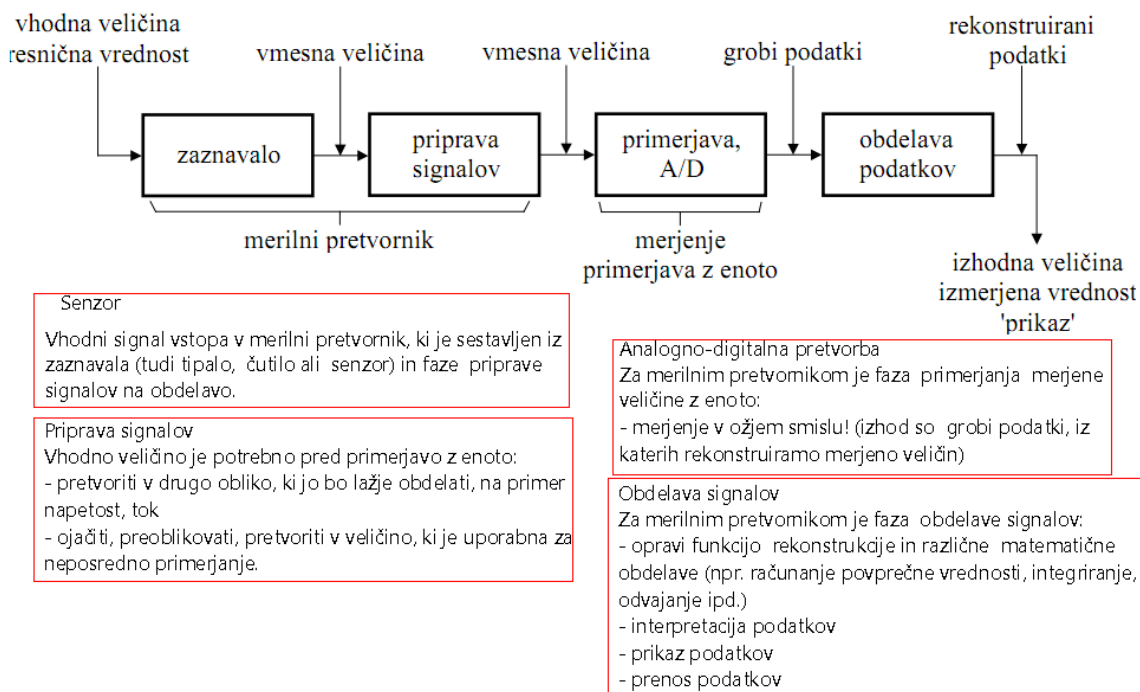


# Merilna inštrumentacija: Povzetek predavanj

- Sestava merilnega inštrumenta:
  1. Analogni pretvornik (pretvorimo električne (napetost, tok, upornost...) in ne-električne veličine (tlak, temperaturo, ...) v enosmerno napetost.
  2. Analogno-digitalni pretvornik (napetostni, tokovni...)
  3. Enote za obdelavo podatkov
  4. Prikazovalnik ali indikator (številski (digitalni) in rasterski prikazovalnik)



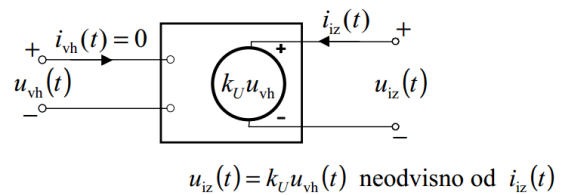
- Pretvorniki, sestavni deli: ojačevalniki, filtri, modulatorji, oscilatorji, integrirana vezja...
- Digitalizacija: možnost obdelave, pomnjenja in prenosa izmerjenih vrednosti.
- vpliv priključitve instrumenta na merilni objekt je manjši kot pri električnem instrumentu.
- Ojačevalniki in atenuatorji povečajo območje merilne veličine.
- S filtri zajamemo samo del frekvenčnega prostora in zmanjšamo vpliv motenj.
- Visoka frekvenčna meja ( $\approx \times 10\text{GHz}$ )

## OSNOVNI AKTIVNI GRADNIKI ZA OBDELAVO IN PRIREDITEV SIGNALOV

- Osnovni aktivni gradniki v merilnih sistemih so napetostni in tokovni izvori. Ti so lahko neodvisni ali odvisni (krmiljeni)

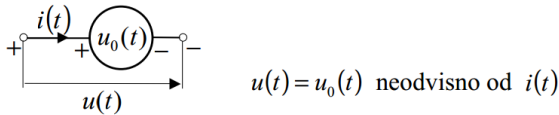
### Krmiljeni izvori:

- napetostno krmiljeni napetostni izvor:

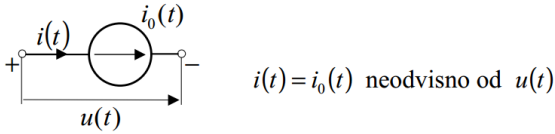


- napetostno krmiljeni tokovni izvor,
- tokovno krmiljeni napetostni izvor,
- tokovno krmiljeni tokovni izvor.

- idealni neodvisni napetostni izvor:

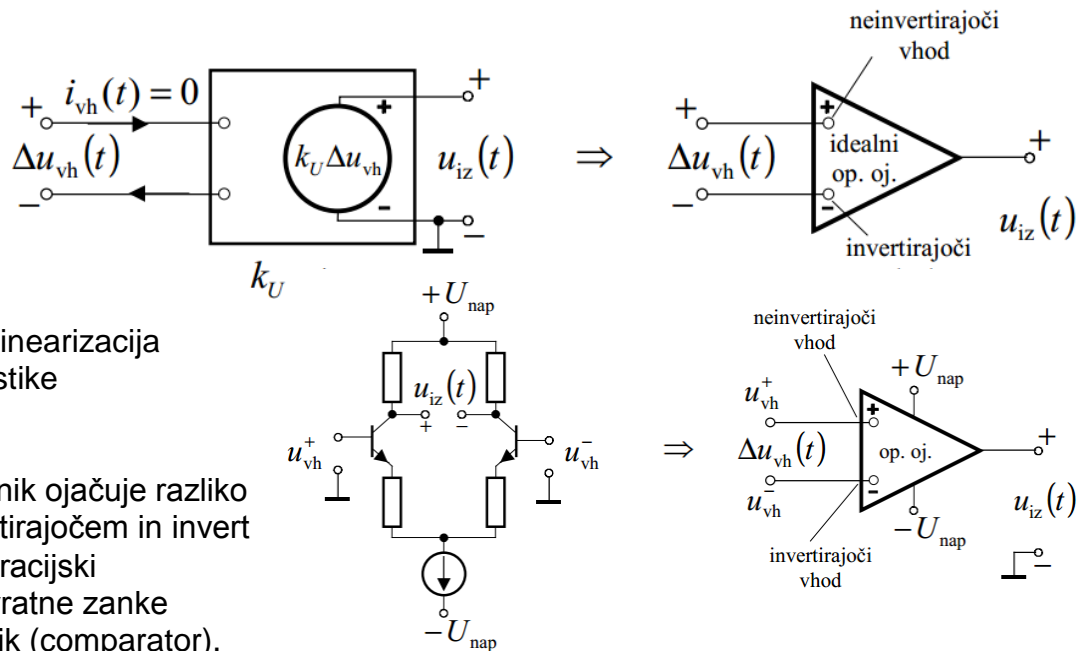


- idealni neodvisni tokovni izvor:



### OPERACIJSKI OJAČEVALNIK

- Pri izgradnji krmiljenih izvorov se uporabljajo aktivni elementi kot sta tranzistor in operacijski ojačevalnik v linearnem delu karakteristike
- Idealni operacijski ojačevalnik:  $k_U \rightarrow \infty$
- Zgradba: dva enaka tranzistorja v mostični vezavi  $\rightarrow$  linearizacija nelinearne karakteristike

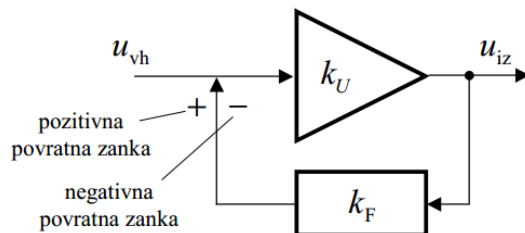


- Operacijski ojačevalnik ojačuje razliko napetosti na neinverzirajočem in invert
- Teoretično vsak operacijski ojačevalnik brez povratne zanke deluje kot primerjalnik (comparator).

### ZMANJŠANJE POGREŠKA Z UPORABO POVRATNE ZANKE

- Z povratno zanko zmanjšamo vpliv nelinearnosti

Del ali celotni **izhodni signal** se preko  $k_F$  pripelje **nazaj** k vhodnemu signalu in zanko zapremo (closed loop).



- Pozitivna povratna zanka je

tedaj, kadar povratni signal deluje v isto smer kot vhodni (povečuje signal, oscilacije).

- Negativna povratna zanka je tedaj, kadar povratni signal deluje v nasprotno smer kot vhodni (stabilizira).

## ELEKTRONSKI VOLTMETRI

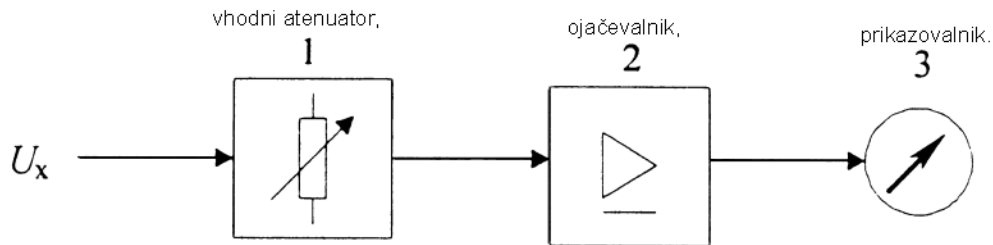
Delitev na:

- analogne (odklon kazalca, kvantizacijo dobimo z očitanjem – določitvijo položaja kazalca na skali)
- digitalne (prikazuje vrednost v številski obliki)

Obe vrsti imata v pretvorniku podobne sestavne dele, ki proizvajajo enosmerni signal proporcionalen merjeni veličini

- enosmerne in izmenične

### ANALOGNI ELEKTRONSKI VOLTMETER



Blokovna shema voltmetra za merjenje enosmerne napetosti

### POPOLNA ELEKTRONSKA REALIZACIJA IZMENIČNEGA VOLTMETRA Z ODZIVOM NA EFEKTIVNO VREDNOST

- Najbolj pogosto se uporablja popolna elektronska realizacija definicije:

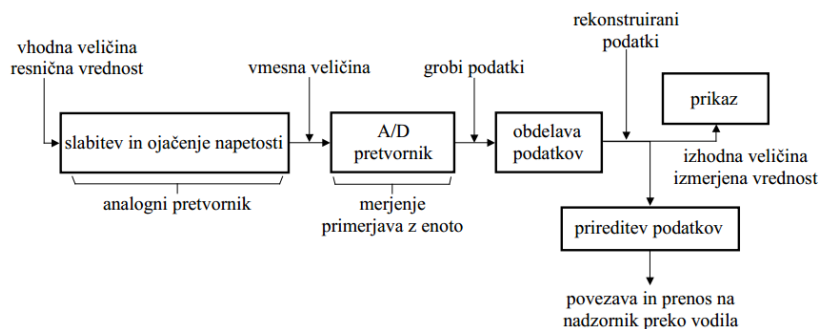
$$U = \sqrt{u_x^2} - \text{koren povprečja kvadratov (rms)}$$

- napetost **kvadriramo, povprečimo s filtrom in korenimo** (kvadratna funkcija v povratni zanki ojač.)

Uporaba elektronskih analognih voltmetrov za izmenične napetosti:

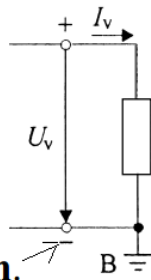
- Pozorni moramo biti, na kateri parameter se odzivajo (časovni potek napetosti)
- Trenutne vrednosti so lahko precej večje kot povprečja merjene napetosti (usmerjena ali efektivna vrednost) in pride do nasičenja v pretvorniku.

### DIGITALNI ELEKTRONSKI VOLTMETER



## VHODNA STOPNJA ELEKTRONSKEGA VOLTMETRA

- Voltmetri imajo ponavadi le dve vhodni sponki, med katerima je upornost (impedanca pri izmeničnih razmerah):



ozemljen.

$$R_V = \frac{U_V}{I_V}$$

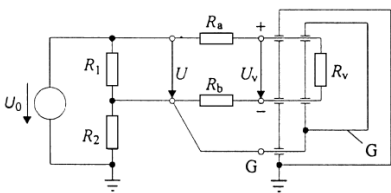
Pogosto je negativni vhod (-), skupna točka, pri izmeničnih voltmetrih) ozemljen.

Tudi merjeni vir ima notranjo upornost in upornost veznih vodnikov ni enaka nič.

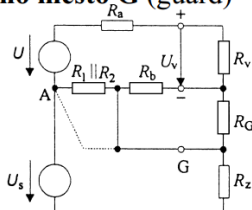
### Voltmeter z oklopljenim vhodom

Vpliv sofazne napetosti zmanjšamo tudi z okloptom.

- vhodna stopnja je oklopljena,
  - izolirana od oklopa ohišja,
  - ima lastno priključno mesto G (guard)

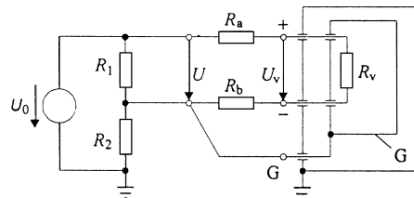


a)



b)

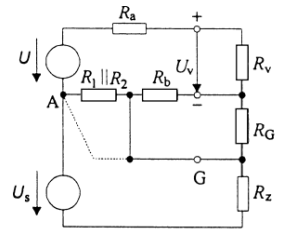
Slika 1.28 Voltmeter z okloptom in nadomestno vezje



Motnja zaradi sofazne napetosti je:

$$U_m \approx U_s \frac{R_1 \parallel R_2}{R_z}$$

Če bi uspeli priključiti oklop G v točko A, kjer 'prijemlje' sofazna napetost, bi bila izločitev sofazne napetosti popolna.



**Potencial oklopa G tudi umetno (aktivno z ojačevalniki) vzdržujemo na potencialu točke A (potencial sofazne napetosti).**

- **Če ni potencialne razlike, ni motilnih tokov!**

### ANALOGNO-DIGITALNI PRETVORNIK

- Analogna vhodna veličina je  $u$  (ali  $i$ )
- izhodna veličina pa njen digitalni ekvivalent  $Z$  -kodirana beseda  $Z_{(2)} = \text{lb}(Z_{(10)})$
- $Z$  n-bitnim ADP imamo  $2^n$  diskretnih izhodnih nivojev (so predstavniki (reprezentanti) kvantizacijskih intervalov - podobmočij)
- Ker ima vhodna analogna veličina neskončno nivojev digitalna pa končno, nastane kvantizacijski pogrešek (pri analognih instrumentih ustreza temu pogrešek odčitavanja).

- **mejni kvantizacijski pogrešek:**  $\pm \frac{\Delta}{2}$  ali  $\pm \frac{\text{LSB}}{2}$

- Izhodni merilni parameter ADP je (ne)prisotnost impulza (0 ali 1)  $\rightarrow$  impulzno kodna modulacija

- Za predstavitev izhodne besede imamo dva bistvena načina prikaza: zaporedni (serijski), vzporedni (paralelni), vmesni serijsko-paralelni.
- Negativne vrednosti pretvarjamo:
  - a) z usmernikom -predznak nam doda MSB
  - b) z enosmerno prednapetostjo
- ADP ima vrsto priključkov:
  - referenčni potencial 'analogna masa' (Agnd),
  - skupni potencial izhoda 'digitalna masa' (Dgnd),
  - referenčna napetost  $U_r$  ( za primerjavo z merjeno napetostjo)
  - urni signal, ki daje takt korakov pri pretvarjanju,
  - prožilni signal za začetek pretvorbe (START),
  - signal zasedenosti z delom (BUSY), ko preide v stanje 1, lahko sprožimo novo pretvarjanji z  $1 \rightarrow 0$ ,
  - če je ADP izkrmiljen (prevelika napetost na vhodu), nam ADP to sporoči na priključku OVERLOAD,
  - prisotnost 8-bitnih podatkov na vodilu (HI ali LO ENABLE) s pomočjo 'tristate' gonilnikov.

Značilni podatki ADP:

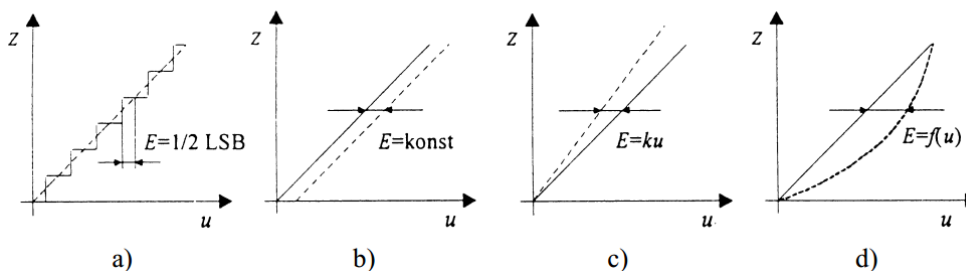
- ✓ dolžina besede določa relativni kvantizacijski pogrešek

primeri:

- 6-bitni ADP:  $e_{q,max} = \pm 1/2^7 \approx \pm 0,8\%$
- 18-bitni ADP:  $e_{q,max} = \pm 1/2^{19} \approx \pm 2 \text{ ppm}$

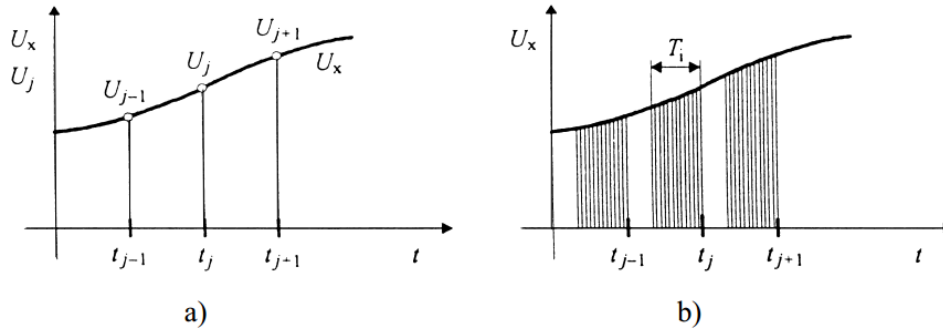
- ✓ uporabljena koda (od nje je odvisna interpretacija predznaka)
- ✓ čas pretvorbe - odvisen od vrste pretvornika: najdaljši pri integrirajočem ADP, najkrajši pri paralelnem ADP
- ✓ pogrešek razdelimo na

- **kvantizacijskega** - a,
- **ničelnega** – b,
- **naklonskega** – c,
- pogrešek **nelinearnosti** – d.
- **diferencialna (DNL) in integralna (INL)**



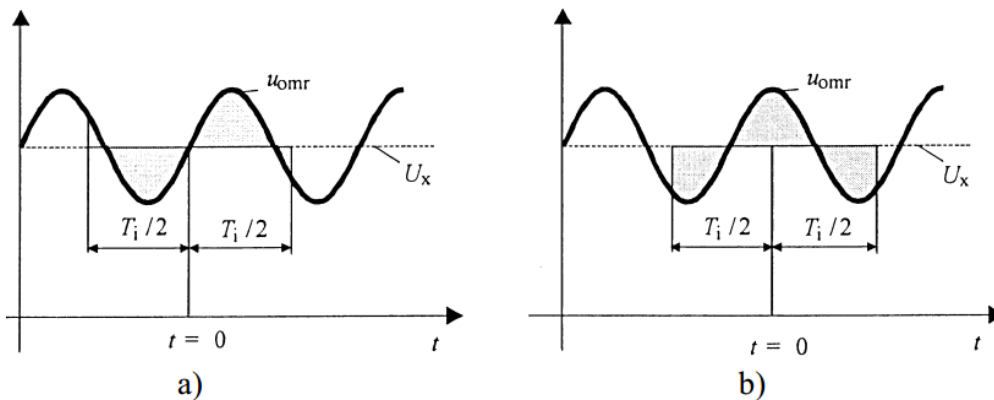
- ✓ Bistveno za ADP je tudi postopek vzorčenja:
  - trenutni – izhod ustreza trenutni vrednosti:  $U_j(t_j)$
  - integrirajoči – izhod ustreza tekoči povprečni vrednosti:

$$\bar{U}_j = \frac{1}{T_i} \int_{t_j - T_i}^{t_j} U_x dt$$



### Trenutni in integrirajoči ADP

- ✓ Lastnost integrirajočega ADP da filtrira (odziva se na povprečno vrednost) izkoriščamo za izločanje motnje. Integracijski čas  $T_i$  mora biti enak periodi ali večkratniku periode motnje (omrežna frekvenca)
- ✓ Če čas integracije ni mnogokratnik periode motnje, je izločanje motnje odvisno od relativnega položaja glede na motnjo. Analiza za sinusno obliko:
  - a) izločanje motnje je popolno - sredina integracijskega intervala se ujema s preходом motnje skozi ničelni nivo.
  - b) izločanje motnje je najslabše - sredina intervala se ujema z vrhom motnje



Največja povprečna vrednost motnje v primeru b:

$$\bar{U}_{\text{omr}} = \frac{1}{T_i} \int_{-T_i/2}^{T_i/2} \hat{u}_{\text{omr}} \cos \omega t \, dt = \hat{u}_{\text{omr}} \frac{\sin \omega T_i/2}{\omega T_i/2}$$

Slabljenje:

$$A/\text{dB} = 20 \lg \frac{\hat{u}_{\text{omr}}}{\bar{U}_{\text{omr}}} \text{ oz. } A/\text{dB} = 20 \lg \frac{\pi T_i/T}{|\sin(\pi T_i/T)|}$$

- Pri sinusni obliki se tekoča povprečna vrednost in trenutna vrednost razlikujeta,
- nastane relativni pogošček, ki je v najslabšem:

$$|e| = \left| \frac{\hat{u} \frac{\sin(\pi T_i/T)}{\pi T_i/T} - \hat{u}}{\hat{u}} \right| = 1 - \frac{|\sin(\pi T_i/T)|}{\pi T_i/T}$$

## AD PRETVORNIK S POSTOPNIM PRIBLIŽEVANJEM

Zgled:

- Kolikšna je največja dopustna časovna sprememba vhodne napetosti pri 12-bitnem ADP?

$$\square U_D = 10 \text{ V}, T_c = 10 \mu\text{s}$$

$$\left| \frac{du}{dt} \right|_{\max} = \frac{U_D}{2^n T_c} = \frac{10 \text{ V}}{2^{12} 10 \mu\text{s}} = 244 \text{ V/s}$$

- Koliko je največja dopustna frekvenca?

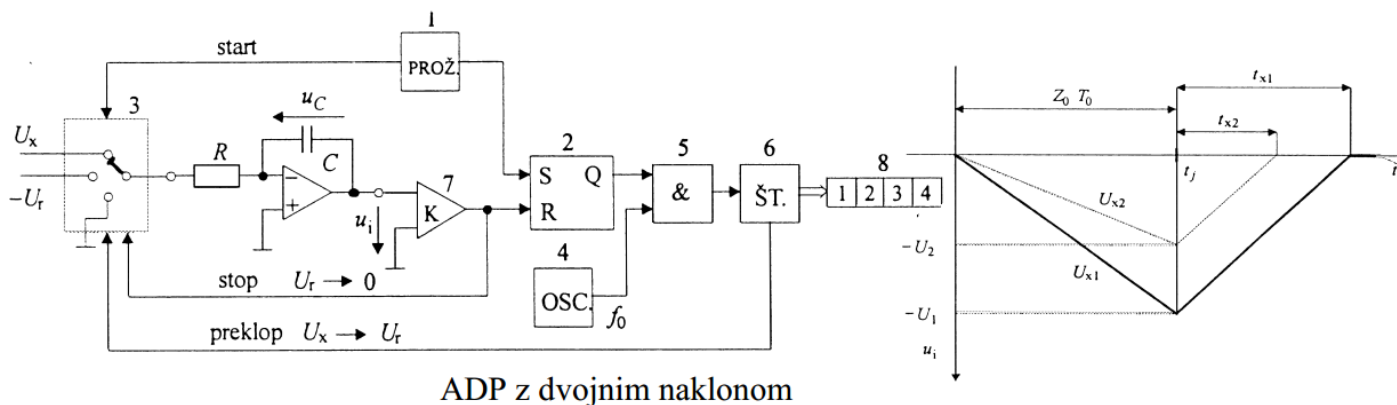
$$f = \frac{1}{2^n \pi T_c} = \frac{1}{2^{12} \pi 10 \mu\text{s}} = 7,8 \text{ Hz}$$

- Koliko je frekvenca, če ima V/Z-člen  $T_{ap} = 5 \text{ ns}$ ?

$$f = \frac{1}{2^n \pi T_{ap}} = \frac{1}{2^{12} \pi 5 \text{ ns}} = 15,5 \text{ kHz}$$

## INTEGRIRAJOČI AD PRETVORNIK

Pretvornik z dvakratnim integriranjem ali pretvornik z dvojnimi naklonom



ADP z dvojnimi naklonom

Merilni cikel se začne:

- ko prožilnik (1) postavi RS bistabilnega multivibratorja (2) v logično stanje ena,
- in preklopnik (3) v začetno stanje

Začne se integracija neznane napetosti  $U_x$  z integratorjem:

- operacijski ojačevalnik z RC členom v povratni zanki
- Impulzi referenčnega oscilatorja  $f_0$  grede skozi odprta IN vrata (5) na števec (6).
- ko se napolni z  $Z_0$  impulzi, se konča integracija  $U_x$ ,
- čas integracije napetosti  $U_x$  je enak  $Z_0 T_0 = Z_0 / f_0$

Po času  $Z_0 T_0$  se stikalo (3) preklopi na  $U_r$ ,

- referenčna napetost  $U_r$  mora biti nasprotne polaritete, da se spremeni tendenca integracije.

Ko napetost  $u_i$  doseže nivo nič, komparator (7) resetira flipflop (2), vrata se zaprejo in meritev se ustavi.

- na vhodu je napetost nič,
- ADP čaka na nov merilni cikel.

Imamo dva takta integriranja:

Za **prvi takt** velja: - napetost na  $C$ :  $u_i \approx u_C$

- **vsota tokov** na vhodu integ.:  $\frac{U_x}{R} + C \frac{du_i}{dt} = 0$

- **integracija**:  $\int_0^{-U_1} du_i = -\frac{1}{RC} \int_{t_j - Z_0 T_0}^{t_j} U_{x1} dt \Rightarrow U_1 = \frac{Z_0 T_0}{RC} \bar{U}_{x1}$

Za drugi takt velja: integrira se napetost  $-U_r$

- **vsota tokov** na vhodu integ.:  $-\frac{U_r}{R} + C \frac{du_i}{dt} = 0$

- **naklon** izhodne napetosti:  $\frac{du_i}{dt} = \frac{1}{RC} U_r$

- **integracija**:  $\int_{-U_1}^0 du_i = \frac{1}{RC} \int_{t_i}^{t_j + t_{x1}} U_r dt \Rightarrow U_1 = \frac{t_{x1}}{RC} U_r$

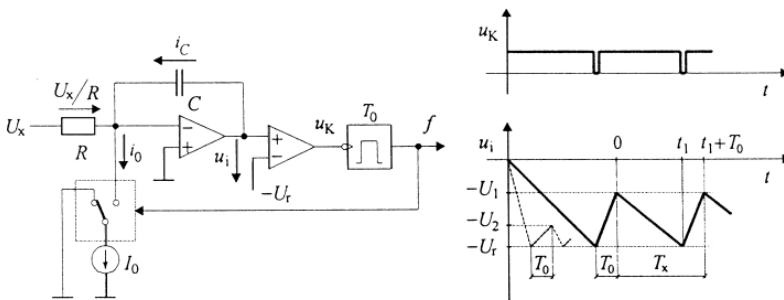
$$U_1 = \frac{Z_0 T_0}{RC} \bar{U}_{x1} \quad U_1 = \frac{t_{x1}}{RC} U_r$$

**Izenačenje** napetosti obeh integracij nam da:  $t_{x1} = \frac{Z_0 T_0}{U_r} \bar{U}_{x1}$

- ker je  $Z = \frac{t_{x1}}{T_0}$ , dobimo:  $Z = \frac{Z_0}{U_r} \bar{U}_{x1}$

- točnost pretvornika **ni odvisna** od  $R$  in  $C$  pa tudi  $f_0$  ne.

**ADP S FREKVENCNO KOT ANALOGNO VMESNO VELIČINO**  
 U / f pretvornik deluje na principu izenačevanja naboja



V **prvem delu** integracije imamo samo tok  $U_x/R$  (in  $i_C$ ),

- napetost  $u_i$  monotono upada.

Ko doseže referenčni nivo  $-U_r$ ,

- se sproži monostabilni multivibrator,
- za čas  $T_0$  se priklopi **referenčni vir**  $I_0$  - **drugi del integracije**

$$\frac{U_x}{R} - I_0 + C \frac{du_i}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{du_i}{dt} = \frac{1}{C} \left( I_0 - \frac{U_x}{R} \right)$$

Napetost integratorja niha med vrednostima  $-U_1$  in  $-U_r$ :

$$\int_{-U_1}^{-U_r} du_i + \int_{-U_r}^{-U_1} du_i = 0 = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_1} U_x dt + \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_1+T_0} \left( I_0 - \frac{U_x}{R} \right) dt$$

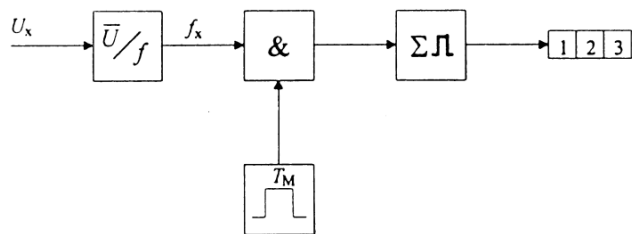
in dobimo: 
$$\frac{I_0 T_0}{C} = \frac{1}{RC} \int_0^{t_1} U_x dt + \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_1+T_0} U_x dt = \frac{1}{RC} \int_0^{t_1+T_0} U_x dt$$

Iz 
$$I_0 T_0 = \frac{T_x}{R} \frac{1}{T_x} \int_0^{t_1+T_0} U_x dt = \frac{1}{R f_x} \bar{U}_x \quad (T_x = t_1 + T_0)$$
 izrazi

frekvenco ponavljanja:

$$f_x = \frac{1}{R I_0 T_0} \bar{U}_x$$

Digitalizacija se izvrši s štetjem impulzov frekvence, ki nosi informacijo o povprečni moči.



Slika 1.46 Digitalno merjenje frekvence oziroma napetosti

- IN vrata se odpro za določen čas  $T_M$ .
- Na števec pride  $Z = f_x T_M$  impulzov, ki jih števec prešteje in prikaže na prikazovalniku.

### ELEKTRONSKI OSCILOSKOP

Najpogosteje uporabljen merilni instrument opazujemo merilni signal.

- omogoča opazovanje trenutnih vrednosti veličine v odvisnosti od časa : Y-t delovanje
- ali ene veličine od druge: X-Y delovanje
- z njim merimo: frekvenco, fazni zamik, moč, itn.

### ANALOGNI DVOKANALNI OSCILOSKOP

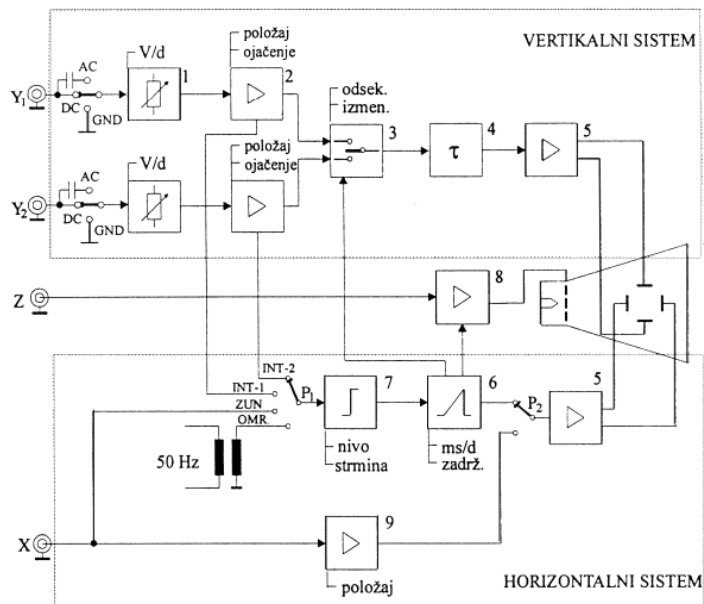
Setavljen je iz treh enot:

- Prikazovalnega zaslona (rasterski zaslon),
- vertikalnega in
- horizontalnega sistema.

Pri analognih osciloskopih lahko signala opazujemo na dva načina:

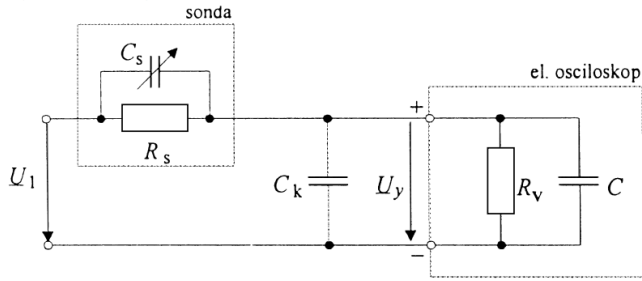
- izmenično delovanje,
- najprej se izriše en u<sub>y1</sub> signal v celoti nato pa drugi u<sub>y2</sub>,
- primeren za signale visoke frekvence;

- odsekovno delovanje,
- elektronski preklopnik hitro preklaplja z enega signala na drugi – razseka signal (ca. 100 kHz),
- primeren za signale nizke frekvence – slika signala deluje zvezno



### 1.3.1.4 Vhod EO

Sestavljajo ga elementi **sonde**, **koaksialen kabel** in **sam vhod EO (BNC vhod)**.



Nadomestno vezje osciloskopa z napetostno sondo

Vhodno impedanco sestavljata:

- **vzporedna upornost:**  $R_v \approx 1\text{M}\Omega$ ,
- **kapacitivnost:**  $C(30\text{pF} \div 50\text{pF})$ .

**Koaksialni kabel** ima svojo impedanco, katere bistveni del je **kapacitivnost**  $C_k$  podana na dolžino (ca.  $50\text{pF/m}$ ).  $C_v = C + C_k$

**Napetostni delilnik:**

$$\frac{U_y}{U_1} = \frac{(1/R_s + j\omega C_s)}{(1/R_s + j\omega C_s) + (1/R_v + j\omega C_v)} = \frac{(1 + j\omega R_s C_s)/R_s}{(1 + j\omega R_s C_s)/R_s + (1 + j\omega R_v C_v)/R_v}$$

- s  $C_s$  nastavimo  $R_s C_s = R_v C_v$  in **kompenziramo** sondo:

$$\frac{U_y}{U_1} = \frac{R_v}{R_v + R_s} = \frac{C_s}{C_s + C_v} - \text{napetostno razmerje neodvisno od } f$$

**Impedanca osciloskopa** je še vedno **odvisna od frekvence:**

$$Z = Z_s + Z_v = \frac{1}{Y_s} + \frac{1}{Y_v} = \frac{1}{1/R_s + j\omega C_s} + \frac{1}{1/R_v + j\omega C_v} = \frac{R_s + R_v}{1 + j\omega R_v C_v}$$

- če je sonda 1:10, je  $Z$  destokrat večja kot  $Z_v$  brez sonde.

$$Z = \frac{R_s + R_v}{R_v} \frac{R_v}{1 + j\omega R_v C_v} = \frac{R_s + R_v}{R_v} \frac{1}{1/R_v + j\omega C_v} = 10 Z_v$$

### DIGITALNI SPOMINSKI OSCILOSKOP (DSO)

Dinamične lastnosti DSO

Za analogni del (atenuator, ojačevalnik,...) do ADP veljajo enake veličine kot za analogne osciloskope

- **dvižni čas**  $T_r$  (odziv na stopnico od 10% do 90%)
- **mejna frekvenca**  $f_m$ :  $T_r = 0,35/f_m$

- padec amplitudne karakt. za 3dB ali  $1/\sqrt{2}$ ,
- ker je spodnja mejna frekvenca 0Hz (DC vhod) oziroma 10Hz (AC vhod), je  $f_m$  enaka **pasovni širini**:  $B = f_m$

**Uporabna pasovna širina:**

- **točkovna podaja:**  $B_{pt} = \frac{f_s}{25}$

- 25 točk na periodo

• **linearna interpolacija:**  $B_{lin} = \frac{f_s}{10}$

- povezava točk z daljicami

$$B_{si} = \frac{f_s}{2,5}$$

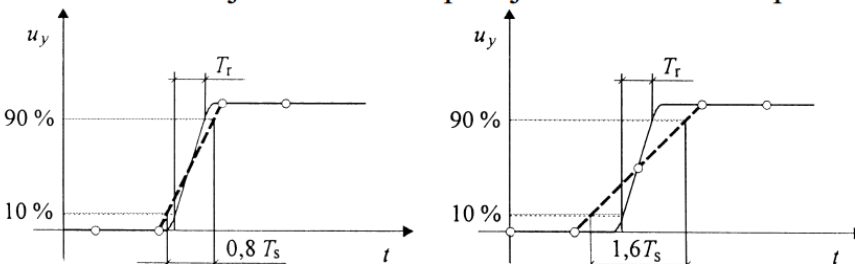
**Uporabni dvižni čas:**

- če je **dvižni čas signala krajši** kot **vzorčni čas**  $T_s$ , se spreminja med:

$$T_r = 0,8 T_s \text{ in } T_{r,max} = 1,6 T_s$$

$$T_r = 1,6 T_s - \text{uporabni dvižni čas}$$

- velja za točkovno podajo in linearno interpolacijo



Dvižni čas DSO z linearno interpolacijo

## UNIVERZALNI ELEKTRONSKI ŠTEVEC

Števec lahko kaže en impulz premalo ali preveč

Kvantizacijski pogrešek pri merjenju periode

Največji **mejni pogrešek** je  $\pm 1$  impulz.

- Izražen v **enoti merjene veličine**:  $T_x = ZT_0^* \pm T_0^*$
- absolutni **mejni kvantizacijski pogrešek**:  $M_T = \pm T_0^*$
- in v **relativni obliki**:  $m_T = \frac{M_T}{T_x} = \pm \frac{T_0^*}{T_x} = \pm T_0^* f_x = \pm \frac{1}{Z}$ 
  - daljša je perioda, manjši je pogrešek!
- primer:  $f_0 = 10 \text{ MHz}$  ;  $K = 1$ ;  $f_x = 10 \text{ Hz} \Rightarrow T_x = 100 \text{ ms}$

$$m_T = \pm \frac{T_0^*}{T_x} = \pm \frac{100 \text{ ns}}{100 \text{ ms}} = \pm 10^{-6} = \pm 10^{-4} \%$$

**Standardna negotovost:**

$$u(T_x) = \sqrt{u_1^2(T_x) + u_2^2(T_x)} = T_0^* \sqrt{\frac{1}{12} + \frac{1}{12}} = \frac{T_0^*}{\sqrt{6}} = \frac{Q_T}{\sqrt{6}} = \frac{M_T}{\sqrt{6}}$$

- mejna vrednost je  $M_T = Q_T$ ,
- porazdelitev pa trikotna.

Merjenje frekvence

Kvantizacijski pogrešek pri merjenju frekvence

- **primer**:  $f_0 = 10 \text{ MHz} \rightarrow T_0 = 100 \text{ ns}$ ;  
 $K = 10^7$ ;  $f_x = 123,4 \text{ Hz}$
- čas merjenja:  $T_M = KT_0 = \frac{K}{f_0} = \frac{10^7}{10 \text{ MHz}} = 1 \text{ s}$
- števec našteje:  $\bar{Z} = f_x T_M = 123,4 \text{ Hz} \cdot 1 \text{ s} = 123,4$ 
  - ker prešteje vedno celo število impulzov število niha med 123 in 124!

Največji **mejni pogrešek** je  $\pm 1$  impulz!

- izrazimo ga v enoti merjene veličine:  $f_x = \frac{Z}{T_M} \pm \frac{1}{T_M}$
- absolutni **mejni kvantizacijski pogrešek**:  
 $M_f = \pm \frac{1}{T_M} = \pm \frac{1}{KT_0}$
- in v **relativni obliki**:  $m_f = \frac{M_f}{f_x} = \pm \frac{1}{f_x T_M} = \pm \frac{1}{Z}$ 
  - z manjšanjem frekvence se poveča.
- primer:  $f_0 = 10 \text{ MHz}$  ;  $K = 10^8$ ;  $f_x = 10 \text{ Hz}$

$$M_f = \pm \frac{1}{f_x T_M} = \pm \frac{1}{f_x K T_0} = \pm \frac{10 \text{ MHz}}{10 \text{ Hz} \cdot 10^8} = \pm 10^{-2} = \pm 1\%$$

## Ločljivost pri merjenju frekvence

Števec prešteje  $Z$  impulzov, vsakemu impulzu pripada kvant  $Q_f$

**Izmerjena frekvenca:**

$$f_i = Z \cdot Q_f = \frac{Z}{T_M}$$

**Neznana frekvenca je:**

$$f_x = \frac{1}{T_x} = \frac{Z}{T_M + \Delta\tau_1 - \Delta\tau_2} = f_i \frac{1}{1 + (\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2)/T_M}$$

**Relativni kvantizacijski pogrešek pri merjenju frekvence**

$$e_f = \frac{f_i - f_x}{f_x} = \frac{f_i}{f_x} - 1 = \frac{\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2}{T_M}$$

- čas merjenja lahko **izberemo:**

$$T_M = 10 \text{ s}, 1 \text{ s}, 0,1 \text{ s}, 0,01 \text{ s}, \dots$$

Mejni pogrešek pri merjenju odvisen tudi od uporabnika.

Mejna pogreška kvantizacije

**Mejna pogreška kvantizacije v odvisnosti od frekvence:**

$$m_f = \pm \frac{1}{KT_0 f_x} \quad \text{Pri nizkih frekvencah je boljše meriti periodo!}$$

$$m_T = \pm KT_0 f_x \quad \text{Pri visokih frekvencah je boljše meriti frekvenco!}$$

## Standardna negotovost

**Standardna negotovost** pri merjenju frekvence

je predvsem **odvisna od pogreška zaradi nesinhronizacije.**

$$f_x = \frac{Z}{T_M + \Delta\tau_1 - \Delta\tau_2} \quad u(f) = \sqrt{u_1^2(f) + u_2^2(f)}$$

$$u_1(f) = \left| \frac{\partial f_x}{\partial \Delta\tau_1} \right| u(\Delta\tau_1) = \frac{|-Z|}{(T_M + \Delta\tau_1 - \Delta\tau_2)^2} \frac{T_x/2}{\sqrt{3}} \approx \frac{Z T_x/2}{T_M^2 2\sqrt{3}} = \frac{Q_f}{2\sqrt{3}}$$

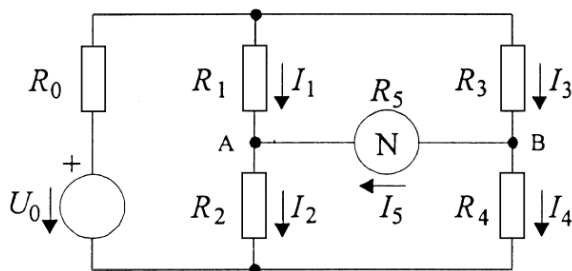
$$u_2(f) = \left| \frac{\partial f_x}{\partial \Delta\tau_2} \right| u(\Delta\tau_2) = \frac{Z}{(T_M + \Delta\tau_1 - \Delta\tau_2)^2} \frac{T_x/2}{\sqrt{3}} \approx \frac{Z T_x/2}{T_M^2 2\sqrt{3}} = \frac{Q_f}{2\sqrt{3}}$$

$$u(f) = \sqrt{u_1^2(f) + u_2^2(f)} = \frac{1}{T_M} \sqrt{\frac{1}{12} + \frac{1}{12}} = \frac{1}{T_M \sqrt{6}} = \frac{Q_f}{\sqrt{6}} = \frac{M_f}{\sqrt{6}}$$

- mejna vrednost je  $M_f = Q_f$ ,
- porazdelitev pa **trikotna.**

## MERILNI MOSTIČI IN KOMPENZATORJI

### URAVNOVEŠEN WHEATSTONOV MOSTIČ



**Ravnovesna enačba:**

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

$$\text{ali } R_1 R_4 = R_2 R_3$$

Lastnosti uravnovešenega Wheatstonovega mostiča:

- ena od štiri uporosti je merjena veličina (ponavadi  $R_1$ )
- poznati moramo  $R_2$  in stalno razmerje  $R_3$  in  $R_4$
- ali  $R_3$  in stalno razmerje  $R_2$  in  $R_4$

Če v **diagonali A-B ne teče tok**  $I_5 = 0$ , je **mostič v ravnovesju:**

- enakost napetosti:  $I_1 R_1 - I_3 R_3 = 0$  in  $I_2 R_2 - I_4 R_4 = 0$
- enakost tokov:  $I_1 = I_2$  in  $I_3 = I_4$

- notranja napetost  $U_0$  in upornost  $R_0$  napajanega vira ne vplivata na ravnovesje
- če je mostič v ravnovesju, je v ravnovesju tudi mostič z zamenjanima položajema napetostnega vira in ničelnega indikatorja.

- ločljivost naprave in standardna negotovost:**

$$u(R)_q = \frac{(\Delta R)_q}{2\sqrt{3}} - \text{čim manjša proti } u_c(R_x)$$

## LOČLJIVOST MOSTIČA

### Ločljivost Wheatstonovega mostiča:

$$\delta_q = \frac{(\Delta R_1)_q}{R_{10}} = \frac{(\Delta I_5)_q}{U_0} \left[ R_{10} + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \left( \frac{R_{10}}{R_2} + 2 + \frac{R_2}{R_{10}} \right) \right]$$

### STANDARDNA NEGOTOVOST ZARADI LOČLJIVOSTI

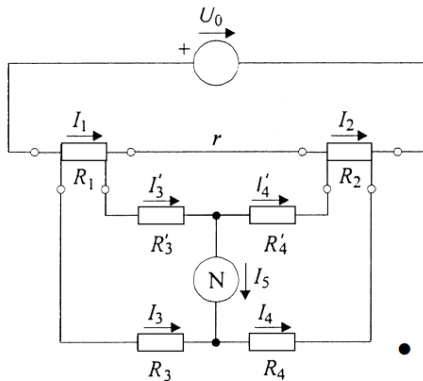
$$w(R_1)_q = \frac{u(R_1)_q}{R_{10}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{(\Delta R_1)_q}{R_{10}} = \frac{\delta_q}{2\sqrt{3}}$$

### MERILNO OBMOČJE WHEATSTONOVEGA MOSTIČA

- zgornja meja:  $\approx 10\text{M}\Omega$
- spodnja meja:  $\approx 0,1\Omega$

### URAVNOVEŠEN THOMSONOV (KELVINOV) MOSTIČ

- Uporablja se za merjenje upornosti od  $0,1\mu\Omega$  do  $1\Omega$



- v ravnovesju je  $I_5 = 0$

Ravnovesna enačba:

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4} + \frac{r R'_4}{r + R'_3 + R'_4} \left( \frac{R_3}{R_4} - \frac{R'_3}{R'_4} \right)$$

- če je  $R_3/R_4$  enako razmerju  $R'_3/R'_4$ :

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4}$$

- se ne razlikuje od enačbe za Wheatstonov mostič.
- ker absolutne enakosti razmerij ni, **enačbo uporabljamo pri nizkih  $r$ .**

**O enakosti  $R_3/R_4 = R'_3/R'_4$  se lahko eksperimentalno prepričamo, če vez med  $R_1$  in  $R_2$  prekinemo:**

$$\frac{R_1 + R'_3}{R_2 + R'_4} = \frac{R_3}{R_4} \quad R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4} + R'_4 \left( \frac{R_3}{R_4} - \frac{R'_3}{R'_4} \right)$$

### LOČLJIVOST KELVINOVEGA MOSTIČA

Če napajamo mostič s stalnim tokom  $I_0$ :

$$\frac{U_0}{R_3 + R_4} = I_3 = I_0 \frac{R_{10} + R_a + R_2 + R_b}{R_{10} + R_a + R_2 + R_b + R_3 + R_4} \approx I_0 \frac{R_{10} + R_2}{R_3 + R_4} = I_0 \frac{R_{10}}{R_3}$$

$$\text{enačba: } \delta_q = \frac{(\Delta I_5)_q}{U_0} (R_3 + R_4) \left[ 2 + R_g \frac{R_3 + R_4}{R_3 R_4} \right]$$

$$\text{v: } \delta_q = \frac{(\Delta I_5)_q}{I_0 R_{10}} \left[ 2R_3 + R_g \left( 1 + \frac{R_3}{R_4} \right) \right] \text{ ali: } \delta_q \approx \frac{(\Delta U_5)_q}{I_0 R_{10}} \left( 1 + \frac{R_3}{R_4} \right)$$

## ODKLONSKI WHEATSTONOV MOSTIČ

Odklon indikatorja je sorazmeren merjeni veličini.

- pretvornik merjene veličine v enosmerno napetost

### Tipi odklonskega mostiča

- Četrtnski mostič

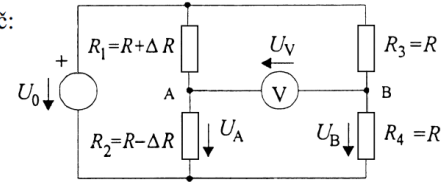
- če so v izhodišču vse štiri **upornosti enake**, je izhodna napetost **četrtnskega** mostiča:

$$U_V = U_0 \frac{(R + \Delta R)R - R^2}{(2R + \Delta R)2R} \quad \text{oz.} \quad U_V = \frac{1}{4} U_0 \frac{\Delta R/R}{1 + \frac{1}{2} \Delta R/R}$$

- če so **spremembe majhne**, je **linearna odvisnost**:

$$\frac{\Delta R}{R} \ll 1 \Rightarrow U_V \approx \frac{1}{4} U_0 \frac{\Delta R}{R}$$

Polovični mostič:



Slika 2.9b Odklonski polovični Wheatstonov mostič

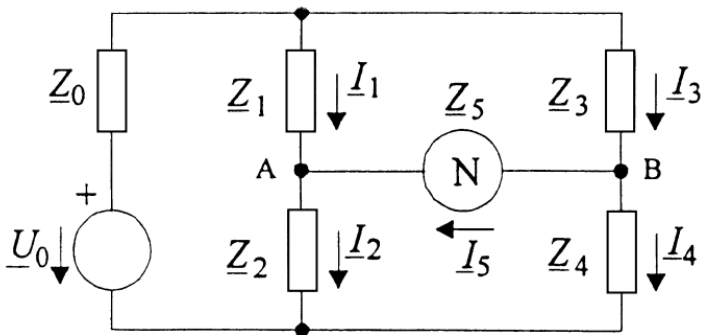
$$U_V = U_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

- Dobimo **linearno karakteristiko** neodvisno od spremembe upornosti:

$$U_5 = U_0 \frac{(R + \Delta R)R - R(R - \Delta R)}{(R + \Delta R + R - \Delta R)(R + R)} \quad U_V = \frac{1}{2} U_0 \frac{\Delta R}{R}$$

Če uporabljamo za **napajanje** mostičev **tokovni vir** (tok mostiča  $I_0$  je stalen), se **linearnost mostičev izboljša!**

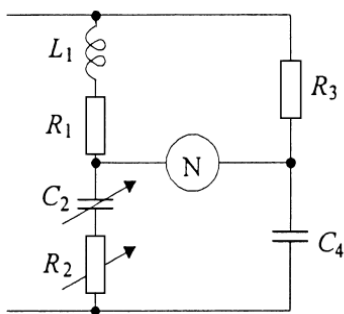
## IZMENIČNI MOSTIČ



- Upornosti zamenjajo impedance in vse veličine dobijo kompleksni značaj
- Ravnovesna enačba:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad \text{ali} \quad Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

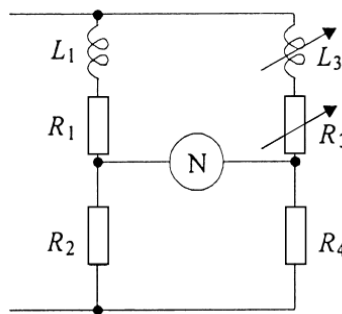
### Mostiči razmerja



a) Owenov mostič

$$R_1 + j\omega L_1 = \frac{Z_3}{Z_4} \left( R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right),$$

$$\frac{Z_3}{Z_4} = j\omega R_3 C_4$$



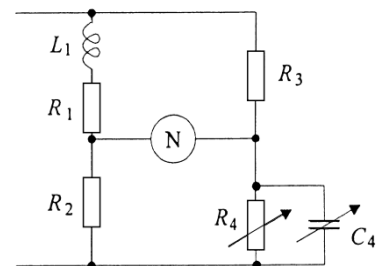
b) Maxwellov mostič

$$R_1 + j\omega L_1 = \frac{Z_2}{Z_4} (R_3 + j\omega L_3)$$

$$\frac{Z_2}{Z_4} = \frac{R_2}{R_4}$$

### Mostiči produkta

Maxwell-Wienov mostič:



$$R_1 + j\omega L_1 = Z_2 Z_3 \left( \frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right)$$

## MERILNA TOČNOST

Merilna točnost je odvisna od:

- točnosti uporabljenih elementov,
- in ločljivosti, če ni dovolj občutljiv,
- vpliva spreminjanja elementov pri višjih frekvencah,
  - nezadostna izolacija,
  - medsebojne induktivnosti,
  - stresane kapacitivnosti itn.

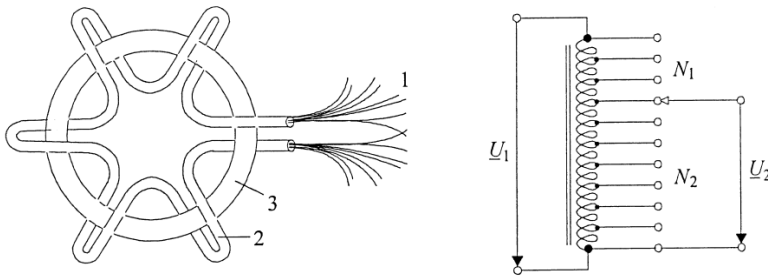
Z okloptivijo lahko vplive stresanih kapacitivnosti zmanjšamo.

- zaradi šestih elementov in zemlje je teh kar deset.
- z okloptivijo bolj določimo stresane kapacitivnosti.

## MOSTIČ Z INDUKTIVNIM DELILNIKOM

Bistveni element je **napetostni transformator z odcepi** – induktivni delilnik,

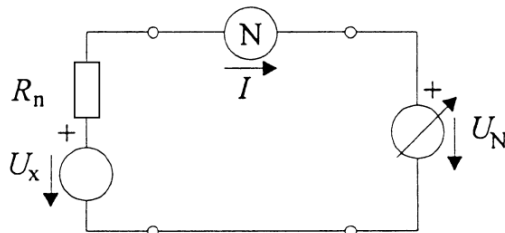
- sestavljen je ponavadi iz desetih enakih delnih navitij, ki so navita na isto jedro in zaporedoma zvezana.



## ENOSMERNI KOMPENZATOR

Neznano napetost  $U_x$  izmerimo tako, da jo primerjamo z znano  $U_N$ , ki jo spreminjamo.

- **kompenziramo** neznano napetost.



Pri izravnavi čez ničelni indikator ne teče noben tok  $I \rightarrow 0$ ,

- $U_x - U_N = 0 \Rightarrow U_x = U_N$ 
  - **merjeni vir ni obremenjen!**
  - $u(U_x) \cong u(U_N)!$

## IZMENIČNI KOMPENZATOR

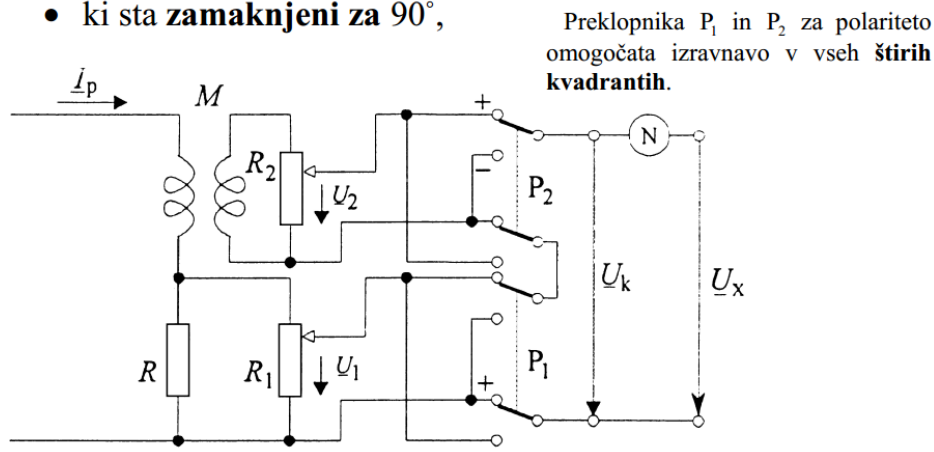
Ločimo dve izvedbi merjenja sinusne napetosti:

- z eno merimo amplitudo in fazni kot (kompleksni kompenzator), (enaka frekvenca)
- z drugo pa efektivno vrednost, (primerjamo z enosmerno napetostjo)

### Kompleksni kompenzator

Kompenzacijska napetost je sestavljena iz napetosti dveh napetosti  $\underline{U}_1$  in  $\underline{U}_2$ ,

- ki sta **zamaknjeni za  $90^\circ$** ,



- Napetost  $\underline{U}_1$  je v fazi s pomožnim tokom  $\underline{I}_p$ :

$$\underline{U}_1 = k_1 R_1 \underline{I}_p \frac{R}{R + R_1} \quad \bullet \quad k_1 R_1 \text{ del upora za kompenzacijo}$$

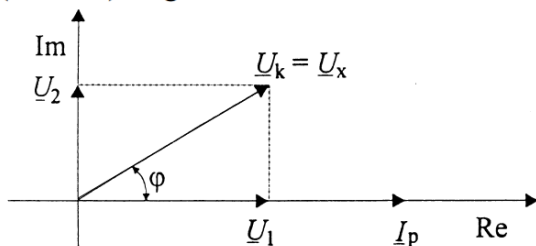
- Napetost  $\underline{U}_2$  prehiteva pomožni tok  $\underline{I}_p$  za  $90^\circ$  zaradi medsebojne induktivnosti  $M$ :

$$\underline{U}_2 = k_2 j \omega M \underline{I}_p \quad \underline{I}_p = \hat{i}_p e^{j\omega t} \Rightarrow \underline{U}_2 = M \frac{d\underline{I}_p}{dt} = j \omega M \underline{I}_p$$

**Izravnava:**

- ničelni indikator  $\underline{I} = 0$ :  $\Rightarrow \underline{U}_x = \underline{U}_k = \underline{U}_1 + \underline{U}_2$

Kazalčni (fazorski) diagram ob izravnavi



Slika 2.26 Fazorski diagram ob izravnavi

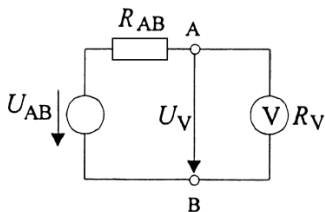
- amplituda:  $U_x = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$ ,
- fazni kot:  $\varphi = \arctg \frac{U_2}{U_1}$ .
- frekvenčna analiza za eno komponento!

# MERJENJE ELEKTRIČNIH VELIČIN

## MERJENJE NAPETOSTI IN TOKA

Vključitev merilnih instrumentov ima za posledico spremembo razmer.

### Priključitev voltmetra



Napetost med sponkama A, B po priključitvi voltmetra:

$$U_V = U_{AB} \frac{R_V}{R_V + R_{AB}}$$

- Relativna sprememba napetosti:

$$\frac{\Delta U}{U_{AB}} = \frac{U_V - U_{AB}}{U_{AB}} = -\frac{1}{1 + R_V/R_{AB}}$$

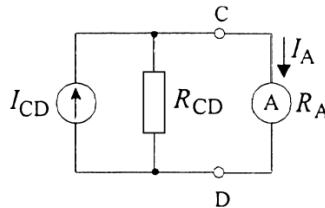
- **napetost je manjša,**
- odvisna od razmerja  $\frac{R_V}{R_{AB}}$
- Če učinek priključitve (končne vrednosti upornosti)

zanemarimo, naredimo **sistematični pogrešek** merilne metode:

$$e = -\frac{1}{1 + R_V/R_{AB}}$$

**Uporaba kompenzatorjev** nam kljub končnim upornostim omogoča  $R_V \rightarrow \infty!$

### Vključitev ampermetra



Tok med sponkama C, D po vključitvi ampermetra (pred tem je bila kratka vez):

$$I_A = I_{CD} \frac{R_{CD}}{R_{CD} + R_A}$$

Relativna sprememba toka:

$$\frac{\Delta I}{I_{CD}} = \frac{I_A - I_{CD}}{I_{CD}} = -\frac{1}{1 + R_{CD}/R_A}$$

- **tok je manjši,**
- odvisna od razmerja  $\frac{R_{CD}}{R_A}$

Če učinek priključitve (končne vrednosti upornosti)

zanemarimo, naredimo **sistematični pogrešek**:

$$e = -\frac{1}{1 + R_{CD}/R_A}$$

## MERJENJE MOČI

Trenutna moč kot produkt napetosti  $u$  in toka  $i$  na dostopu vezja:  $p = i u$

**Delovna moč** je enaka **srednji vrednosti**:

$$P = \lim_{T_i \rightarrow \infty} \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} u i dt = \overline{u i}$$

- Če sta veličini **periodični** je dovolj integral v **eni periodi**:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$$

- Če sta veličini **sinusni**:

$$u = \hat{u} \sin(\omega t + \varphi_u),$$

$$i = \hat{i} \sin(\omega t + \varphi_i), \quad \varphi_u - \varphi_i = \varphi$$

- **trenutna moč**:

$$p = \hat{u} \hat{i} \sin(\omega t + \varphi_u) \sin(\omega t + \varphi_i) =$$

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos \varphi (2\omega t + \varphi_u + \varphi_i)$$

- **delovna moč** je srednja vrednost – **enosmerna komponenta**:

$$P = UI \cos \varphi$$

Delovna moč s **kompleksnimi veličinami**:

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{U I^*\}$$

$$U = \hat{u} e^{j\varphi_u}; \quad I = \hat{i} e^{j\varphi_i}; \quad I^* = \hat{i} e^{-j\varphi_i}$$

**Navidezna moč** je produkt efektivnih vrednosti  $U$  in  $I$ :

$$S = U \cdot I$$

- neodvisno od oblike

**Celotna jalova moč** (fiktivna moč  $P_f$ ):

$$P_f = \sqrt{S^2 - P^2}$$

- pri **sinusni obliki** se skrči v **jalovo moč**:

$$Q = UI \sin \varphi \quad \text{ali} \quad Q = \frac{1}{2} \text{Im}\{UI^*\}$$

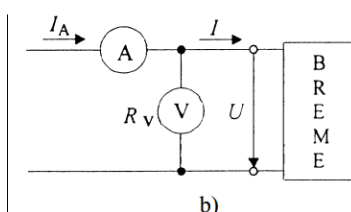
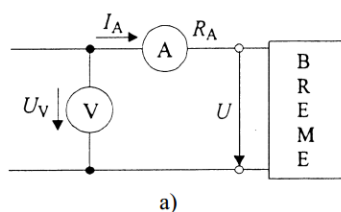
- $UI \sin \varphi = UI \sqrt{1^2 - \cos^2 \varphi}$

**Faktor moči** je razmerje delovne in navidezne moči:

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

- za sinusno obliko:  $\lambda = \cos \varphi$

### MERJENJE MOČI Z VOLTMETROM IN AMPERMETROM



- **tok je enak toku bremena**  $I = I_A$ ,
- **napetost je za padec na ampermetru večja kot napetost na bremenu**  $U_V = U + I_A R_A$ .
- **moč bremena:**  $P = UI = U_V I_A - I_A^2 R_A$
- če to zanemarimo, imamo **sistematični pogrešek:**  $E = P_i - P = I_A^2 R_A$

- **napetost je enaka napetosti na bremenu**  $U_V = U$
- **tok je za tok skozi voltmeter večji kot tok bremena**
- $I_A = I + U/R_V$ :

$$P_i = U_V I_A = U_V (I + U_V/R_V) = UI + U_V^2/R_V$$

- **moč bremena:**
- $P = U_V I_A - U_V^2/R_V$
- če to zanemarimo, imamo **sistematični pogrešek:**

$$E = P_i - P = U_V^2/R_V$$

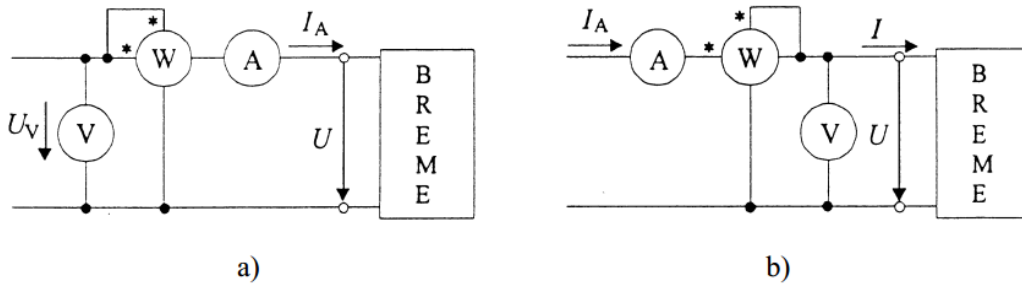
Merimo po varianti:

- z zanemarljivim sistematskim pogreškom - desetkrat manjši kot merilna negotovost
- ali po varianti z manjšim sistematskim pogreškom, prednost dajemo varianti b upornost bolje določena in neodvisna od temperature.

P → merimo vatmetri,  
Q → merimo z varmetri,  
S → merimo posredno preko efektivne vrednosti toka in napetost.

## MERJENJE MOČI NEPOSREDNO Z VATMETROM

Pri nekompenziranih vatmetrih moramo upoštevati lastno porabo.



- a) upoštevamo tudi upornost tokovne veje vatmetra  $R_{Wt}$ :  

$$P_W = UI + I_A^2 (R_A + R_{Wt})$$
- b) upoštevamo tudi upornost napetostne veje vatmetra  $R_{Wn}$ :  

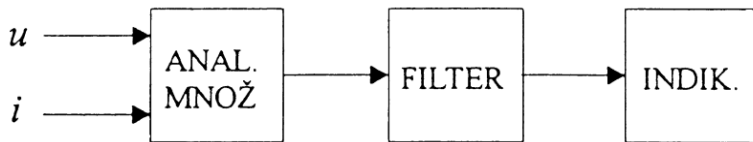
$$P_W = UI + U_V^2 (1/R_V + 1/R_{Wn})$$

## MERJENJE DELOVNE MOČI PRI PERIODIČNEM TOKU IN NAPETOSTI

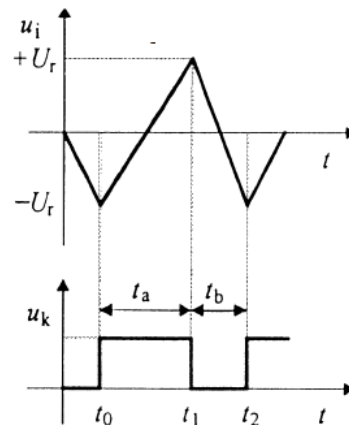
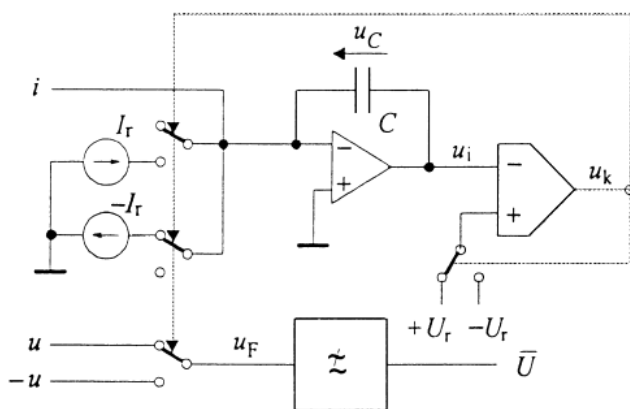
Najprej moramo tvoriti produkt trenutnih vrednosti in nato povprečno vrednost

### ELEKTRONSKI VATMETRI

- analogni postopek - množenje in povprečenje kontinuirano



- Digitalni postopek - množenje in povprečenje diskontinuirano.
- Osrednji del analognega postopka je analogni množilnik.
  - varianta z amplitudno-širinsko modulacijo,
  - varianta s Hallovim množilnikom ...
- Množilnik z amplitudno-širinsko modulacijo
  - Širina impulza se modulira s tokom



Čas  $t_a$ : V času od  $t_0$  do  $t_1$  sta na vhod integratorja (kondenzator  $C$  v negativni povratni zanki ojačevalnika) pripeljana toka :  
 - merjeni  $i$  in referenčni  $-I_r < i$

- napetost na izhodu integratorja začne naraščati od  $-U_r$  do  $+U_r$ . Velja:

$$u_i \approx u_c \Rightarrow (i - I_r) + C \frac{du_i}{dt} = 0 \quad \text{in} \quad \int_{-U_r}^{+U_r} du_i = -\frac{1}{C} \int_{t_0}^{t_1} (i - I_r) dt$$

- ker je  $t_a \ll T$ , je  $i \approx \text{konst.}$ :  $2U_r = -\frac{i - I_r}{C} t_a \Rightarrow t_a = \frac{2U_r C}{I_r - i}$

Čas  $t_b$ : V času od  $t_1$  do  $t_2$  sta na vhod integratorja (kondenzator  $C$  v negativni povratni zanki ojačevalnika) pripeljana toka :

- merjeni  $i$  in referenčni  $I_r > i$

- napetost na izhodu integratorja začne padati od  $+U_r$  do  $-U_r$ . Velja:

$$u_i \approx u_c \Rightarrow (i + I_r) + C \frac{du_i}{dt} = 0 \quad \text{in} \quad \int_{+U_r}^{-U_r} du_i = -\frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} (i + I_r) dt$$

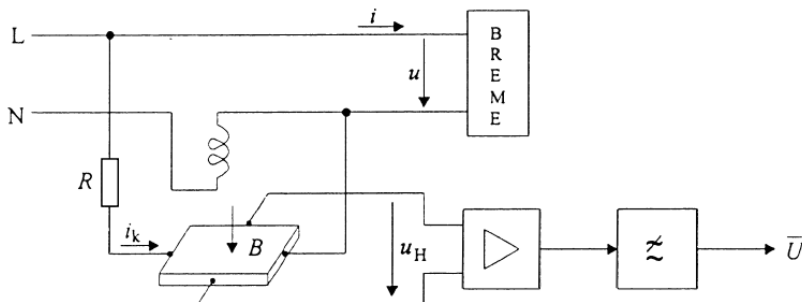
- rešitev za  $t_b$ :  $-2U_r = -\frac{i + I_r}{C} t_b \Rightarrow t_b = \frac{2U_r C}{I_r + i}$

Na izhodu filtra dobimo enosmerno komponento – povprečno vrednost:

$$\bar{U} = \frac{t_a u + t_b (-u)}{t_a + t_b} \quad \text{Če vstavimo } t_a = \frac{2U_r C}{I_r - i} \quad \text{in} \quad t_b = \frac{2U_r C}{I_r + i}:$$

$$\text{dobim } \bar{U} = \frac{1}{I_r} \overline{ui} = \frac{1}{I_r} P$$

### HALLOV MNOŽILNIK



Slika 3.11 Hallov množilnik

- Napetost  $u_H$  je odvisna od:

- krmilnega toka  $i_k \propto u$ ,

- magnetne indukcije  $B \propto i$   $u_H = \frac{1}{ned} i_k B(t) = k \cdot ui = k \cdot p$

- temperaturna odvisnost,
- visoka frekvenčna meja.

## DIGITALNI POSTOPEK

Pri digitalnem postopku jemljemo vzorce napetosti in toka sočasno.

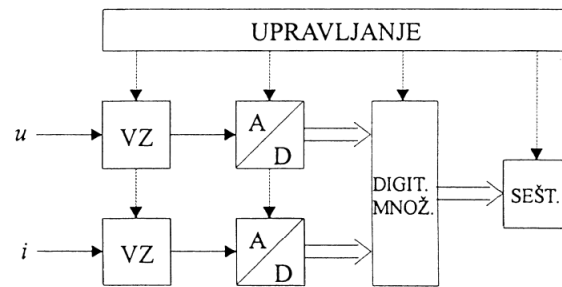
- s pomočjo dveh vzorčno-zadržnih členov

$$P = \frac{1}{NT_s} \sum_{j=0}^{N-1} U_j I_j T_s = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} U_j I_j$$

$T_s$  - perioda vzorčenja

$NT_s$  - čas merjenja mora biti

**mnogokratnik** periode  $T$



## MERJENJE DELOVNE MOČI PRI SINUSNEM TOKU IN NAPETOSTI

Sinusna napetost omogoča vrsto možnosti merjenja:

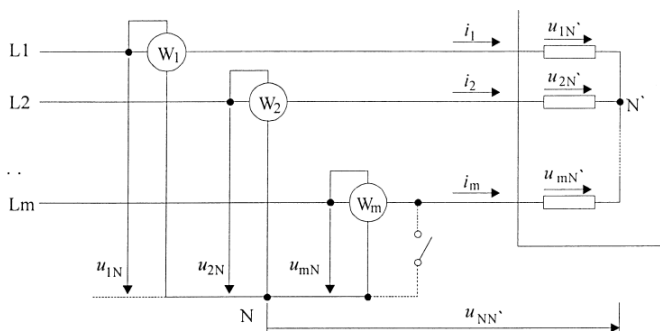
- napetost, tok in kot med njima,
- napetost in 'delovna komponenta' toka itn

## MERJENJE DELOVNE MOČI V TRIFAZNEM SISTEMU

Trifazni sistem je lahko: - trivoden,  
- štirivoden.

Za pravilno merjenje delovne moči moramo upoštevati Blondelov teorem:

- V sistemu z  $m$  vodniki izmerimo (celotno) delovno moč tako, da seštejemo odčitke  $m$  vatmetrov, ki imajo tokovne veje v posameznih vodnikih, napetostne veje pa od posameznih vodnikov v skupno točko.
- Če je skupna točka eden od vodnikov, potrebujemo  $m-1$  vatmetrov!



$$u_{1N'} = u_{1N} + u_{NN'}, \quad u_{2N'} = u_{2N} + u_{NN'}, \quad \dots, \quad u_{mN'} = u_{mN} + u_{NN'}$$

Delovne moči posameznih vej:  $P_1 = \overline{u_{1N'} i_1}, \dots, P_m = \overline{u_{mN'} i_m}$

Moči posameznih vatmetrov:  $P_{W1} = \overline{u_{1N} i_1}, \dots, P_{Wm} = \overline{u_{mN} i_m}$

Breme:

$$P_1 = \overline{u_{1N'} i_1}, \dots, P_m = \overline{u_{mN'} i_m}$$

Vatmetri:

$$P_{W1} = \overline{u_{1N} i_1}, \dots, P_{Wm} = \overline{u_{mN} i_m}$$

Celotna moč bremena:  $P = P_1 + P_2 + \dots + P_m$

$$P = \overline{(u_{1N} + u_{NN'}) i_1} + \overline{(u_{2N} + u_{NN'}) i_2} + \dots + \overline{(u_{mN} + u_{NN'}) i_m}$$

$$P = \overline{u_{1N} i_1} + \overline{u_{2N} i_2} + \dots + \overline{u_{mN} i_m} + \overline{u_{NN'} (i_1 + i_2 + \dots + i_m)}$$

Ker je  $i_1 + i_2 + \dots + i_m = 0$ , sledi:

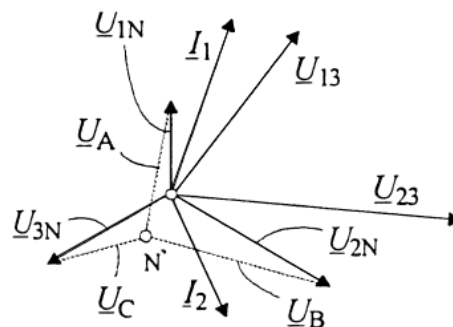
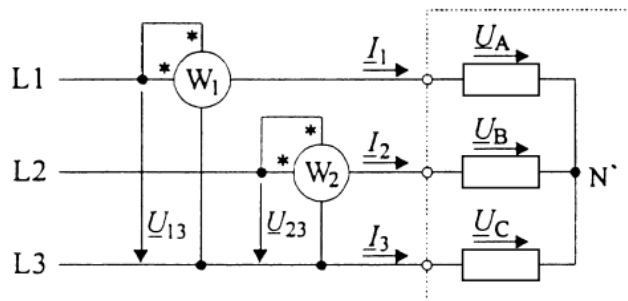
$$P = \overline{u_{1N} i_1} + \overline{u_{2N} i_2} + \dots + \overline{u_{mN} i_m} - \text{vsota moči vatmetrov}$$

**Vsota moči vatmetrov je neodvisna od potenciala skupne točke napetostnih vej vatmetrov N.**

## MERJENJE DELOVNE MOČI V TRIFAZNEM TRIVODNEM

V trivodnem sistemu merimo delovno moč z dvema vatmetroma v Aronovi vezavi.

- breme je lahko nesimetrično – neenake impdance,
- vir je lahko neuravnovešen – neenake napetosti.



Velja :  $P = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{\underline{U}_A \underline{I}_1^* + \underline{U}_B \underline{I}_2^* + \underline{U}_C \underline{I}_3^*\}$  Pri sinusni obliki lahko uporabimo za analizo kompleksni račun.

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

$$\text{ali } P = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{(\underline{U}_A - \underline{U}_C) \underline{I}_1^*\} + \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{(\underline{U}_B - \underline{U}_C) \underline{I}_2^*\}$$

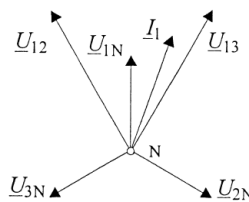
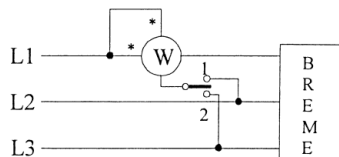
- **Delovna moč je enaka vsoti moči:**

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

**TRIFAZNI VIR JE URAVNOVEŠEN** (simetrično breme in uravnovežen vir)

- Zadostuje da izmerimo moč samo v eni fazi.  $P = 3 \cdot P_W$

Skupno moč pri uravnovešenem sistemu lahko zmerimo z **dvema meritvama**:



- **preklopnik v položaju 1:**

$$P_{W1} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{\underline{U}_{12} \underline{I}_1^*\} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{(\underline{U}_{1N} - \underline{U}_{2N}) \underline{I}_1^*\}$$

- **preklopnik v položaju 2:**

$$P_{W2} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{\underline{U}_{13} \underline{I}_1^*\} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{(\underline{U}_{1N} - \underline{U}_{3N}) \underline{I}_1^*\}$$

Vsota odčitkov je:

$$P_{W1} + P_{W2} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{(\underline{U}_{1N} - \underline{U}_{2N}) \underline{I}_1^* + (\underline{U}_{1N} - \underline{U}_{3N}) \underline{I}_1^*\}$$

- ker je  $-(\underline{U}_{2N} + \underline{U}_{3N}) = \underline{U}_{1N}$ , dobimo:

$$\Rightarrow P_{W1} + P_{W2} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{3 \underline{U}_{1N} \underline{I}_1^*\} = P$$

## MERJENJE JALOVE MOČI V TRIFAZNEM SISTEMU

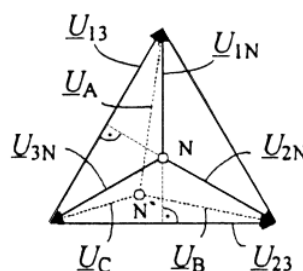
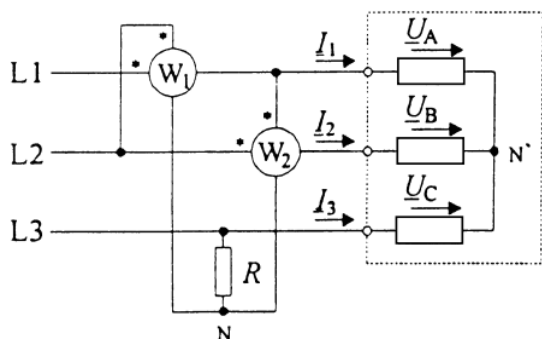
Merimo jo z varmetri ali z vatmetri.

- Ker je jalova moč imaginarni del, imamo podobna vezja in izpeljave, kot pri delovni moči.

$$Q = \frac{1}{2} \text{Im}\{U_A I_1^* + U_B I_2^* + U_C I_3^*\} \quad \text{Velja pri merjenju z varmetrom}$$

Merjenje z vatmetri: Napetostne veje moramo priključiti na napetosti, ki za 90 stopinj zaostajajo za napetostmi pri delovni moči. (uravnotežen vir, breme ni nujno simetrično)

## MERJENJE JALOVE MOČI V TRIFAZNEM TRIVODNEM SISTEMU



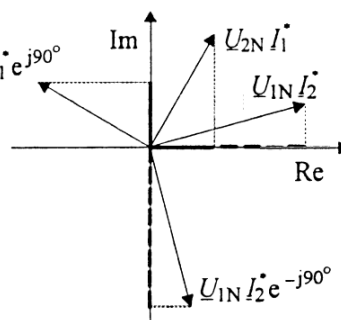
Iz fazorskega diagrama  $U_A - U_C = U_{13} = \sqrt{3}U_{2N} e^{j90^\circ}$

$$U_B - U_C = U_{23} = \sqrt{3}U_{1N} e^{-j90^\circ}$$

Preoblikujemo v  $Q = \frac{1}{2} \text{Im}\{\sqrt{3}U_{2N} I_1^* e^{j90^\circ} + \sqrt{3}U_{1N} I_2^* e^{-j90^\circ}\}$

$$Q = \sqrt{3} \left[ \frac{1}{2} \text{Im}\{U_{2N} I_1^* e^{j90^\circ}\} + \frac{1}{2} \text{Im}\{U_{1N} I_2^* e^{-j90^\circ}\} \right]$$

$$Q = \sqrt{3} \left[ \frac{1}{2} \text{Re}\{U_{2N} I_1^*\} - \frac{1}{2} \text{Re}\{U_{1N} I_2^*\} \right]$$



Pri enakih upornostih velja:  $Q = \sqrt{3} (P_{W1} - P_{W2})$

## MERJENJE JALOVE MOČI V ŠTIRIVODNEM SISTEMU

- napetosti so za  $\sqrt{3}$  krat večje
  - zaostajajo za 90 stopinj
- $$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_{W1} + P_{W2} + P_{W3})$$

Pozorni moramo biti na pravilno priključitev vhodnih (označene z \*) in izhodnih sponk, še posebej pri jalovi moči,

- induktivni značaj  $Q > 0$ ,
- kapacitivni značaj  $Q < 0$ .

Če signali niso sinusni moramo določiti jalovo moč preko delovne in navidezne moči!

## MERJENJE UPORNOSTI

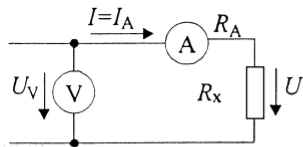
### NADOMESTNO VEZJE PASIVNEGA DVOPOLA

Upornost sestavlja:

- realna ohmska komponenta,
- in jalova upornost ali reaktanca

## METODE MERJENJA UPORNOSTI

### U-I metoda merjenja upornosti



- tok je pravilen:  $I_A = I$ ,
- napetost je prevelika:  $U_V = U + IR_A$

Razmerje je **večje** kot  $R_x$ :  $\frac{U_V}{I_A} = \frac{U + IR_A}{I} = R_x + R_A$

- če upoštevamo samo  $U_V$  in  $I_A$ , je **sistematični pogrešek**:

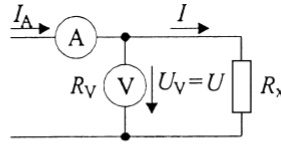
$$R_i = \frac{U_V}{I_A} \Rightarrow e = \frac{U_V/I_A - R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x}$$

Ta metoda se uporablja **za merjenje velikih upornosti**,

- pogrešek ( $R_A$ ) je zanemarljiv.

Pri **zelo velikih upornostih** moramo upoštevati **dopustno obremenitev**  $U^2/R_x$ .

**Merilna negotovost** je odvisna od negotovosti pri merjenju napetosti in toka.



- napetost je pravilna:  $U_V = U$ ,
- tok je prevelik:  $I_A = I + U_V/R_V$ ,

Razmerje je **manjše** kot  $R_x$ :  $\frac{U_V}{I_A} = \frac{R_x R_V}{R_x + R_V}$

- če upoštevamo samo  $U_V$  in  $I_A$ , je **sistematični pogrešek**:

$$R_i = \frac{U_V}{I_A} \Rightarrow e = \frac{U_V/I_A - R_x}{R_x} = -\frac{R_x}{R_x + R_V} \approx -\frac{R_x}{R_V}$$

Ta metoda se uporablja **za merjenje majhnih upornosti**,

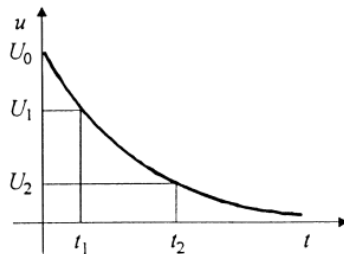
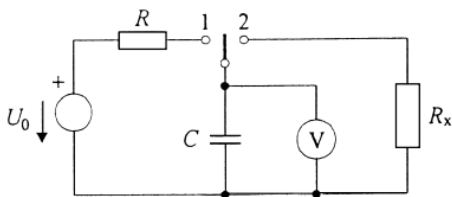
- upornost  $R_V$  je praviloma dosti večja od  $R_x$ .

Pri **zelo majhnih upornostih** moramo upoštevati **dopustno obremenitev**  $U^2/R_x$ .

**Merilna negotovost** je odvisna od negotovosti pri merjenju napetosti in toka.

### METODA PRAZNIENJA KONDENZATORJA

- Primerna za velike upornosti.



$$U_1 = U_0 e^{-t_1/R_x C}$$

$$U_2 = U_0 e^{-t_2/R_x C}$$

↓

$$\text{Neznana upornost je: } R_x = \frac{t_2 - t_1}{C \ln U_1/U_2}$$

- položaj 1: kondenzator se **nabije** na napetost  $U_0$ .
- položaj 2: kondenzator se **začne prazniti** pretežno preko  $R_x$  (izolacijska upornost in  $R_V$  zelo veliki).
  - v času  $t_1$ :  $U_1 = U_0 e^{-t_1/R_x C}$ ;
  - v času  $t_2$ :  $U_2 = U_0 e^{-t_2/R_x C}$

Če izolacijske upornosti in  $R_V$  **ne moremo zanemariti**:

- prva meritev brez  $R_x$ :  $R_1 = R_i \parallel R_V$ ,
- druga meritev z  $R_x$ :  $R_2 = R_i \parallel R_x$ ,

$$\text{• neznana upornost je: } R_x = \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2}$$

## MERJENJE INDUKTIVNOSTI

- Induktivnost (idealne tuljave) je razmerje med napetostjo in časovnim odvodom toka.
- Meritve izvajamo pri sinusni obliki toka
- Določimo jo iz reaktance, ker je realno vedno prisotna še ohmska upornost.

**Serijsko** nadomestno vezje

$$U_2 = U \sin \varphi = IX_s = I\omega L_s \Rightarrow L_s = \frac{U \sin \varphi}{\omega I}$$

**Paralelno** nadomestno vezje

$$I_2 = I \sin \varphi = \frac{U}{X_p} = \frac{U}{\omega L_p} \Rightarrow L_p = \frac{U}{\omega I \sin \varphi}$$

### Faktor kvalitete tuljave

- Faktor kvalitete Q tuljave je razmerje jalove moči z delovno

- serijsko** nadomestno vezje:  $Q = \frac{I^2 \omega L_s}{I^2 R_s} = \frac{\omega L_s}{R_s}$

- paralelno** nadomestno vezje:  $Q = \frac{U^2 / \omega L_p}{U^2 / R_p} = \frac{R_p}{\omega L_p}$

## MERJENJE KAPACITIVNOSTI

Kapacitivnost (idealnega) kondenzatorja je razmerje med tokom in časovnim odvodom napetosti.

- Meritve izvajamo pri sinusni obliki toka
- ali preko praznjenja (polnjenja) kondenzatorja.

REALNI KONDENZATOR (upor + idealni kondenzator)

Pri **serijskem** nadomestnem vezju lahko **izgube** ponazorimo s **tangensom izgubnega kota  $\delta$** :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{IR_s}{I(1/\omega C_s)} = \omega R_s C_s$$

Pri **paralelnem** nadomestnem vezju je **tangens izgubnega kota  $\delta$**  enak razmerju tokov  $I_{R_p} / I_{C_p}$ :

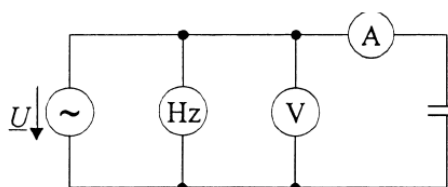
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U/R_p}{U/(1/\omega C_p)} = \frac{1}{\omega R_p C_p}$$

Če napetost in tok **nista sinusne oblike**, izražamo izgube s **faktorjem izgub  $d$**  (faktor disipacije) preko moči:

$$d = \frac{P}{\sqrt{S^2 - P^2}} \quad \text{- splošna oblika!}$$

## METODE MERJENJA KAPACITIVNOSTI

### U-I metoda merjenja kapacitivnosti



Razmerje napetosti in toka je:

$$C_x \frac{U}{I} = Z = \sqrt{R^2 + 1/(\omega C_x)^2} = \frac{1}{\omega C_x} \sqrt{1 + d^2} \approx \frac{1}{\omega C_x}$$

- iskana kapacitivnost je:  $C_x = \frac{I}{\omega U}$

- Merjeni veličini morata biti sinusne oblike!
- Pogrešek pri dodani tretji harmonski komponenti:

$$u = \hat{u}_1 \sin \omega t + \hat{u}_2 \sin 3\omega t$$

- tok skozi kondenzator C:

$$i = C \frac{du}{dt} = \omega C \hat{u}_1 \cos \omega t + 3\omega C \hat{u}_3 \cos 3\omega t$$

če se instrumenta **odzivata na efektivno** vrednost, kažeta:

$$U = \sqrt{\left(\frac{\hat{u}_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{\hat{u}_3}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$I = \sqrt{\left(\frac{\omega C \hat{u}_1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{3\omega C \hat{u}_3}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

Razmerje  $U/I$  je odvisno od višjih harmonskih k.:

$$\frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C} \sqrt{\frac{1 + (\hat{u}_3/\hat{u}_1)^2}{1 + (3\hat{u}_3/\hat{u}_1)^2}}$$

- računana kapacitivnost  $C_x = \frac{I}{\omega U}$  je prevelika:

$$\hat{u}_3/\hat{u}_1 = 5\% \Rightarrow e = +1\%$$

- če se instrumenta **odzivata na usmerjeno** vrednost, kažeta:

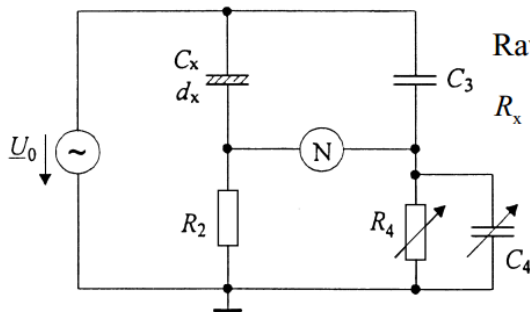
$$U_r = \frac{U_v}{1,11} = \frac{2}{\pi} \left( \hat{u}_1 + \frac{1}{3} \hat{u}_3 \right), \quad I_r = \frac{I_A}{1,11} = \omega C \frac{2}{\pi} (\hat{u}_1 - \hat{u}_3)$$

$$\hat{u}_3/\hat{u}_1 = 5\% \Rightarrow e = -7\%$$

Merilno **točnost**  $U-I$  metode **povečamo** s **substitucijo etalona kapacitivnosti**.

### SCHERINGOV MOSTIČ

- Uporaben je za merjenje dielektričnih izgub pri visokih napetostih in visokih frekvencah (neodvisen od frekvence).
- spada med mostiče produkta:  $\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 = \text{konst.}$



Ravnovesna enačba:

$$R_x + \frac{1}{j\omega C_x} = \frac{R_2}{j\omega C_3} \left( \frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right)$$

$$C_x = C_3 \frac{R_4}{R_2}, \quad R_x = R_2 \frac{C_4}{C_2},$$

$$d_x = \omega R_4 C_4$$

### MERJENJE FREKVENCE

Za periodično veličino je frekvenca temeljni parameter.

- merimo jo tudi posredno prek merjenja periode

### METODE MERJENJA FREKVENCE

a) Po digitalnem postopku jo merimo z elektronskim števcem.

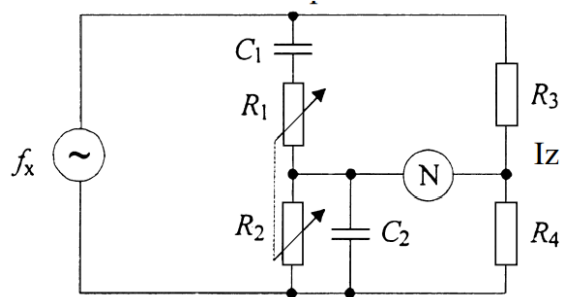
b) Po analognem načinu jo merimo:

- s frekvenčno odvisnimi pasivnimi elementi
  - ponekod v industrijskih okoljih se še uporablja frekvenc-metre z jezički (jeklene vzmeti), ki temeljijo na mehanski resonanci.
- s primerjavo s signalom z znano frekvenco,
- s pretvorbo v impulzno veličino.

## MERJENJE FREKVENCE S FREKVENČNO ODVISNIMI PASIVNIMI ELEMENTI

### Wien-Robinsonov mostič

Zgrajen s **frekvenčno odvisnimi** pasivnimi elementi.



$$Z_1 = R_1 + 1/j\omega C_1, \quad Z_3 = R_3$$

$$Y_2 = 1/R_2 + j\omega C_2, \quad Z_4 = R_4$$

Iz ravnovesne enačbe  $Z_1 \cdot Y_2 = Z_3/Z_4$  dobimo:

$$\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} = \frac{R_3}{R_4}, \quad \omega^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$R_1 = R_2 = R, \quad C_1 = C_2 = C \Rightarrow R_3 = 2R_4$$

$$f_x = \frac{1}{2\pi RC}$$

- merilno območje: od nekaj Hz do 100 kHz,
- točnost  $\approx 0,1\%$ .

## MERJENJE MAGNETNEGA POLJA V ZRAKU

Značilnost magnetnega polja je Coulomb-Lorentzova sila, ki deluje na prečni nosilce elektrine:

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Merjenje magnetnega polja pogosto temelji na Faradeyevem zakonu:

$$u_1 = -N \frac{d\phi}{dt}$$

- napetost v **tuljavici** z  $N$  ovoji se inducira pri **spremembi magnetnega pretoka**

Ločimo dva načina poteka magnetnega pretoka:

- Pretok je stalen:  
Spremembo dosežemo:
  - z zasukom tuljavice,
  - tuljavico potegnemo iz polja
  - tuljavico v polje potisnemo,
  - polje vklopimo, izklopimo ali komutiramo.
- pretok je izmeničen (splošno nesinusen).

V prvem primeru je **sprememba enkratna**,

- **informacija** o magnetnem pretoku se skriva v **ploščini inducirane napetosti**,
- napetostni impulz merimo s **fluksmetrom**:

$$\Delta\phi = \frac{1}{N} \int_0^t u_1 dt = \frac{k_F y}{N}$$

Fluksmetre izpodrivajo **elektronski voltmetri z digitalizacijo** inducirane napetosti:

$$\int_0^t u_1 dt = \sum_{k=1}^N U_{ik} T_s = T_s \sum_{k=1}^N U_{ik}$$

- $U_{ik}$  - diskretna vrednost  $k$ -tega vzorca,
- $T_s$  - perioda vzorčenja

- **povprečna vrednost** izmerjene napetosti je:

$$T_s \sum_{k=1}^N U_{ik} = NT_s \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_{ik} = NT_s \bar{U} = T_M \bar{U}$$

$T_M$  - čas merjenja

- **magnetna indukcija** je:  $\Delta B = \frac{T_M \bar{U}}{NA}$

## MAGNETILNE KRIVULJE

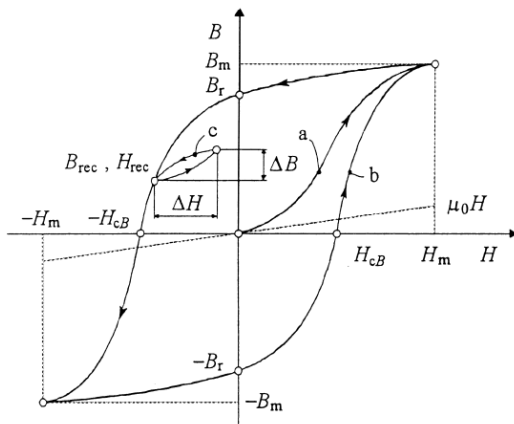
Krivulja, ki povezuje magnetno indukcijo  $B$  (ali  $J$  ali  $M$ ) in jakost magnetnega toka  $H$  je magnetilna krivulja ali magnetilnica

Magnetilnice feromagnetnih snovi so nelinearne. Ločimo:

- statične magnetilnice,
  - spreminjanje jakosti polja ne vpliva na samo magnetilnico (nekaj Hz).
- dinamične magnetilnice,
  - magnetilnica se zaradi hitrosti spreminjanja polja spremeni.

Značilnost magnetilnice je **histerezna zanka**:

- Če nevtralen feromagnetik **izpostavimo** magnetnemu **polju** in ga **nato odstranimo**, indukcija ne pade nazaj na nič,
  - To preostalo vrednost imenujemo **remanenčna magnetna indukcija**.
- Če želimo **odpraviti remanenčno** magnetno indukcijo, moramo feromagnetik **izpostaviti nasprotno usmerjenem** magnetnemu **polju s koercitivno poljsko jakostjo**.



## SPECIFIČNE IZGUBE

Energija, ki je potrebna za en obhod zanke je sorazmerna njeni površini,

$$\oint H dB \quad - \text{spremeni se v toplotno energijo}$$

- enota za  $H$  je:  $A/m$ ,
- enota za  $B$  je:  $T = Vs/m^2$
- enota za energijo za en histerezni cikel na enoto prostornine je tako:  $J/m^3$

Če je  $f$  obhodov histerezne zanke v časovni enoti in ima snov gostoto  $\rho$  dobimo **specifične izgube**  $P_s$  v  $W/kg$ .

Z večanjem frekvence  $f$  se dodajajo še **vrtilne izgube**

- zaradi spreminjanja m. pretoka se v snovi **inducira napetost**, ki požene t.i. **vrtilne tokove** na ohmski upornosti feromagnetika.
- **histerezna zanka** je zaradi vrtilnih izgub **večja** kot statična zanka.

**Specifične izgube**  $P_s$  so sestavljene iz :

- **histereznih izgub**  $P_h$  in
  - **vrtilnih izgub**  $P_e$ .
- $$P_s = P_h + P_e = \frac{f}{\rho} \oint H dB$$

Pomembna je tudi **oblika magnetenja** ( $B$  in  $H$ ).

- vrtilne izgube so ponavadi podane za sinusno obliko

Pri **zelo nizkih**  $B$  in **visokih frekvencah** (telekomunik.) pridejo do izraza preostale izgube (absorpcijske itd.).

### MERJENJE JAKOSTI MAGNETNEGA POLJA

A) prek magnetilnega toka

Kadar je magnetni krog sklenjen v materialu (toroid ali trakovi zloženi v krožno obliko), določimo  $H$  iz magnetilnega toka in srednje dolžine silnice.

$$H = \frac{\oint \vec{H} d\vec{s}}{l_{sr}} = \frac{IN}{l_{sr}}$$

- za toroid velja:  $l_{sr} = 2\pi \frac{(r_z - r_n)}{\ln(r_z/r_n)}$ 
  - če  $(r_z - r_n) \leq r_z/5$  potem:  $l_{sr} = \pi(r_n + r_z)$

B) merjenje magnetne indukcije v zraku  $B_0$  tik ob merjencu.

Z merjenjem  $B_0$  tik ob merjencu lahko ugotovimo  $H$  v merjencu, ker prehaja tangencialna komponenta jakosti polja zvezno iz enega sredstva (feromagnetik) v drugo (zrak).

$$H = \frac{B_0}{\mu_0}$$

- $B_0$  merimo s Hallovo sondo ali indukcijsko tuljavico,
- če se merjencu **ne moremo dovolj približati**, merimo na **več razdaljah in ekstrapoliramo**.

## MERJENJE V IZMENIČNEM MAGNETNEM POLJU

Območje uporabe feromagnetnih snovi leži pri omrežni frekvenci in akustičnem področju.

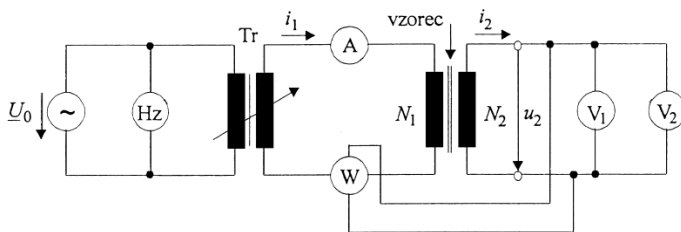
- zaradi vrtničnih tokov se povečajo izgube,
- oblike magnetnih krivulj se spreminjajo.

Pomembna je **vrsta magnetnega polja**:

- če je **magnetilni tok izmeničen**
  - histerezna zanka **je simetrična** (**normalna histerezna zanka**),
- če je izmeničnemu toku dodamo še **enosmerni tok**
  - histerezna zanka **ni simetrična** (**superpozicijska histerezna zanka**),
    - pri usmerniških transformatorjih, gladilnih dušilkah itn.
- če je feromagnetik v **rotirajočem m. polju**, rotacijske histerezne izgube padajo proti nič z naraščajočo indukcijo.

## SPECIFIČNE IZGUBE

- Če nas zanimajo le izgube (ne oblika histerezne zanke) jih merimo z vatmetrom



Slika 3.64 Merjenje izgub z vatmetrom

Izgube podajamo:

- pri **sinusnem poteku** magnetne indukcije,
- z določeno **maksimalno vrednostjo** (neorientirana pločevina do  $B_m = 1,5\text{T}$ , orientirana do  $B_m = 1,8\text{T}$ ),
- v frekvenčnem območju od 15 Hz do 100 Hz.

**Celotne izgube** feromagnetne pločevine so:

$$P_w = P_c + \frac{U_2^2}{R_i} \rightarrow P_c = P_w - \frac{U_2^2}{R_i}$$

- in **celotne specifične izgube**:  $P_s = \frac{P_c}{m_a} = \frac{1}{m_a} \left( P_w - \frac{U_2^2}{R_i} \right)$

Za tanko pločevino v **območju akustičnih frekvenc** velja:

$$P_s = aB_m^n f + b \frac{d^2 B_m^2 F^2 f^2}{\rho} = P_h + P_e$$

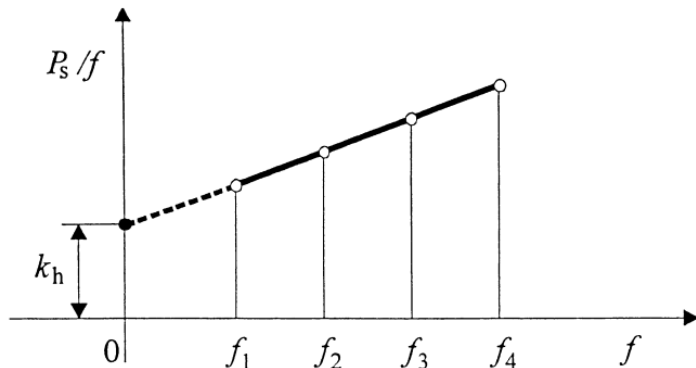
- **Specifične izgube** so sestavljene iz:
  - **histereznih specifičnih izgub**  $P_h = aB_m^n f$ ,
    - opisuje jih **Steinmetzov zakon**,
      - za silicijevo železo je  $n \approx 1,6$ ,
    - **od frekvence so linearno** odvisne.
  - **vrtinčnih specifičnih izgub**  $P_e$ 
    - spreminjajo se s kvadratom  $B_m$ , frekvence, ...

### LOČEVANJA IZGUB

$P_s$  ločimo na  $P_h$  in  $P_e$ :

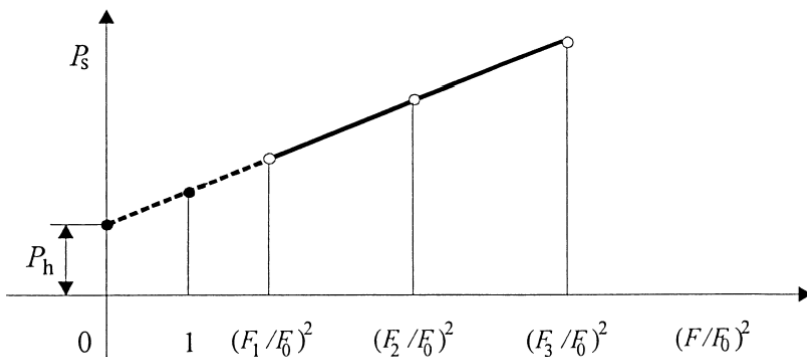
- s frekvenco (pri  $f_1$  in  $f_2 \rightarrow P_h(f), P_e(f^2)$ )

$$P_s = k_h f + k_e f^2 \rightarrow k_h = P_s / f - k_e f$$



- s faktorjem oblike (pri  $F_1$  in  $F_2 \rightarrow P_e(F^2)$ )

$$P_s = P_h + c(F/F_0)^2$$



Slika 3.66 Postopek ločevanja izgub z različnimi oblikovnimi faktorji