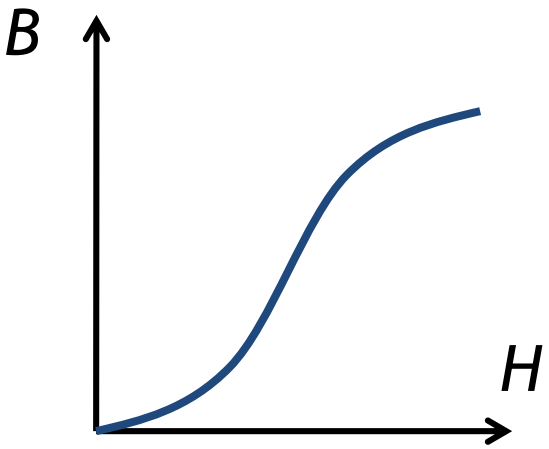


$$B = k\,\overline{U} = \frac{T_M}{2N_2 A a}\overline{U}$$

LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.

Poročilo

I/	H/	$\overline{U}_1$ /	$\overline{U}_2$ /	$\overline{U}$ /	B/



LMK, FE, UNI-LJ © Vsako neavtorizirano razmnoževanje je prepovedano. Vsebinske napake so mogoče.