



4.3 Zmanjšanje in prireditev tokovnih signalov

Za zmanjšanje in prireditev tokovnih signalov uporabljamo najbolj pogosto pasivne merilne člene:

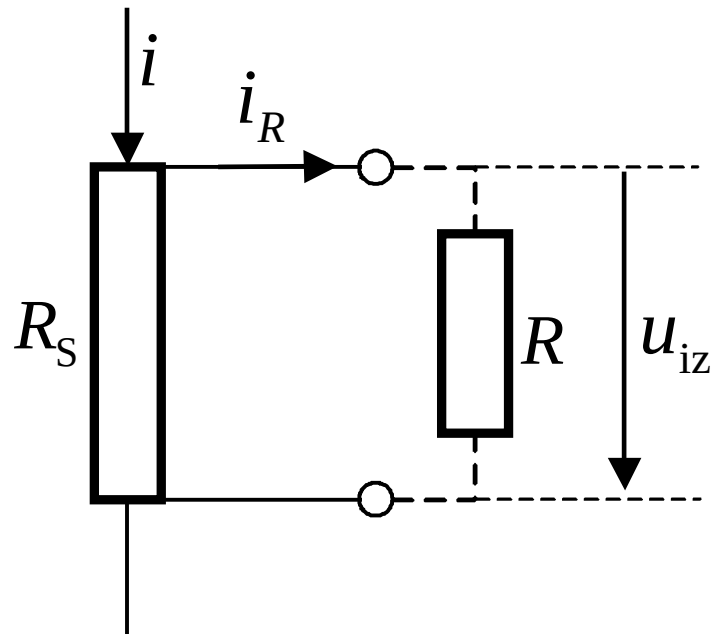
- **tokovne delilnike in**
- **tokovne merilne transformatorje.**





4.3.1 Tokovni delilnik s souporom

Osnovno shemo prilagoditve na tokovni vhod z notranjo upornostjo R predstavlja tokovni delilnik upora R in soupora R_S



$$i_R = i \frac{R_S}{R + R_S}$$

- kjer je $R_S \ll R$
- in padec napetosti:

$$u_{iz} = i_R R = i \frac{R \cdot R_S}{R + R_S}$$

Slika 4.33 Tokovni delilnik s souporom



Standardna negotovost prenosnega faktorja k se izrazi z negotovostjo samega soupora:

$$k = \frac{u_{iz}}{i} = \frac{R \cdot R_S}{R + R_S} \quad \xrightarrow{R_S \ll R} \quad k = \frac{u_{iz}}{i} \approx R_S \quad \rightarrow \quad w_k \approx w_{R_S}$$

Tudi pri souporih si stojita nasproti dve zahtevi: upornost mora biti zaradi dopustne moči $R_S < P_{\max} / I^2$ čim manjša in izhodna napetost zaradi razmerja signal/šum čim večja. Z manjšanjem upornosti se večja tudi časovna konstanta ($\tau \approx L/R$).

Za tokove do 10A se uporabljajo soupori $0,1\Omega$, $0,01\Omega$ ($P_{\max} \approx 1\text{ W} \div 10\text{ W}$).

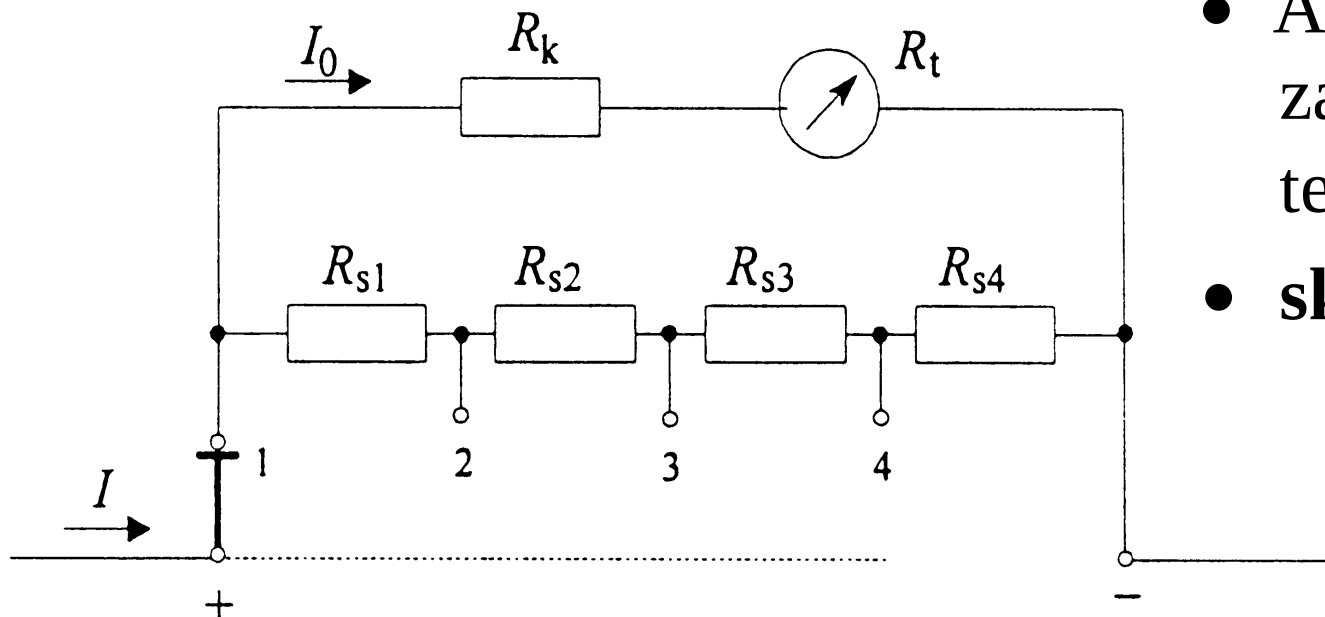




Razširitev merilnega območja ampermetra

Ampermetru razširimo merilno območje z vzporedno vezanim souporom R_s .

- Večkratni soupor imenujemo **univerzalni** ali **Ayrtonov soupor**:



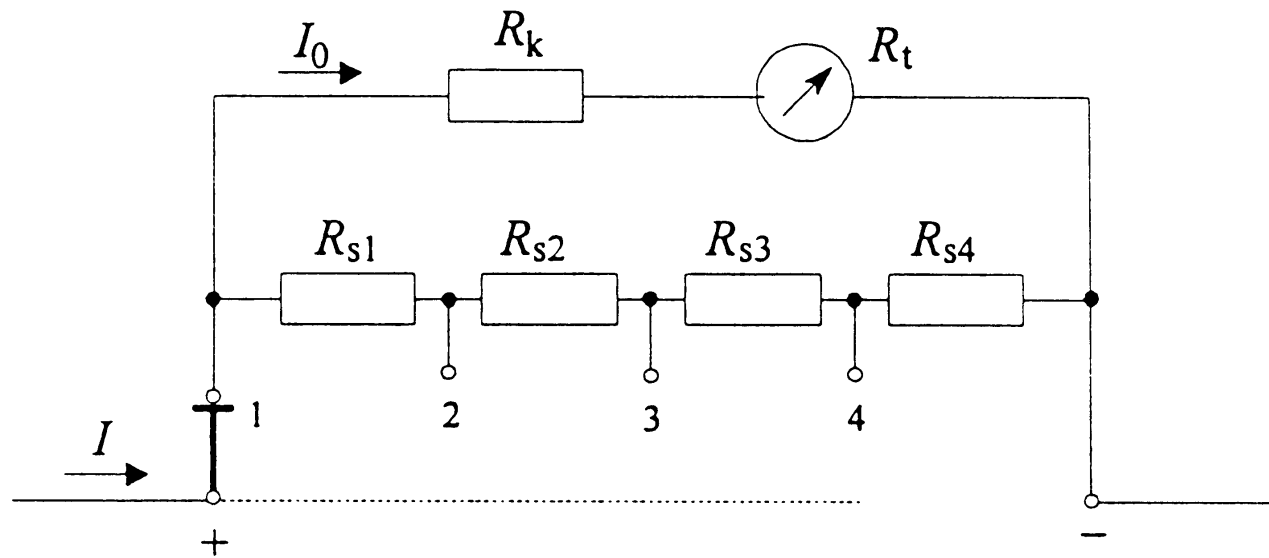
- Ampermetru lahko dodamo zaporedno upor R_k za temper. kompenzacijo.

- **skupna upornost :**

$$R_0 = R_k + R_t.$$

Slika 4.34 Razširitev merilnega območja ampermetra





Merilni doseg (narisani položaj 1) je:

$$I_1 = I_0 \frac{R_0 + R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} + R_{s4}}{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} + R_{s4}}$$

I_0 - največji tok čez sam merilni instrument.

Karakteristični padec napetosti (U_{A_0} - napetost med + in – vhodom) je malo odvisen od merilnega območja:

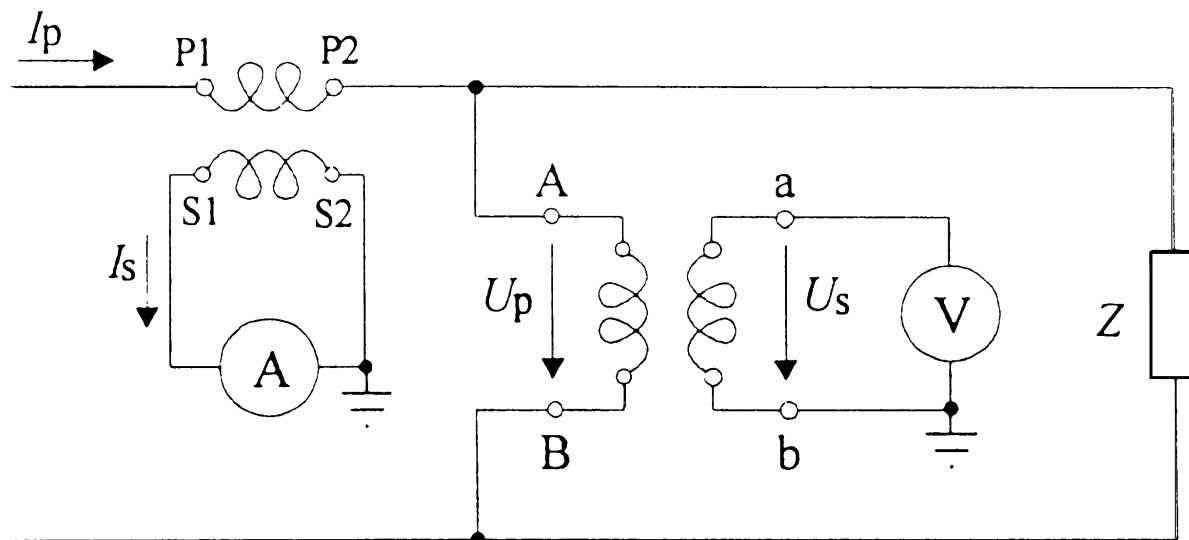
- od $I_0 R_0$ do $I_0 (R_0 + R_{s1} + R_{s2} + R_{s3}) \rightarrow U_{A_0} \doteq I_0 R_0$
- zadnji del ni bistveno večji: $R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} \ll R_0$





4.3.2 Tokovni merilni transformator (tokovnik)

Z njimi **razširimo** (zožimo) **merilno območje** ampermetrov, vatmetrov itn.



Slika 4.30 Priključek tokovnika in napetostnika

Poznati moramo **prestavo** transformatorja: $I_p = K_i I_s$

- Tok primarnega navitja dobimo tako, da tok sekundarnega navitja, ki ga merimo z ampermetrom, pomnožimo s prestavo!





Razmerje med primarnim in sekundarnim tokom – **prestava tokovnika** – je **odvisna od**:

- velikosti toka,
- bremena na sekundarni strani,
- frekvence,
- uporabljenega materiala...

Suče se okoli **nazivne vrednosti** prestave:

$K_{in} = I_{pn} / I_{sn}$ - razmerje primarnega nazivnega toka in sekundarnega nazivnega toka (podana)

- **odstopanje** je **odvisno od razreda** točnosti merilnega transformatorja.
- za izračun I_p uporabimo **nazivno prestavo**: $I_p = K_{in} I_s$





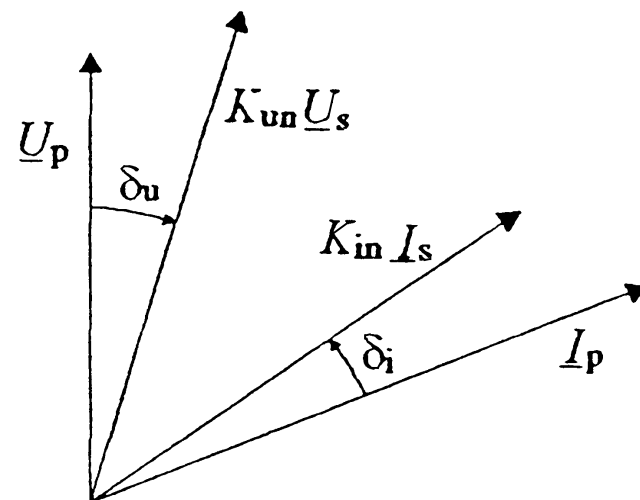
Ker **uporabljamo** pri izračunih primarnih vrednosti **nazivne** **prestave** namesto **dejanskih**, nastane **prestavni pogrešek**:

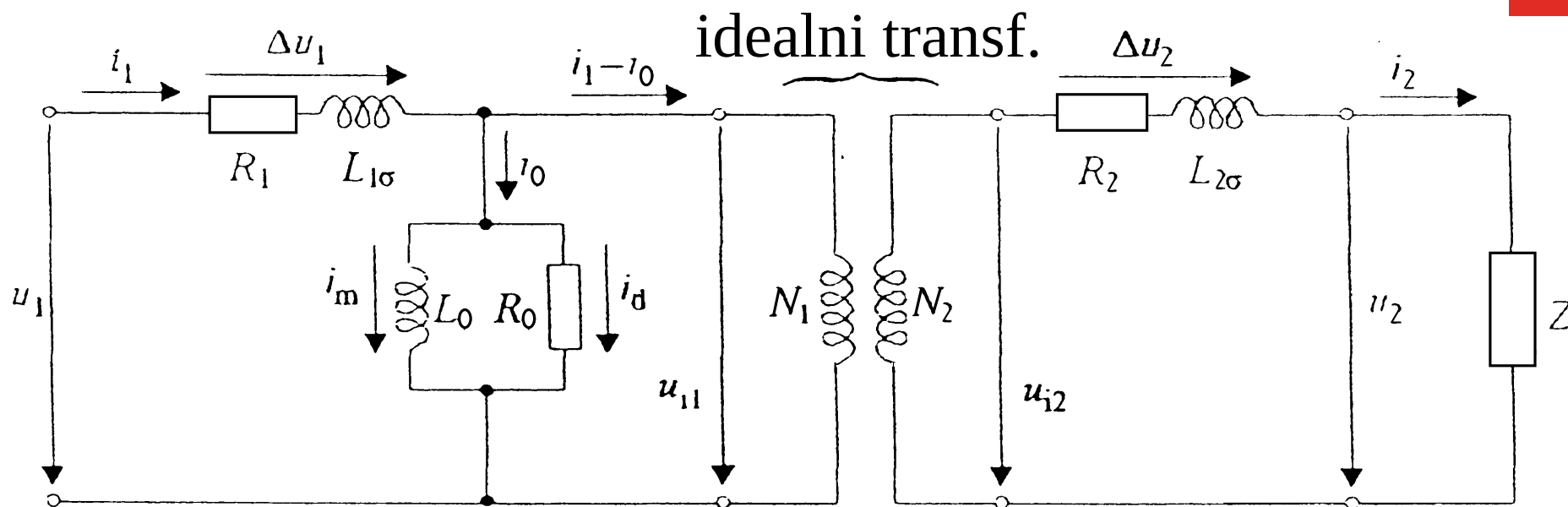
$$e = \frac{K_n - K}{K}$$

- tokovni prestavni pogrešek: $e_i = \frac{K_{in} I_s - I_p}{I_p}$

Pri posrednem merjenju moči, energije, ... moramo upoštevati tudi **kotni pogrešek**:

- **fazna razlika** med fazorjema primarnega in sekundarnega navitja.
 - po dogovoru je **pozitiven**, če **sekundar prehiteva primar**.





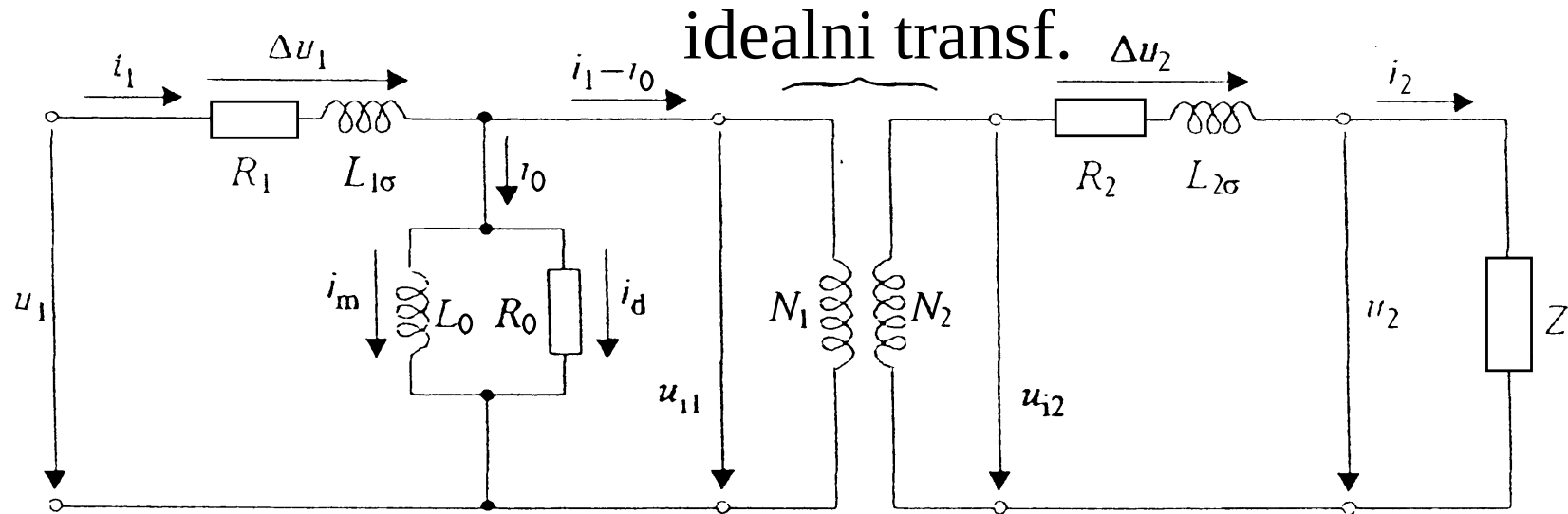
Slika 4.32 Nadomestno vezje merilnega transformatorja

Pri **tokovniku** imamo **vsiljen tok** (napetost u_1 čim manjša).

Velja: $\oint H \, ds = (i_1 - i_0)N_1 - i_2N_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad i_2 = i_1 \frac{N_1}{N_2} \left(1 - \frac{i_0}{i_1} \right)$

- **prestavo** določa **razmerje** števila **ovojev** in **tudi tok** i_0 potreben za magnetenje jedra.





Povečano breme povzroči tudi povečano magnetenje,

- višja magnetna indukcija $u_{i2} = -N_2 A dB/dt$ potegne za sabo večje magnetenje,
 - poveča se vzbujaalni tok i_0 ,
- malo se spremeni prestavno razmerje.

$$i_2 = i_1 \frac{N_1}{N_2} \left(1 - \frac{i_0}{i_1} \right)$$





Osnovni podatki tokovnih merilnih transformatorjev

Po mednarodnih priporočilih IEC 185-1987 so tokovniki razvrščeni v šest razredov:

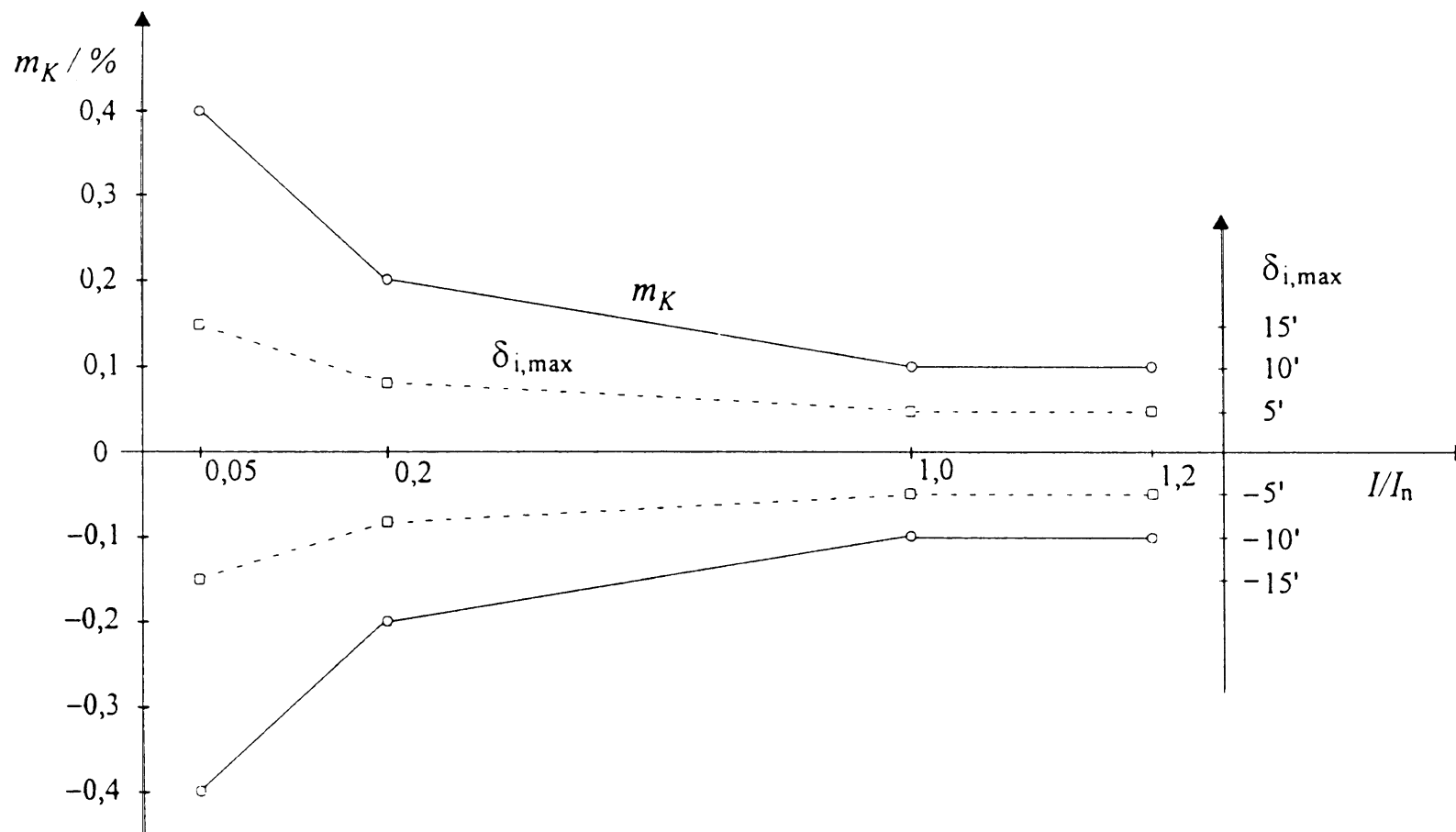
0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – 5

- **razred določa najvišji**, še dopustni prestavni **pogrešek**.

Tabela 4.2 Meje pogreškov tokovnikov

razred točnosti	meje prestavnega pogreška $\pm m_K$ v % pri tokovih				meje kotnega pogreška $\pm \delta_{i,\max}$ v minutah pri tokovih			
	$0,05 I_n$	$0,2 I_n$	$1,0 I_n$	$1,2 I_n$	$0,05 I_n$	$0,2 I_n$	$1,0 I_n$	$1,2 I_n$
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60





Slika 4.35 Značilen potek mej prestavnega in kotnega pogreška (razred 0,1)

Razreda točnosti 0,2S in 0,5S tokovnikov za posebno rabo, ki merijo od 1% do 120% nazivnega toka.





Oba pogreška morata biti znotraj predpisanih mej, če je **breme od 25% do 100% nazivnega bremena** in pri nazivni frekvenci.

Priporočene **standardne vrednosti**:

- primarni nazivni tok: $(10 - 15 - 20 - 30 - 50 - 75) \text{ A}$
- sekundarni nazivni tok: 1 A , 2 A in priporočeno 5 A ,
- **nazivna moč**: $(2,5 - 5 - 10 - 15 - 30) \text{ VA}$.
 - To je vrednost **navidezne moči**, ki jo tokovnik daje **pri nazivnem bremenu** in **nazivni vrednosti sekundarnega toka**:

$$S_n = I_{sn}^2 Z_n$$





- **nazivno breme** (primer): $Z_n = \frac{S_n}{I_{sn}^2} = \frac{5 \text{ VA}}{(5 \text{ A})^2} = 0,2 \Omega$
 - faktor moči 0,8

- 25% nazivnega bremena:

$$Z_{25\%} = \frac{S_{25\%}}{I_{sn}^2} = \frac{1,25 \text{ VA}}{(5 \text{ A})^2} = 0,05 \Omega$$

Pri uporabi moramo paziti, da **sekundarni sponki** ne ostaneta **nikdar odprti** $\Rightarrow$ inducirala bi se **zelo velika napetost**, ki je lahko nevarna (tokovni vir!).

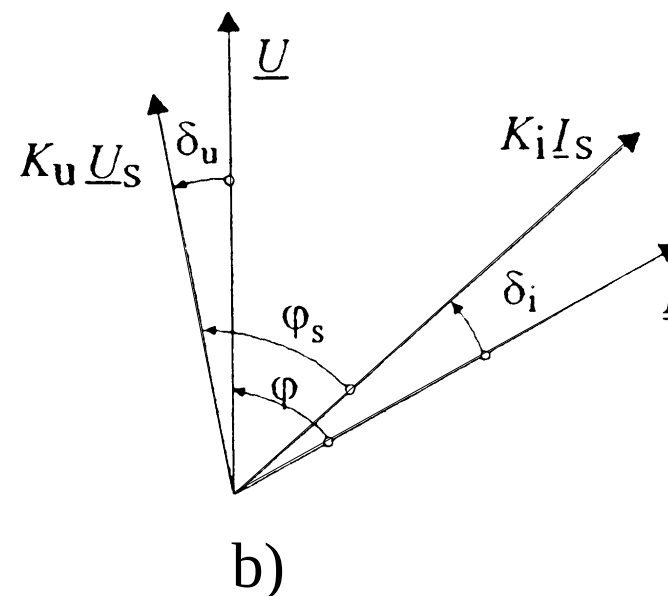
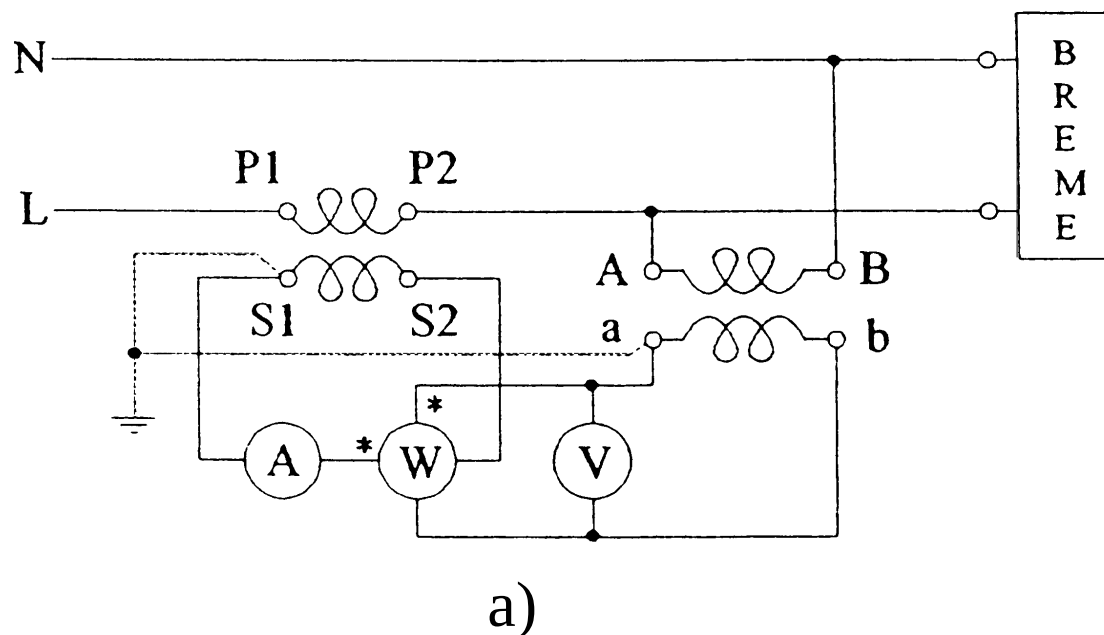




Vpliv merilnih transformatorjev na merilno negotovost

Pri merjenju **moči**, **energije** in **faktorja moči** moramo upoštevati tudi **merilne transformatorje**:

- **prestavni** pogrešek,
- **kotni** pogrešek!



Slika 4.36 Indirektno merjenje delovne moči





Delovna moč porabnika:

$$P_i = K_{un} K_{in} P_{W,i}$$

- K_{un} , K_{in} - nazivni prestavi,
- $P_{W,i}$ - kazanje vatmetra.
- Vsem trem veličinam **pripadajo negotovosti**.
- Manjkajo še prispevki **kotnih pogreškov**.

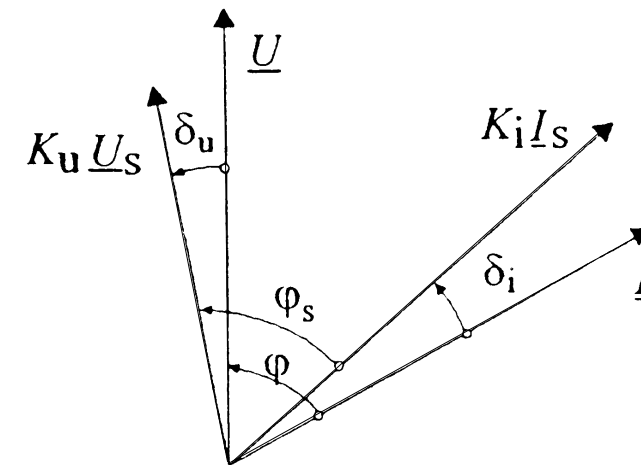
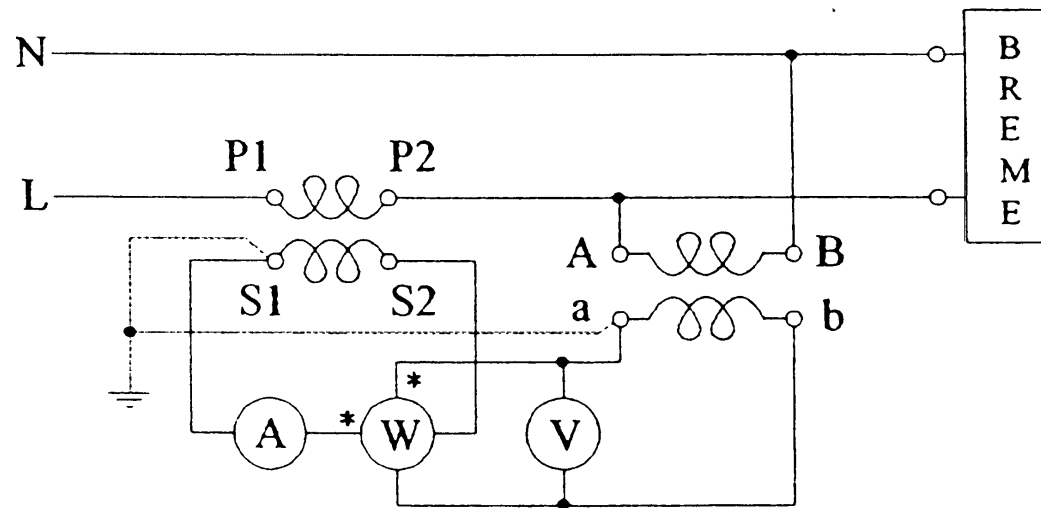
Točni vatmeter bi kazal:

$$P_W = U_s I_s \cos \varphi_s$$

Realni vatmeter (z lastnim pogreškom e_W) kaže:

$$P_{W,i} = U_s I_s \cos \varphi_s \cdot (1 + e_W)$$





Slika 4.36 Indirektno merjenje delovne moči

Prispevki merilnih transformatorjev:

- **Kotni pogreški.** Iz fazorskega diagrama:

$$\varphi_s + \delta_i = \varphi + \delta_u \quad \Rightarrow \quad \varphi_s = \varphi + \delta_u - \delta_i$$

- **Prestavni pogreški.** Nazivne prestave (približki) izrazimo z realnimi:

$$K_{un} = K_u (1 + e_u), \quad K_{in} = K_i (1 + e_i)$$





Celotna enačba s pogreški: $P_i = K_{un} K_{in} P_{W,i} \Rightarrow$

$$P_i = K_u (1 + e_u) K_i (1 + e_i) \cdot U_s I_s \cos[\varphi + (\delta_u - \delta_i)] \cdot (1 + e_w)$$

- če bi bili **vsi pogreški nič**:

$$P_i = K_u K_i \cdot U_s I_s \cos \varphi = (K_u U_s)(K_i I_s) \cos \varphi = UI \cos \varphi = P$$

- enačbo preoblikujemo:

$$P_i = (1 + e_u)(1 + e_i)(1 + e_w) \cdot UI [\cos \varphi \cos(\delta_u - \delta_i) - \sin \varphi \sin(\delta_u - \delta_i)]$$

- ker je $\cos(\delta_u - \delta_i) \approx 1$, $\sin(\delta_u - \delta_i) \approx (\delta_u - \delta_i)$:

$$P_i = (1 + e_u)(1 + e_i)(1 + e_w) \cdot UI [\cos \varphi - (\delta_u - \delta_i) \sin \varphi]$$





$$P_i = (1 + e_u)(1 + e_i)(1 + e_w) \cdot UI [\cos \varphi - (\delta_u - \delta_i) \sin \varphi]$$

- Če izpostavimo $\cos \varphi$, dobimo **izhodiščno enačbo** za račun standardne negotovosti:

$$P_i = P(1 + e_u)(1 + e_i)(1 + e_w) [1 - (\delta_u - \delta_i) \operatorname{tg} \varphi]$$

Če bi bili merilna transformatorja in vatmeter **umerjeni**, bi bila negotovost odvisna od **negotovosti umerjanja**.

Praviloma pa so instrumenti skladni s specifikacijami (**pogreški so dani z mejami**).





$$P_i = P(1 + e_u)(1 + e_i)(1 + e_w)[1 - (\delta_u - \delta_i)\text{tg}\varphi]$$

Račun prispevkov k celotni negotovosti (vrednosti pogreškov so majhne!):

$$u_1(P) = \left| \frac{\partial P_i}{\partial e_u} \right| \cdot u(e_u) \approx P \cdot u(e_u) \quad , \quad u_2(P) = \left| \frac{\partial P_i}{\partial e_i} \right| \cdot u(e_i) \approx P \cdot u(e_i)$$

$$u_3(P) = \left| \frac{\partial P_i}{\partial e_w} \right| \cdot u(e_w) \approx P \cdot u(e_w)$$

$$u_4(P) = \left| \frac{\partial P_i}{\partial \delta_u} \right| \cdot u(\delta_u) \approx P \text{tg}\varphi \cdot u(\delta_u) \quad , \quad u_5(P) = \left| \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} \right| \cdot u(\delta_i) \approx P \text{tg}\varphi \cdot u(\delta_i)$$

Celotna standardna negotovost:

$$u_C(P) = P \sqrt{u^2(e_u) + u^2(e_i) + u^2(e_w) + \text{tg}^2\varphi [u^2(\delta_u) + u^2(\delta_i)]}$$





Celotna standardna negotovost:

$$u_C(P) = P \sqrt{u^2(e_u) + u^2(e_i) + u^2(e_w) + \operatorname{tg}^2 \varphi [u^2(\delta_u) + u^2(\delta_i)]}$$

- če je **breme ohmsko**:

$$u_C(P) = P \sqrt{u^2(e_u) + u^2(e_i) + u^2(e_w)}$$

Zgled:

Koliko je (relativna) standardna negotovost

$$w_c(P) = u_c(P)/P = ?, \quad \text{če so:}$$

- transformatorji in vatmeter:
razred točnosti 0,2,
- $P_{W,i} = P_D$,
- $\alpha = 60^\circ$





- **prispevki prestavnih pogreškov in vatmetra:**

$$u(e_u) = \frac{m_{K,u}}{\sqrt{3}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 1,15 \cdot 10^{-3} = u(e_i) = u(e_w)$$

- **kotni pogrešek v radianih:**

$$u(\delta_u) = \frac{\delta_{u,\max}}{\sqrt{3}} = \frac{10 \cdot \pi / (60 \cdot 180)}{\sqrt{3}} = 1,68 \cdot 10^{-3} = u(\delta_i)$$

Iskana negotovost:

$$w_C(P) = \sqrt{(1,15 \cdot 10^{-3})^2 + (1,15 \cdot 10^{-3})^2 + (1,15 \cdot 10^{-3})^2 + \operatorname{tg}^2 60^\circ [(1,68 \cdot 10^{-3})^2 + (1,68 \cdot 10^{-3})^2]}$$

$$w_C(P) = 4,6 \cdot 10^{-3}$$

- prispevek prestavni pogreškov : $2,0 \cdot 10^{-3}$
- prispevek kotnih pogreškov: $4,1 \cdot 10^{-3}$





Če bi bil fazni kot $\varphi = 37^\circ$ ($\cos \varphi = 0,8$),

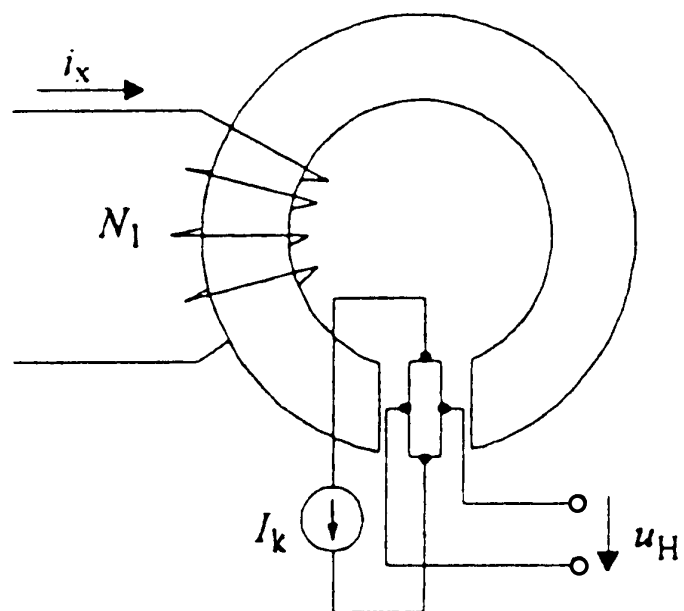
- bi bil prispevek kotnih pogreškov: $1,8 \cdot 10^{-3}$,
- in celotna standardna negotovost: $2,7 \cdot 10^{-3}$

Bliže kot smo kotu $\varphi = 90^\circ$, večji je relativni prispevek kotnih pogreškov in skupna negotovost!

$$w_C(P) \xrightarrow{\varphi \rightarrow 90^\circ} \infty$$



4.3.3 Posredno merjenje toka z uporabo magnetnega kroga.



- magnetni krog se zaključi preko **toroidnega feromagnetnega jedra**,
- jedro se vzbuja z merjenim tokom i_x preko N_1 ovojev

Slika 4.37 Merjenje toka prek magnetnega kroga s Hallovo sondo

- **v reži** se nahaja **Hallova sonda**:

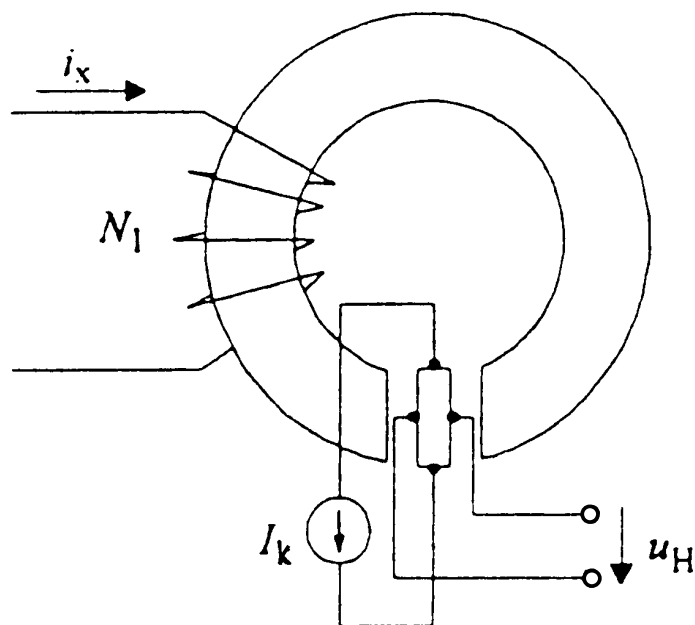
- skoraj linearna povezava:
$$u_H = \frac{1}{ned} I_k B \approx \text{konst.} \cdot i_x$$
- občutljivost sonde od nič do 10 MHz neodvisna od frekvence!
- slaba stran je v **temperaturni odvisnosti** in **nelinearnosti**.



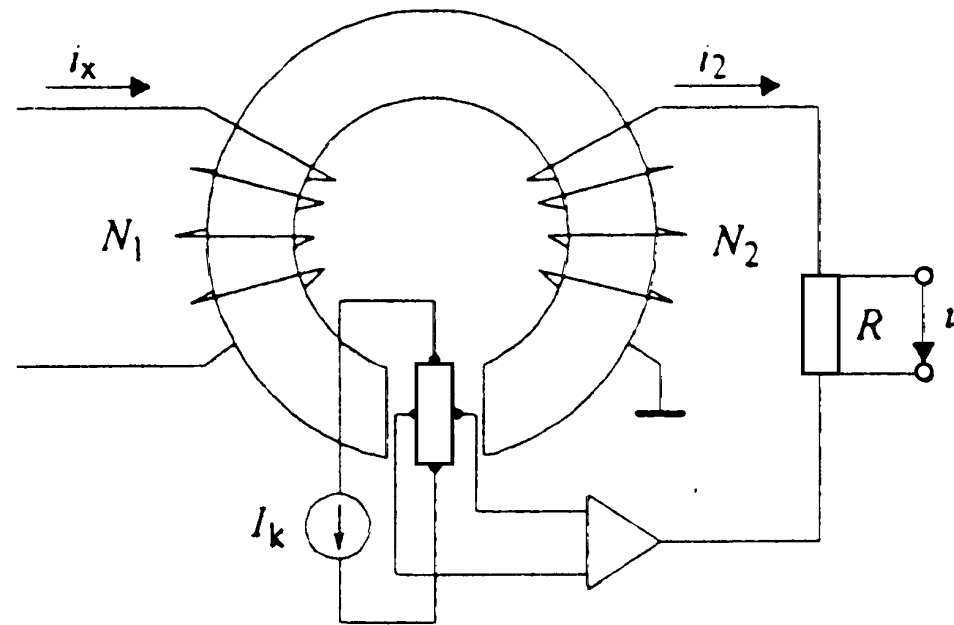


Nelinearnost izboljšamo s **kompensacijskim** navitjem (b)

- ravnotežje vzpostavimo s tokom i_2 , ki ga preko ojačevalnika krmili napetost u_H



a)

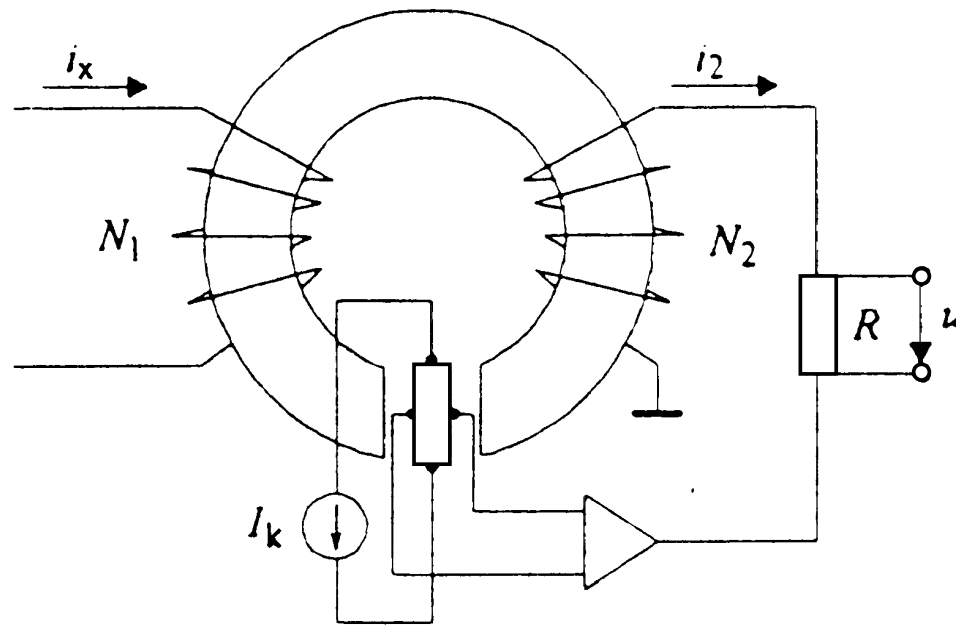
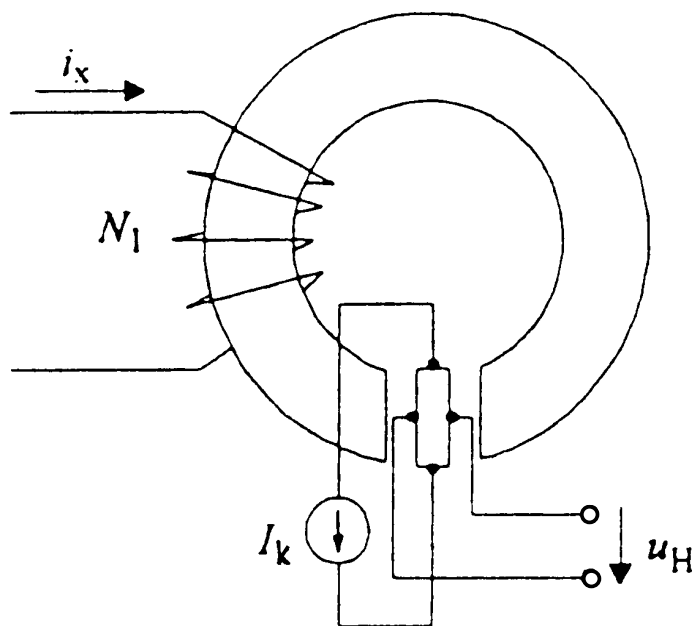


b)

Slika 4.38 Merjenje toka prek magnetnega kroga s Hallovo sondo
Kadar je **magnetni pretok kompenziran**, imamo:

$$u_H = 0 \quad \Rightarrow \quad i_x N_1 = i_2 N_2 \quad \Rightarrow \quad i_x = \frac{N_2}{N_1 R} u$$





Na tem principu temeljijo **tokovne klešče**.

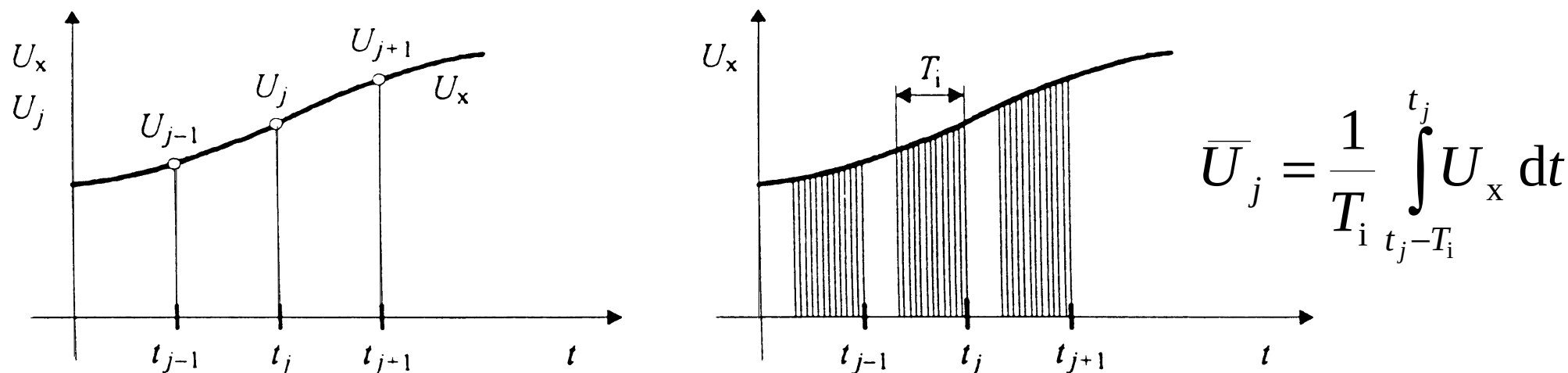
- tok merimo brez prekinitve vodnika,
- pri montaži razklenemo jedro,
- **primar ima en sam ovoj.**





4.4 Prireditev signalov za instrumente z odzivom na povprečno vrednost

Instrumenti z nizko mejno frekvenco se odzovejo na signal tako, da ovrednotijo **povprečno vrednost** in delujejo kot nizko prepustno sito. Signale zajemajo na **integracijski način**.



Slika 4.39 Trenutni in integrirajoči način zajemanja

Da bi lahko z njimi merili parametre izmeničnega signala (efektivna vrenost, temenska vrednost, itd.) uporabimo **usmerniška vezja** za prireditev.



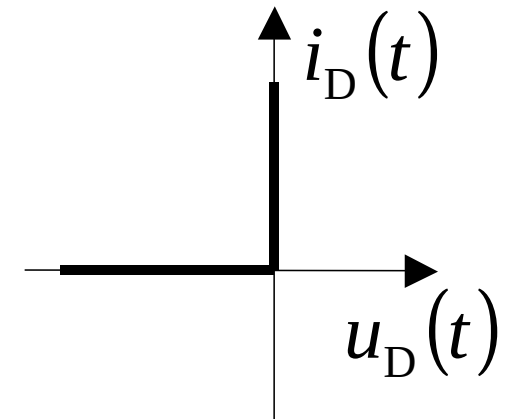
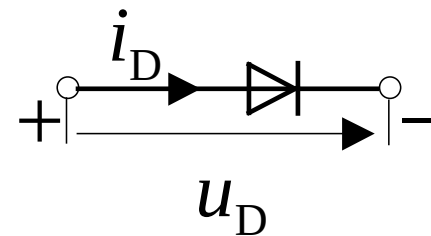


Najbolj tipični **pasivni nelinearni** element, ki se uporablja za usmerjanje signalov je **dioda**

- **Idealna dioda:**

$$i_D(t) = 0 \quad \text{za} \quad u_D(t) \leq 0$$

$$u_D(t) = 0 \quad \text{za} \quad i_D(t) \geq 0$$

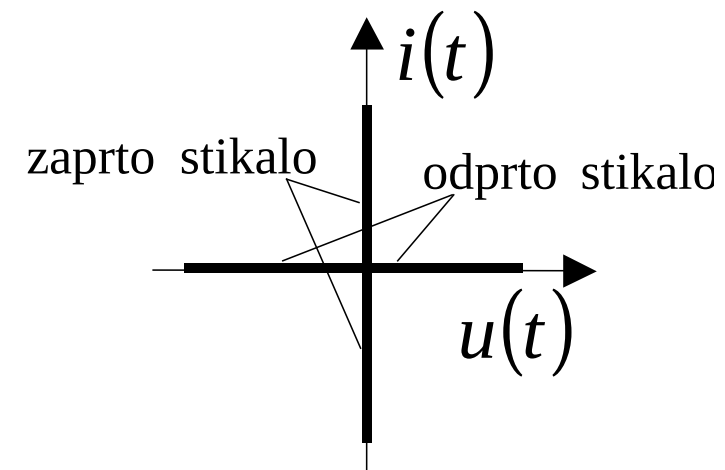
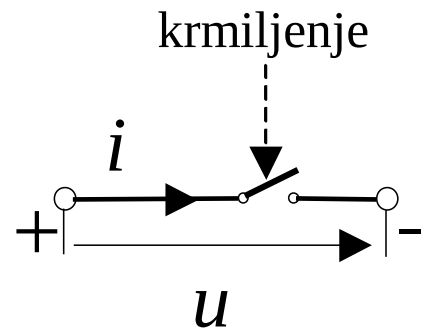


in tipični **časovno spremenljivi nelinearni** element je **stikalo**.

- **Idealno stikalo:**

$$i(t) = 0 \quad \text{- odprto stikalo}$$

$$u(t) = 0 \quad \text{- zaprto stikalo}$$





4.4.1 Instrument z odzivom na povprečno vrednost in polprevodniški usmerniki

Kadar imamo instrument z nizko mejno frekvenco, se odziva na **povprečno vrednost** signala.

- voltmeter z **integracijskim** analogno-digitalnim pretvornikom, instrument z **vrtljivo tuljavico**, itd.

Če želimo meriti z njim izmenični tok, moramo **tok** najprej **usmeriti**.

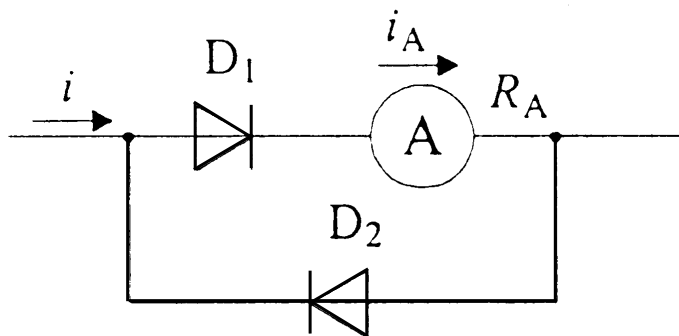
- s polprevodniškimi **diodami**. Razlikujemo
 - **polvalno** in
 - **polnovalno** usmerjanje.



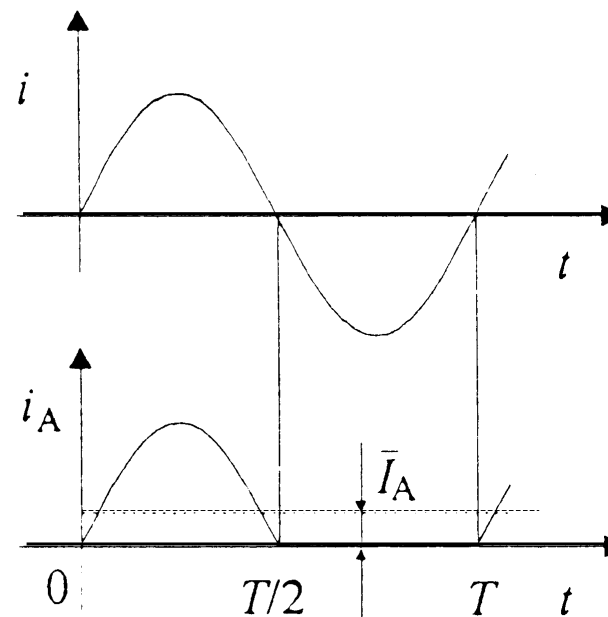


Polvalno usmerjanje:

$$\overline{I_A} = \frac{1}{T} \int_0^T i_A dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{i_m}{\omega T} \int_0^{\pi} \sin \omega t d\omega t = \frac{i_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I$$



a)



b)

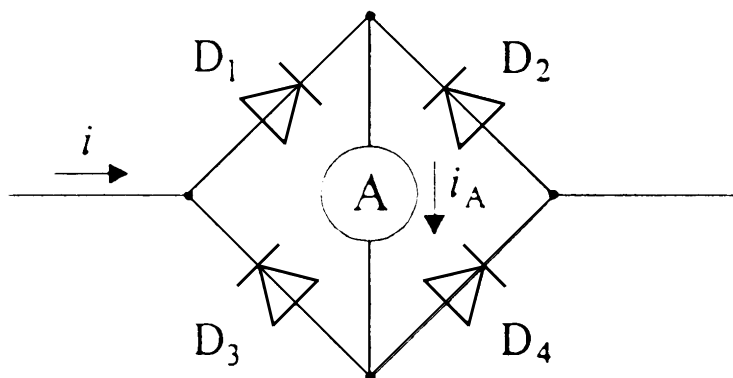
Slika 4.42 Polvalno usmerjanje



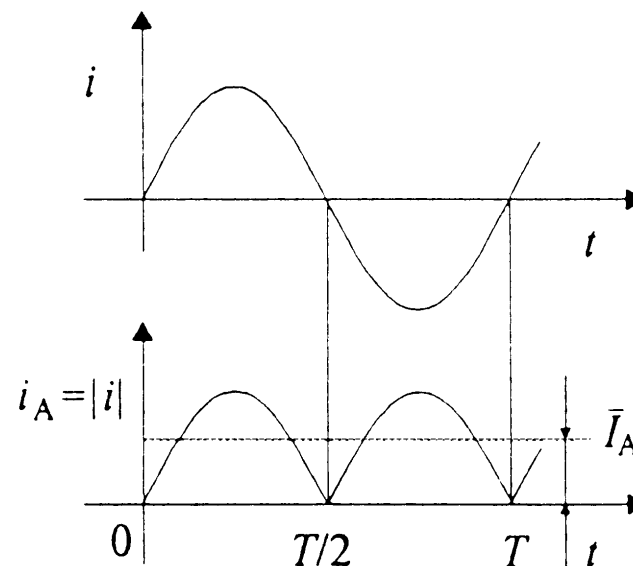


Polnovalno usmerjanje

- s pomočjo **Graetzove vezave**:



a)



b)

Slika 4.43 Polnovalno usmerjanje

Srednja vrednost toka instrumenta je enaka **povprečku absolutne vrednosti toka**.

- pri sinusni obliki 1,11-krat manjša od efektivne vrednosti:

$$I_r = 2\sqrt{2}/\pi \cdot I = 0.90 \cdot I$$





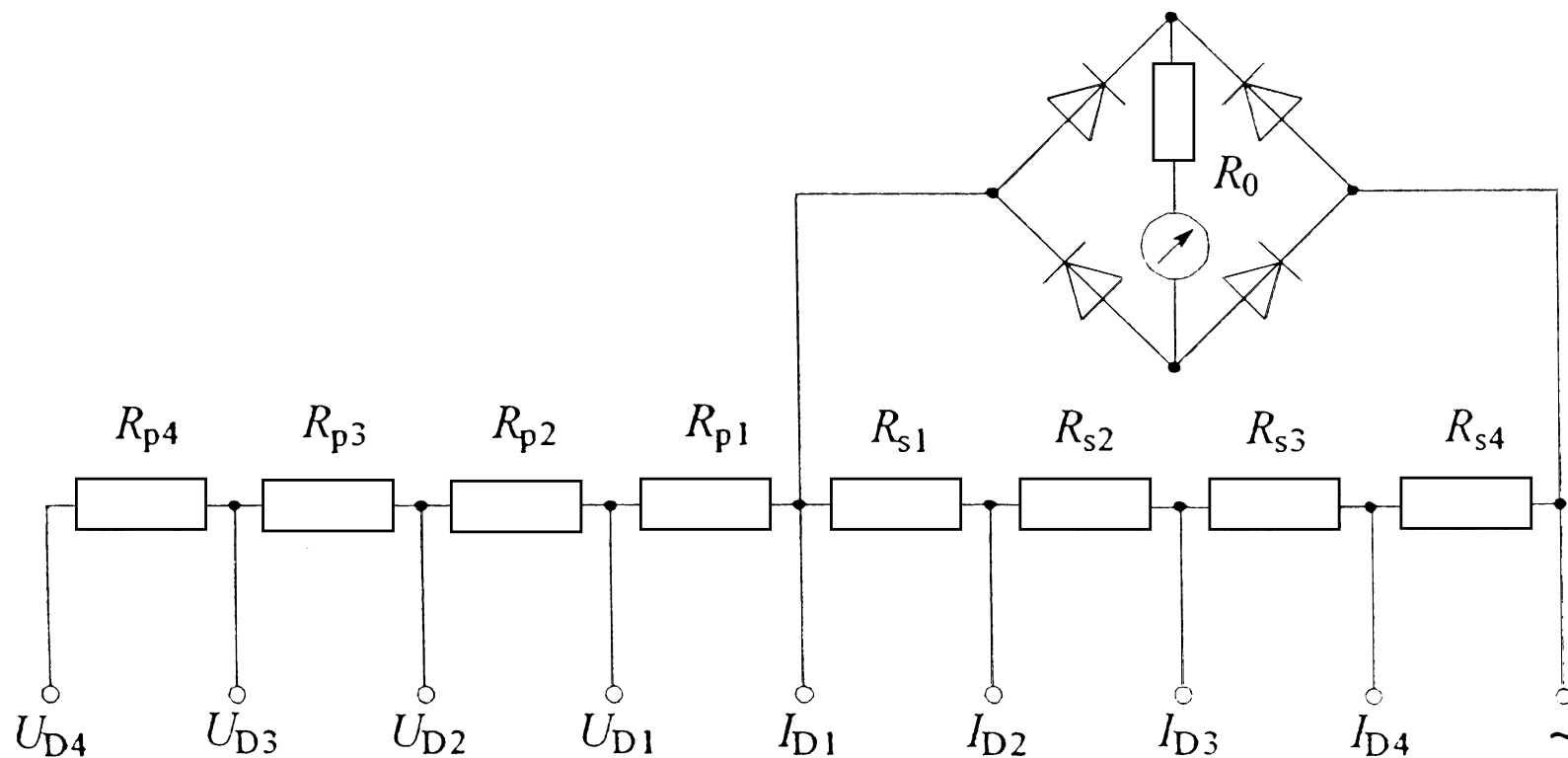
- da kaže instrument **pravilno pri sinusni obliki**, so **številске vrednosti skale** instrumenta **1,11-krat večje**.
- Če **nimamo** signala **sinusne oblike**, je pogrešek enak:

$$e = \frac{I_r \cdot 1,11 - I}{I} = \frac{I_r \cdot F_0 - I_r \cdot F}{I_r \cdot F} = \frac{F_0 - F}{F}$$

- pravokotna oblika ($F = 1$ - med efektivno in usmerjeno vrednostjo ni razlike):

$$e = \frac{F_0 - F}{F} = \frac{1,11 - 1}{1} = 11\%$$



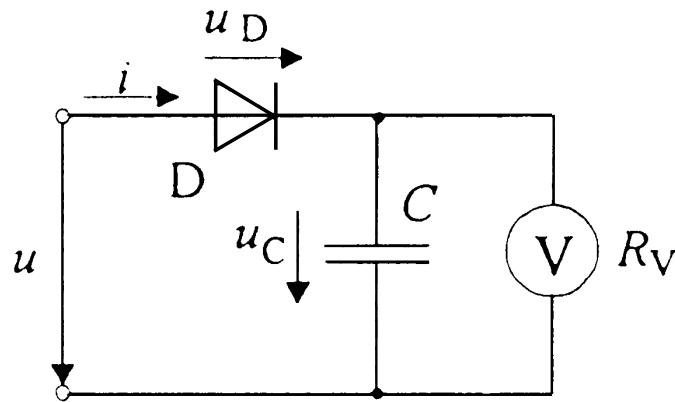


Slika 4.44 Univerzalni instrument s polprevodniškim usmernikom

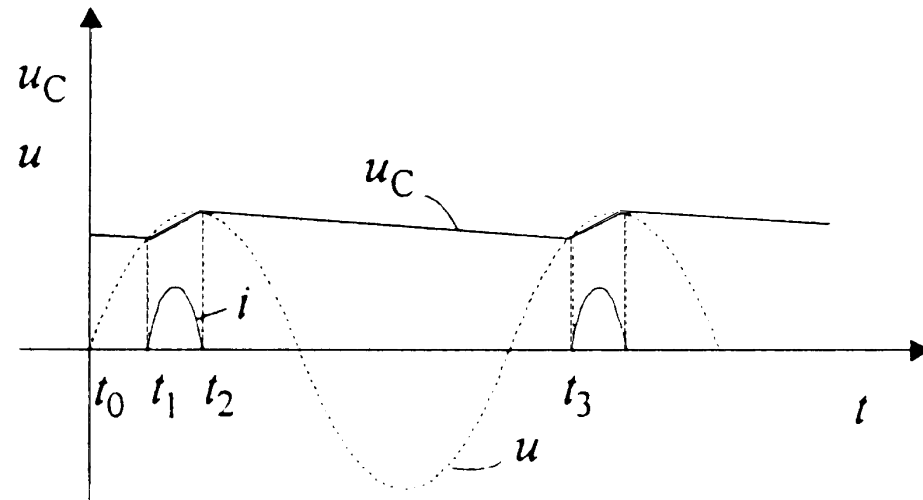




4.4.2 Odzivanje na temensko vrednost



a)

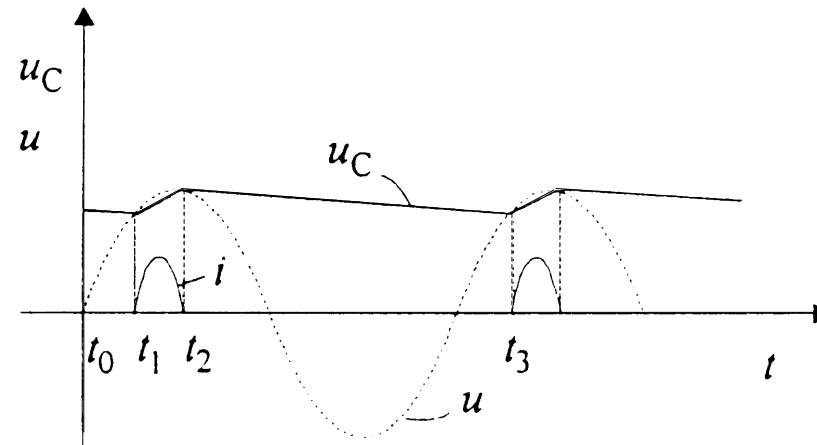
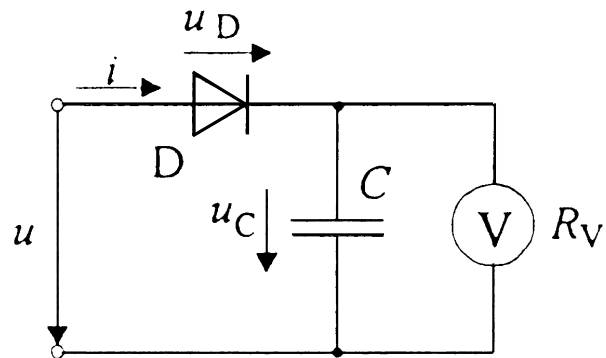


b)

Slika 4.45 Voltmeter, ki se odziva na temensko vrednost

- Če je merjena **napetost nižja** kot je napetost **na kondenzatorju** (intervali: $t_0 \div t_1$, $t_2 \div t_3$, ...), dioda **ne prevaja** $\Rightarrow$ kondenzator se **počasi prazni** prek R_V .
- Ko je napetost višja (**dioda prevaja** v intervalu $t_1 \div t_2$), se kondenzator polni.





- Napetost u_C je v stacionarnem stanju za padec napetosti na diodi u_D manjša, kot je vhodna napetost u .

Če je instrument **umerjen na efektivno vrednost pri sinusni obliki**, pri kateri je **temenski faktor** $C_0 = \hat{u}/U|_{\sin} = 1,41$, kaže pri drugačni obliki narobe:

$$e = \frac{\hat{u}/C_0 - U}{U} = \frac{\hat{u}/C_0 - \hat{u}/C}{\hat{u}/C} = \frac{C - C_0}{C_0}$$

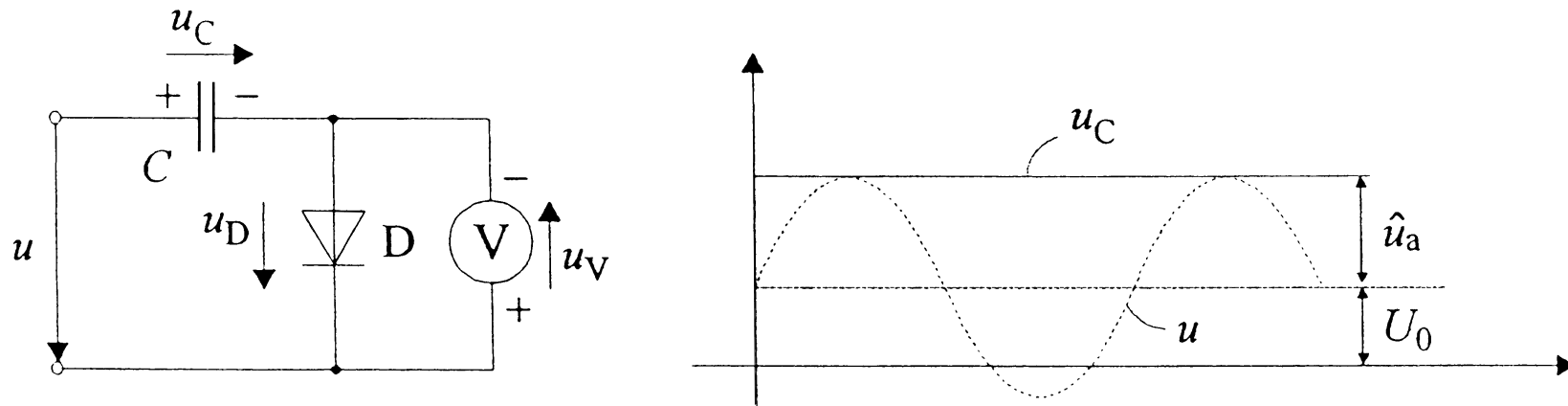
- pri pravokotni obliki ($C = 1$) kaže 29% premalo!





4.4.3 Merjenje pulzirajoče napetosti

Če želimo meriti samo **izmenično komponento**, priključimo instrument **vzporedno k diodi** in **zaporedno kondenzatorju**.

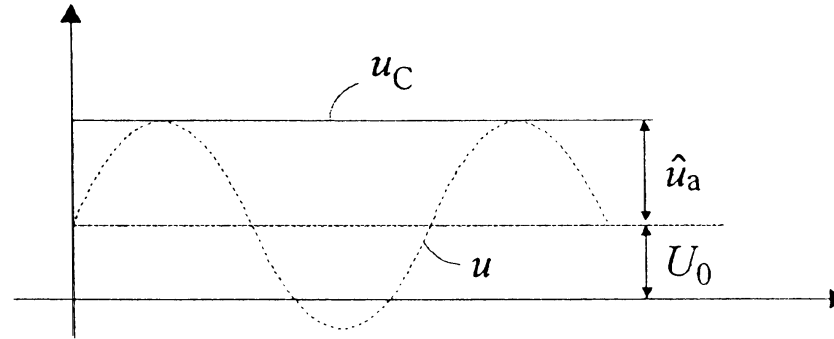
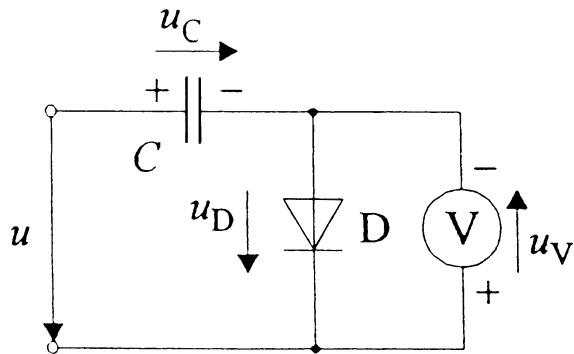


Slika 4.46 Merjenje izmenične komponente napetosti

Pulzirajoča napetost: $u = U_0 + u_a$

- U_0 - enosmerna komponenta,
- u_a - izmenična komponenta





Napetost **na kondenzatorju** u_C v ustaljenem stanju je enaka **temenski vrednosti**: $u_C = U_0 + \hat{u}_a$

Napetost **na diodi**: $u_D = u - u_C = (U_0 + u_a) - (U_0 + \hat{u}_a) = u_a - \hat{u}_a$

- neodvisna od enosmerne komponente,

Odklon voltmetra: $u_V = -u_D = \hat{u}_a - u_a$

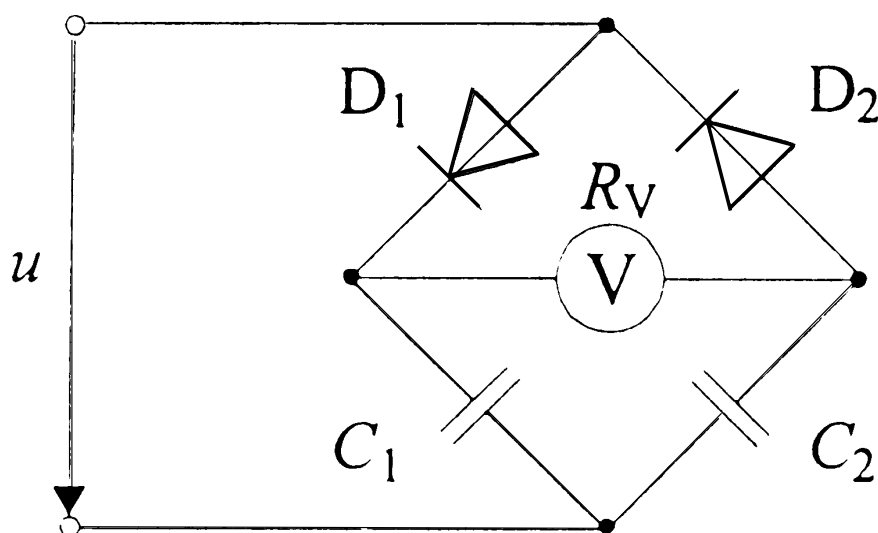
- **srednja vrednost** napetosti u_V je **enaka maksimalni** vrednosti izmenične komponente:

$$\bar{U}_V = \frac{1}{T} \int_0^T u_V dt = \frac{1}{T} \int_0^T (\hat{u}_a - u_a) dt = \hat{u}_a$$





Večjo občutljivost dosežemo z Greinacherjevim mostičnim vezjem:



Slika 4.47 Greinacherjevo mostično vezje

Kondenzator C_1 se polni preko diode D_1 in kondenzator C_2 preko diode D_2 .

- Ker oba dosežeta **temensko vrednost** napetosti, je na voltmetru njena dvojna vrednost $2\hat{u}$ ($R_V \gg 1$).

Usmerniška vezja se dobro uporabljajo v območju **akustičnih frekvenc** (nekaj deset do sto kHz).

- pri višjih frekvencah pride do izraza kapacitivnost diod – uporaba boljših diod!

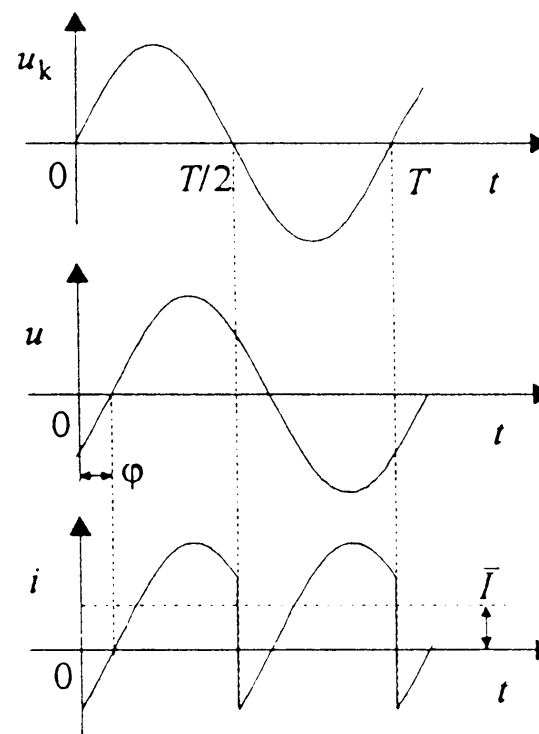
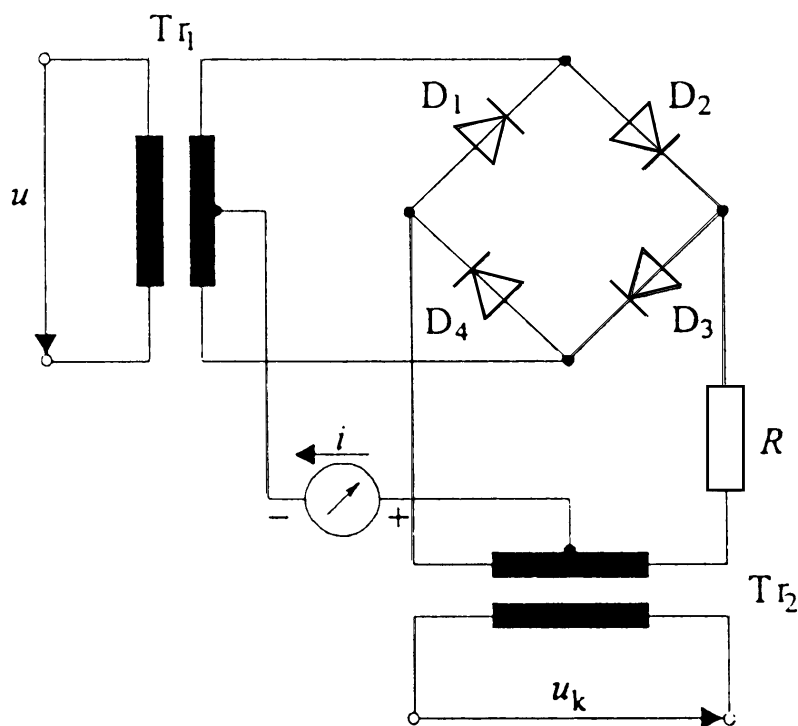




4.4.4 Tuje krmiljeni usmerniki

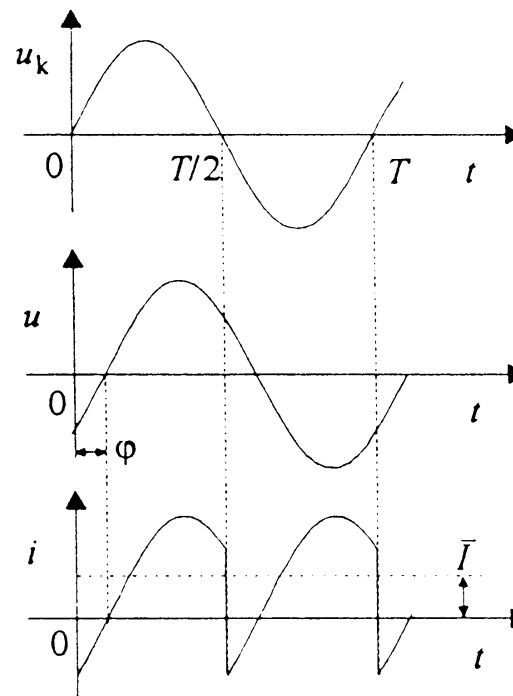
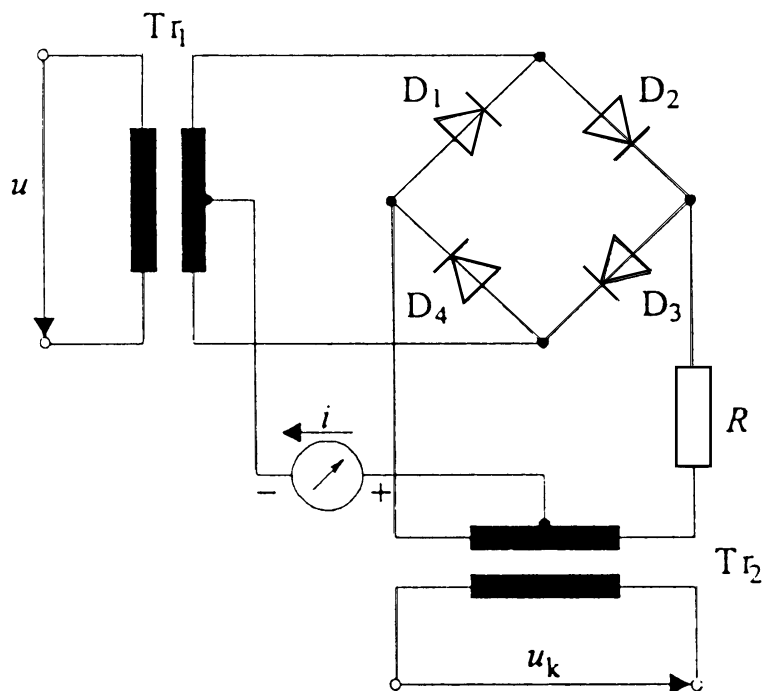
Prevajanje/zapiranje diode ni **odvisno** od merjene napetosti temveč **od krmilne napetosti**.

- **krmilna napetost je mnogo večja** od merjene napetosti!



Slika 4.48 Tuje krmiljeni usmernik

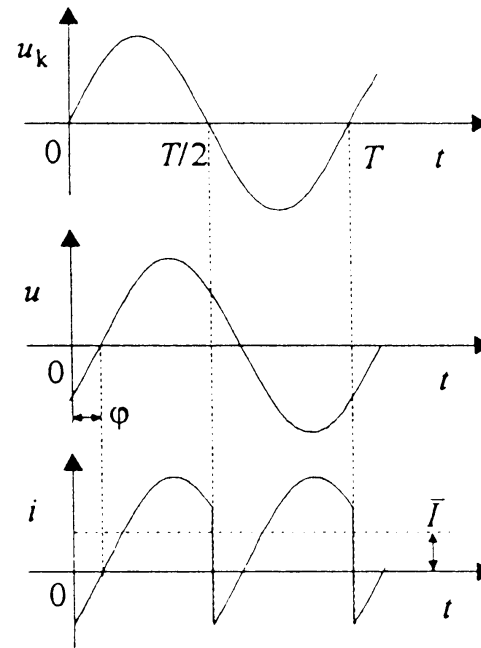
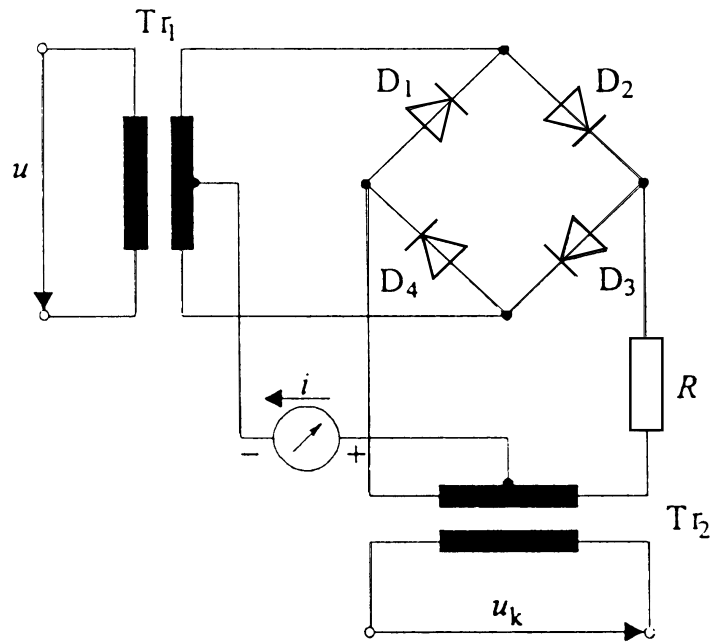




Diode delujejo v stikalnem obratu:

- v intervalu $0 \div T/2$ prevajata diodi D_1 in D_2
 - tok se zaključi preko **D_1 ali D_2** , upora R , **srednjega odcepa** transformatorja Tr_2 , **instrumenta** nazaj na **srednji odcep** transformatorja Tr_1 .





- v intervalu $T/2 \div T$ prevajata diodi D_3 in D_4
 - tok se zaključi preko **D_3** ali **D_4** , itd.
 - Na instrumentu se smer toka obrne!

Srednja vrednost toka je :

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i \, dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i \, dt = \frac{2}{T} k \int_0^{T/2} u \, dt$$





$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i \, dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i \, dt = \frac{2}{T} k \int_0^{T/2} u \, dt$$

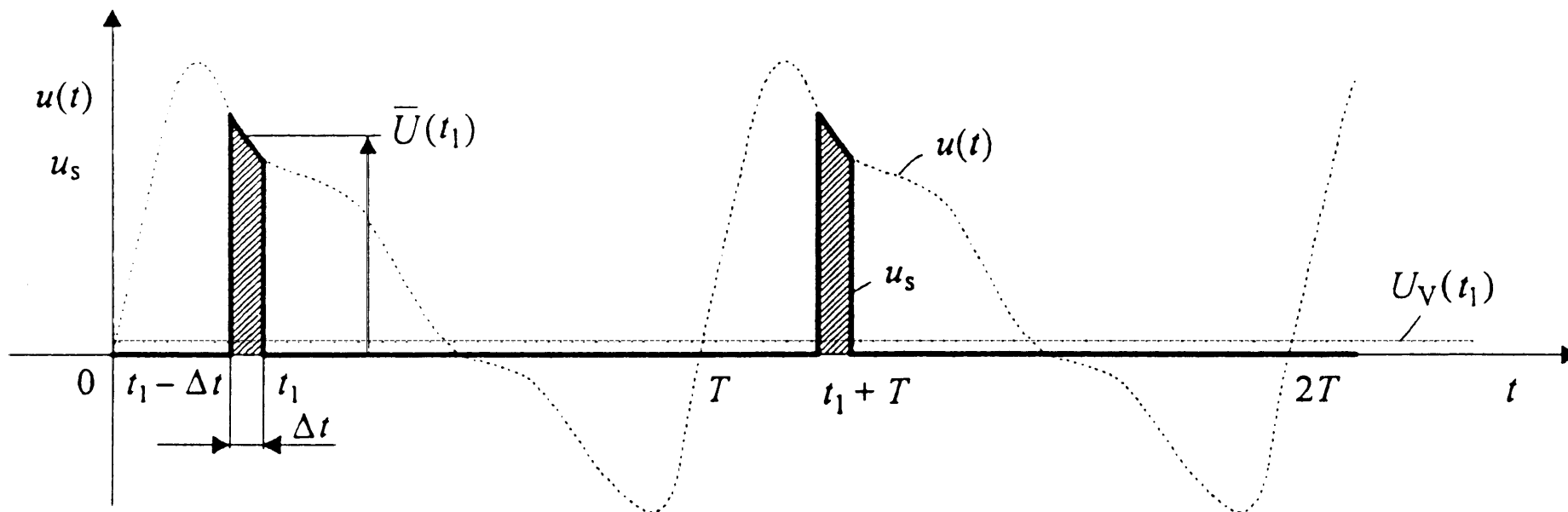
Če je merjena napetost $u = \hat{u} \sin(\omega t - \varphi)$, imamo:

$$\bar{I} = \frac{2}{\omega T} k \hat{u} \int_0^{T/2} \sin(\omega t - \varphi) \, d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} k U \cos \varphi$$

- Odklon je odvisen **od efektivne vrednosti** in od **faznega pložaja** glede na krmilno napetost.
 - Če lahko **kot nastavljam**, lahko **merimo** različne **komponente** napetosti (npr.: jalova, delovna,...)



4.4.5 Merjenje časovnega poteka periodični signalov preko povprečnih vrednosti odsekov



Slika 4.49 Princip merjenja trenutnih vrednosti periodične napetosti

Tekoča povprečna vrednost periodičnega odseka širine Δt :

$$\bar{U}(t_1) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1 - \Delta t}^{t_1} u \, dt$$

Votmeter kaže napetost:

$$U_V(t_1) = \frac{1}{T} \int_{t_1 - \Delta t}^{t_1} u \, dt$$

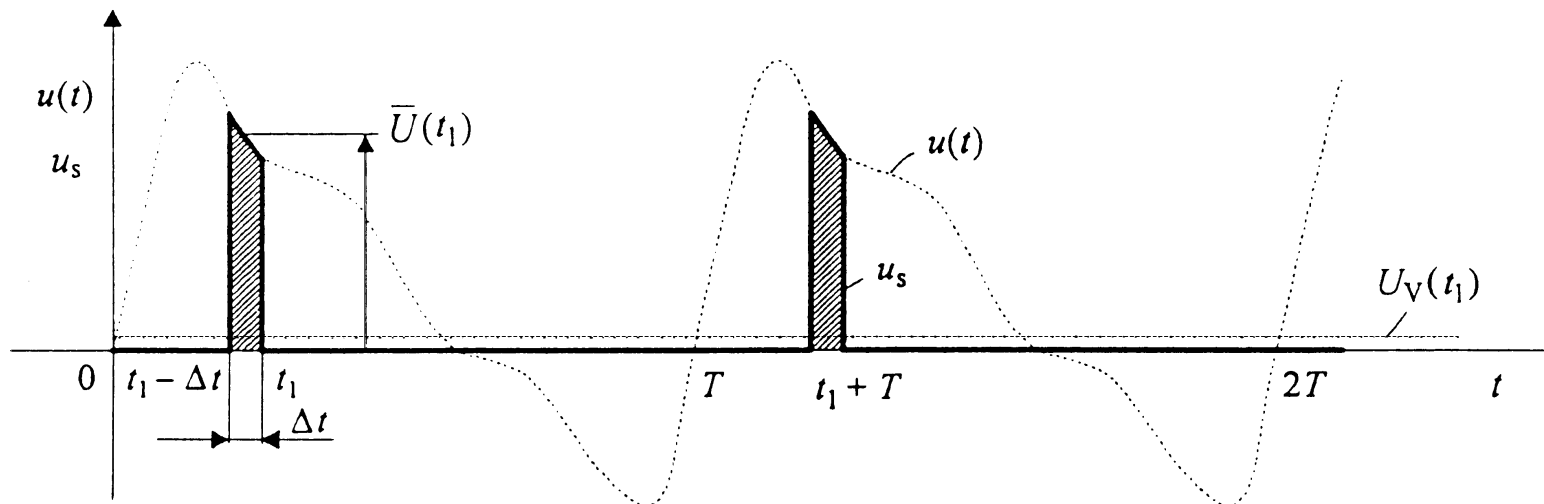




$$\bar{U}(t_1) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1 - \Delta t}^{t_1} u \, dt \quad U_V(t_1) = \frac{1}{T} \int_{t_1 - \Delta t}^{t_1} u \, dt$$

Napetosti $\bar{U}(t_1)$ in $U_V(t_1)$ sta v razmerju: $\bar{U}(t_1) = \frac{T}{\Delta t} U_V(t_1)$

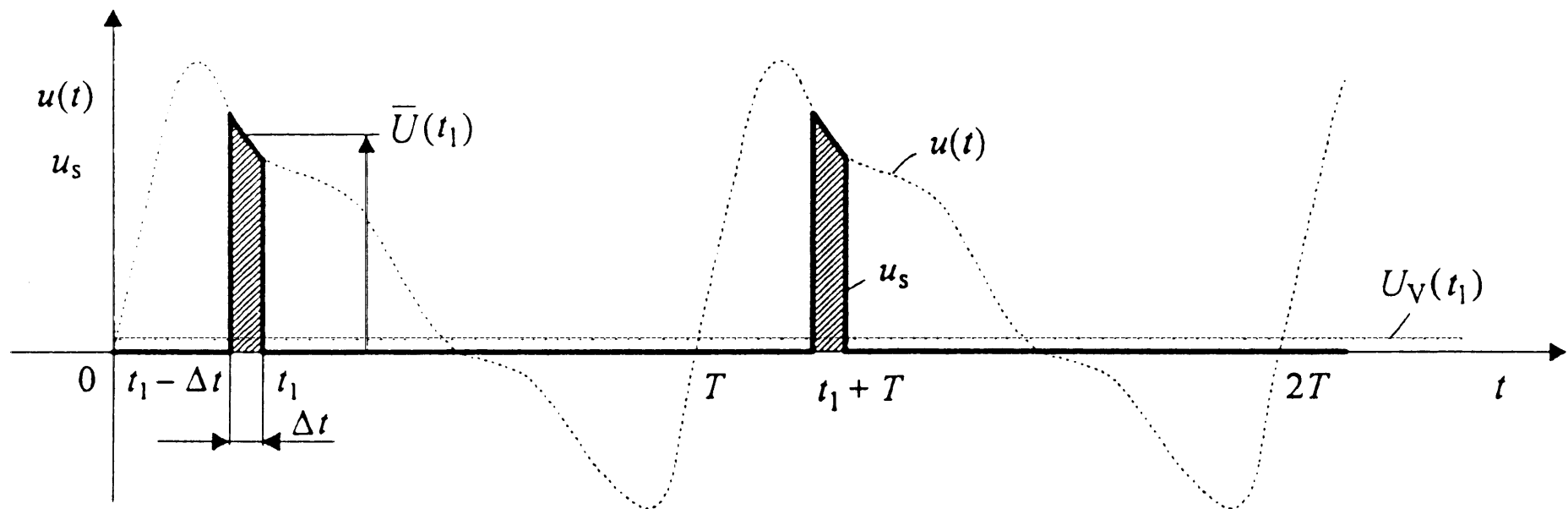
- če je odsek Δt dovolj ozek, je tekoča povprečna vrednost $\bar{U}(t_1)$ enaka trenutni vrednosti $u(t_1)$,
- tudi povprečna vrednost voltmetra $U_V(t_1)$ je enaka trenutni.





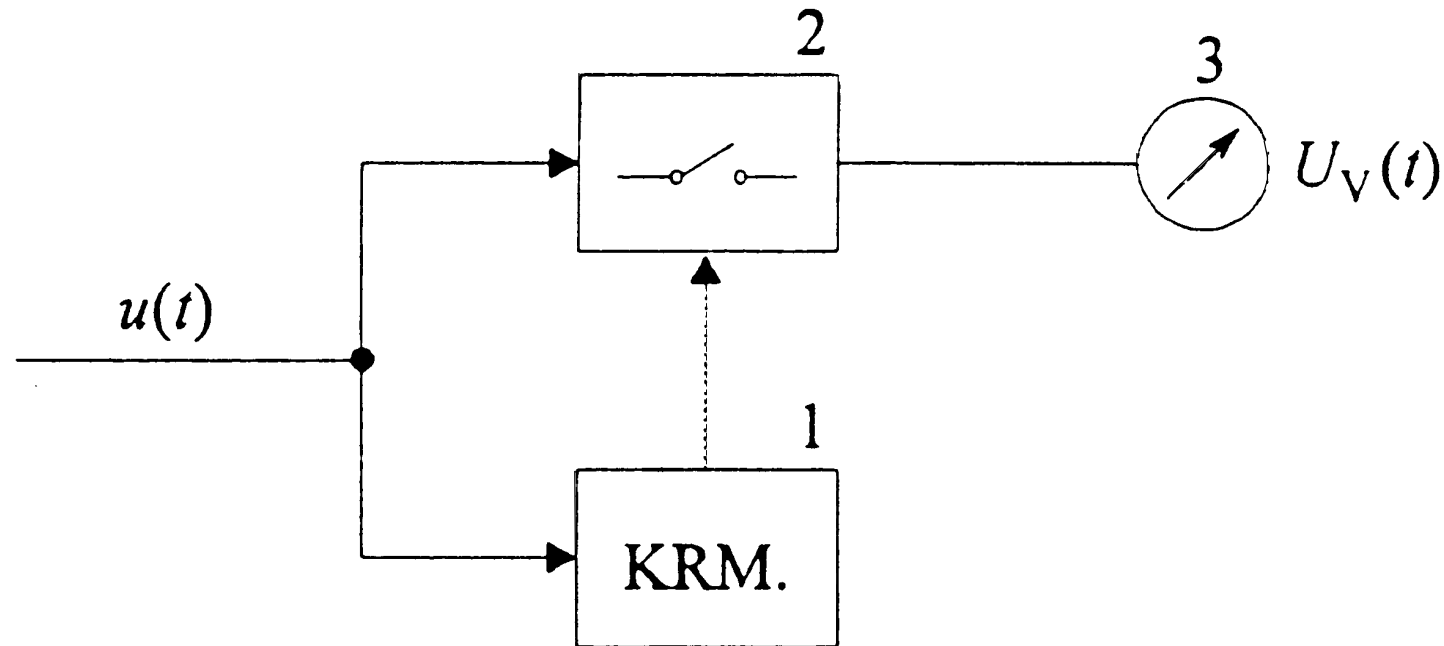
Z instrumentom, ki se **odziva na povprečno** vrednost, lahko **merimo trenutne** vrednosti.

- čas vklopa stikala premikamo po periodičnem signalu.
- s **sinhronskim stikalom**,
- skupaj z instrumentom tvori **vektormeter**



Slika 4.49 Princip merjenja trenutnih vrednosti periodične napetosti





Slika 4.50 Snemanje časovnega poteka periodične napetosti

- s krmilnim vezjem (1) določamo:
 - **čas odprtja** vrat $\Delta t = T_k$ (zelo ozek, da $\bar{U}(t) = u(t)$),
 - **relativni položaj** vklopa.



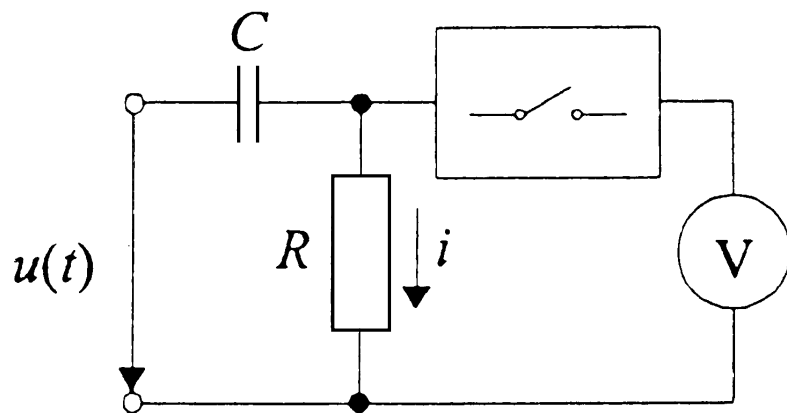
Z vektormetrom (stikalo s časom odprtja **polovico periode** in integracijski instrument) lahko merimo tudi, ko imamo **znan le odvod** merjene veličine.

- signal mora imeti **simetrijo III.** vrste: $x(t - T/2) = -x(t)$
- kontaktni čas T_k (**integracijski čas**) mora biti **enak polovici periode**:
$$\int_{t-T/2}^t \dot{x} dt = \int_{x(t-T/2)}^{x(t)} dx = 2 x(t)$$
- trenutna vred.: $x(t) = \frac{1}{2} \int_{t-T/2}^t \dot{x} dt = \frac{T}{4} \frac{1}{T/2} \int_{t-T/2}^t \dot{x} dt = \frac{T}{4} \overline{\dot{X}}(t)$

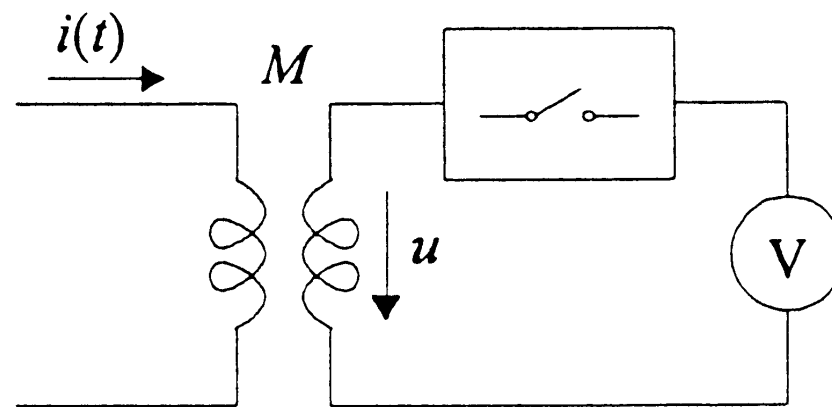




Če je dana **sama veličina**, jo najprej **diferenciramo**.



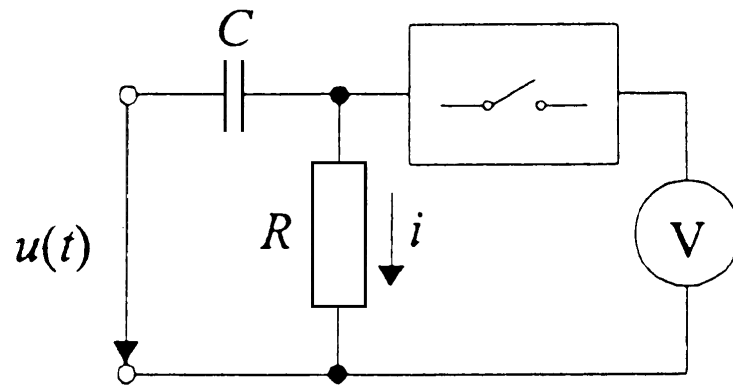
a)



b)

Slika 4.51 Merjenje trenutnih vrednosti napetosti in toka





Realizacija diferenciranja pri merjenju napetosti (a):

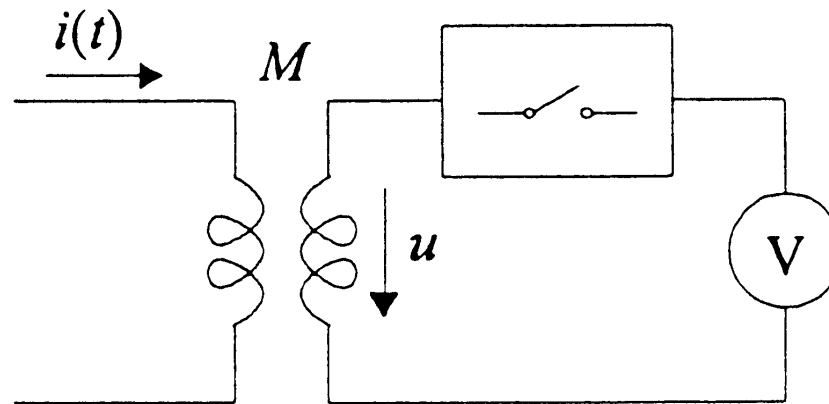
- **velika upornost** voltmetra $R_V \gg 1$,
- **majhna časovna** konstanta $RC \ll T$,
- tok čez upor je : $i = i_C = C \frac{du_C}{dt} \approx C \frac{du}{dt}$

Povprečna vrednost napetosti:

$$U_V(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^t iR dt = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^t \left(C \frac{du}{dt} \right) R dt = \frac{RC}{T} \int_{u(t-T/2)}^{u(t)} du$$

- zaradi **simetričnosti** $u(t - T/2) = -u(t)$: $u(t) = \frac{U_V(t)}{2fRC}$





Pri merjenju toka realiziramo **diferenciranje z medsebojno induktivnostjo** (b): $u = M \frac{di}{dt}$

Povprečna vrednost napetosti je enaka **trenutnemu toku**

$$U_V(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^t u \, dt = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^t \left(M \frac{di}{dt} \right) dt = \frac{M}{T} \int_{i(t-T/2)}^{i(t)} di, \quad i(t) = \frac{U_V(t)}{2 f M}$$

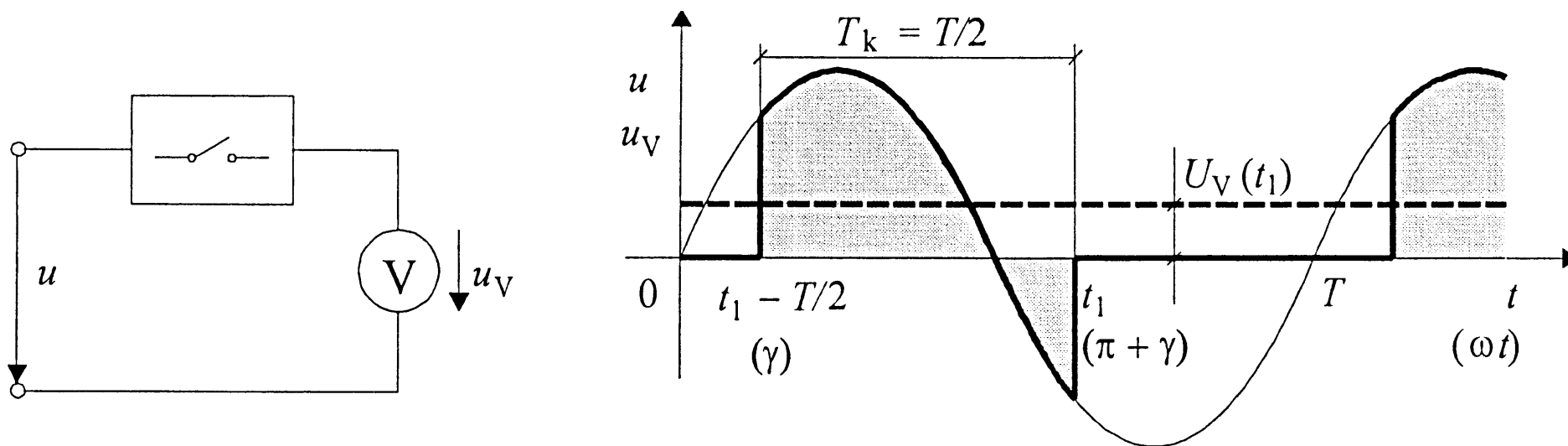




Z vektormetrom merimo:

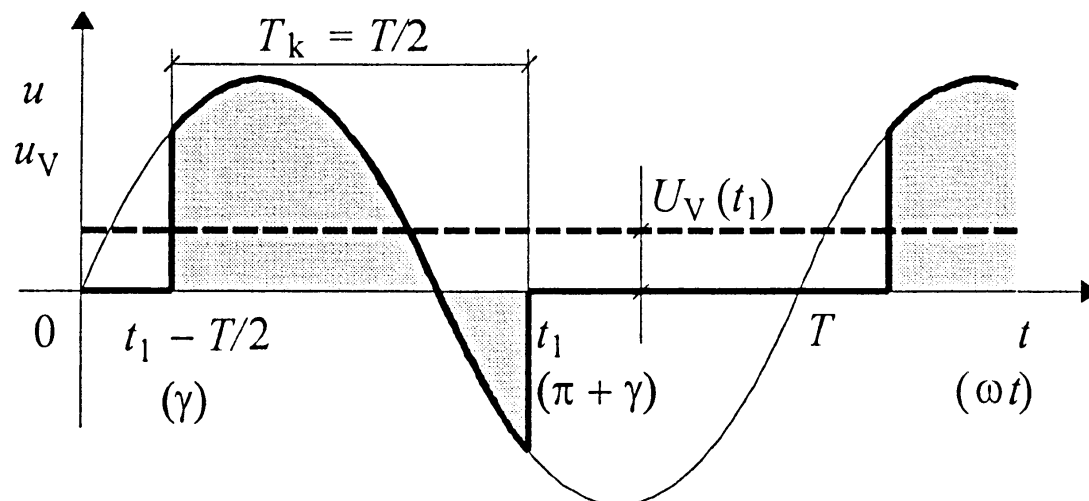
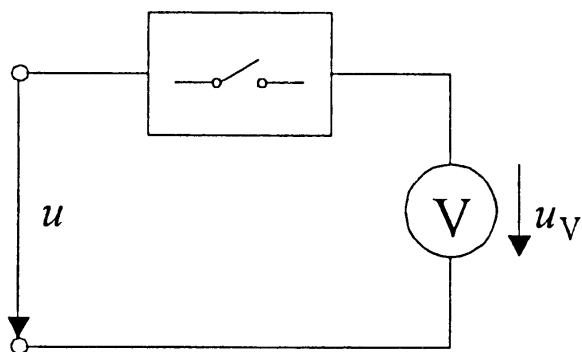
- **temensko** vrednost,
- **delovno** in **jalovo komponento** sinusne veličine,
- **fazno razliko** med veličinama,
- **osnovno** in **harmonske** komponente izmenične veličine,
- itn.

Kontaktni čas je $T_k = T/2$.



Slika 4.52 Merjenje sinusne napetosti z vektormetrom





Merjenje **delovne komponente** sinusne veličine:

$$U_V(t_1) = \frac{1}{T} \int_{t_1 - T/2}^{t_1} u_V dt = \frac{1}{T} \int_{t_1 - T/2}^{t_1} \hat{u} \sin \omega t dt = \frac{\hat{u}}{\omega T} \int_{\gamma}^{\gamma + \pi} \sin \omega t d\omega t$$

$$U_V(t_1) = \frac{\hat{u}}{\pi} \cos \gamma = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \cos \gamma$$

Merjenje **temenske** vrednosti $\hat{u}$:

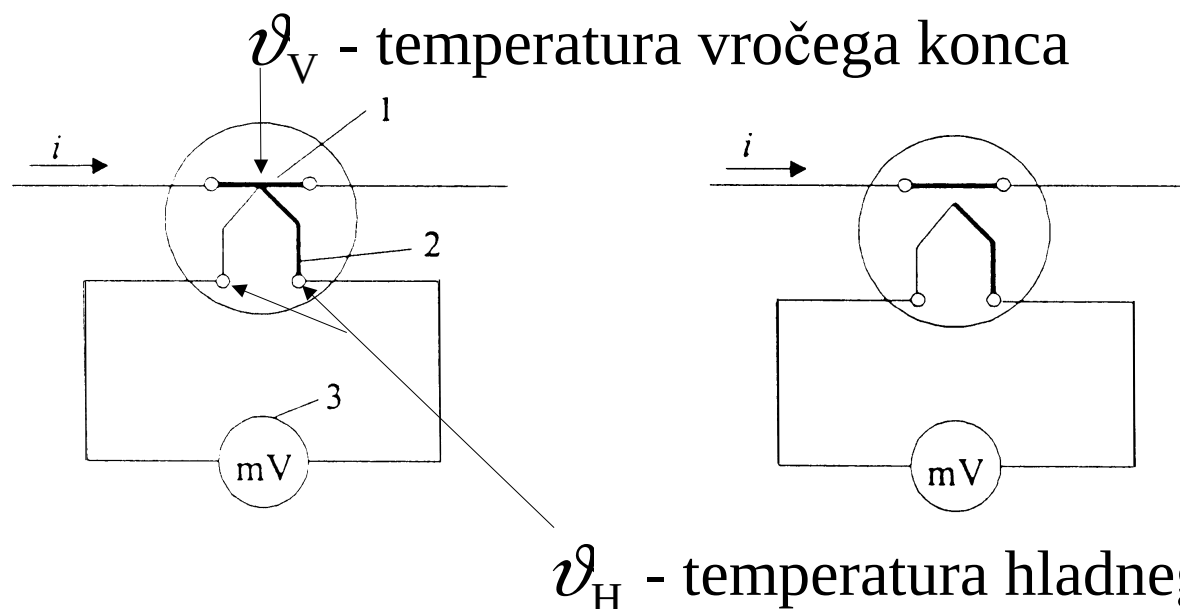
odklon voltmetra največji $U_{V,\max}$ pri $\gamma = 0$: $\hat{u} = \pi \cdot U_{V,\max}$





4.4.6 Instrument z odzivom na povprečno vrednost in termopretvornik

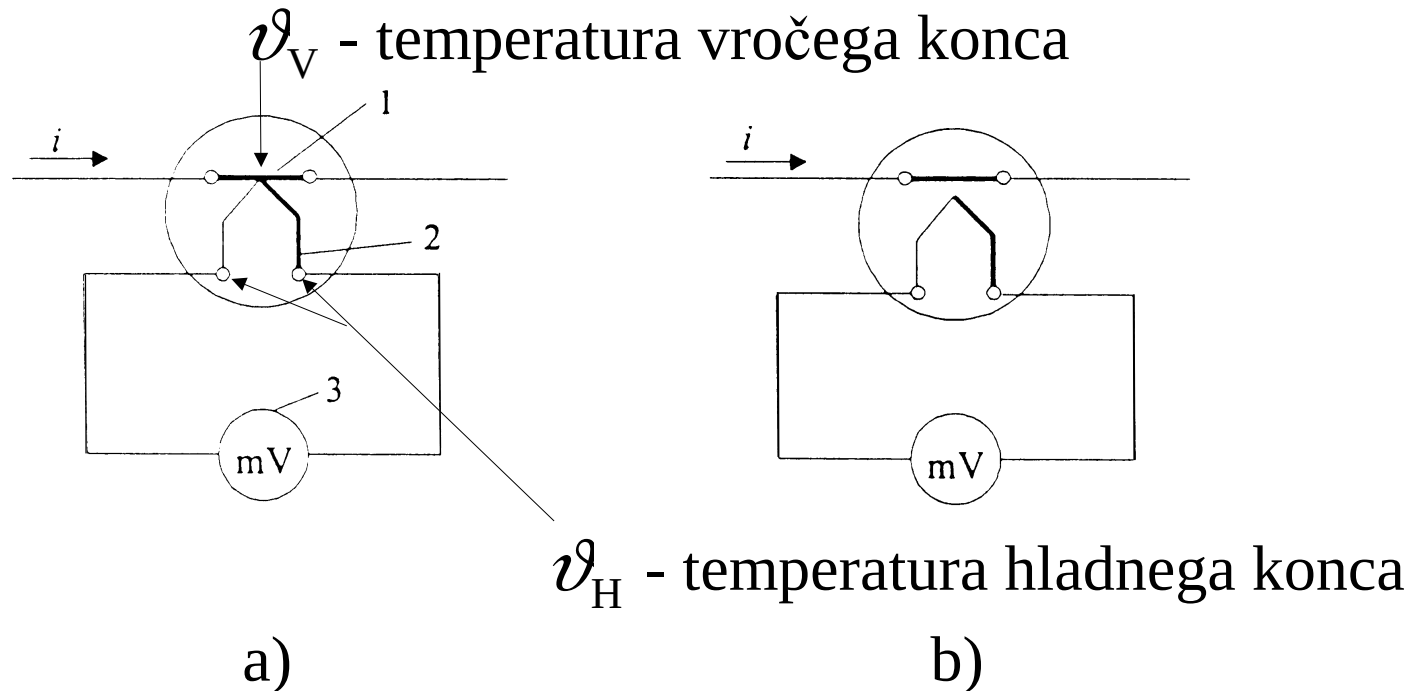
Kadar želimo meriti efektivno vrednost signala tudi **pri nesinusnem toku**, moramo instrumentu dodati **merilni člen – termopretvornik**.



Slika 4.53 Instrument z vrtljivo tuljavico in termopretvornikom

- izhodna veličina (enosmerna napetost/tok) je **sorazmerna efektivni vrednosti** merjene veličine.



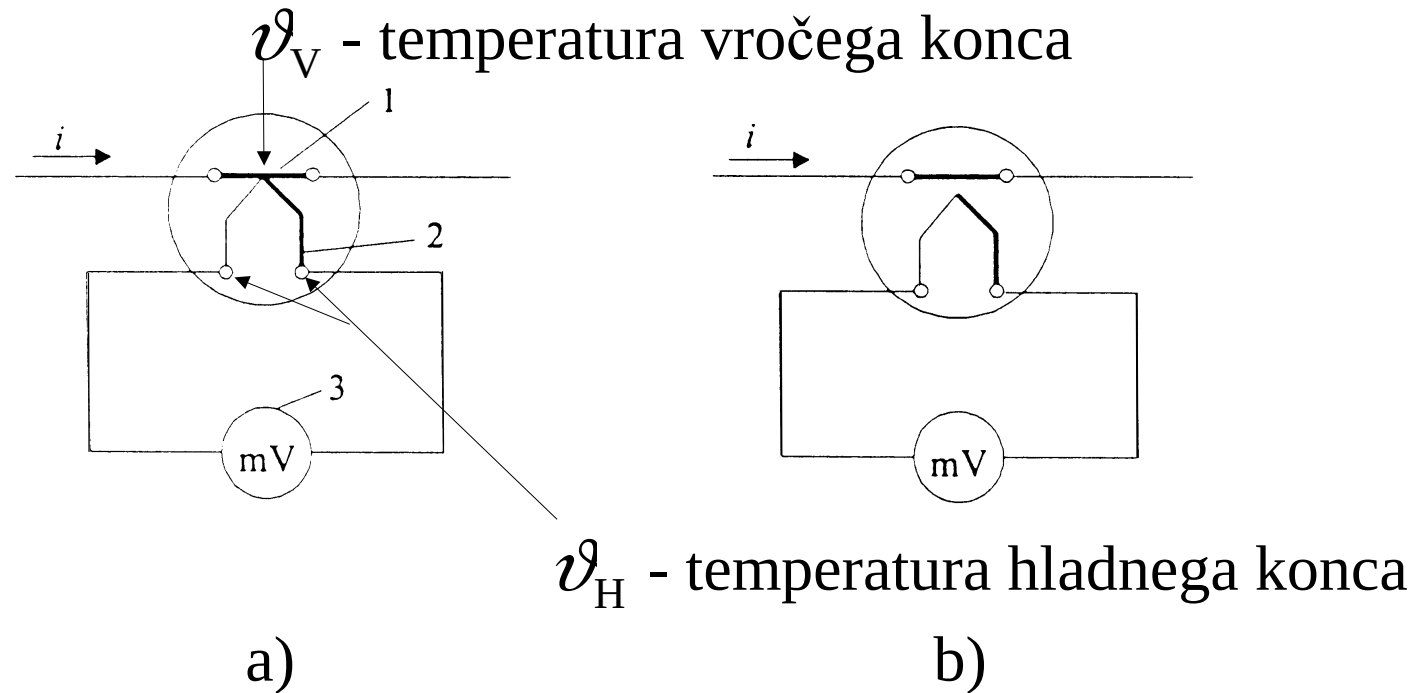


Slika 4.53 Instrument z odzivom na povprečno vrednost in termopretvornik

- **Grelna žica (1) in termoelement (2) sta v toplotnem stiku.** Napetost termoelementa:

$$U = k(\vartheta_V - \vartheta_H) = k \Delta \vartheta \quad k - \text{odvisen od materialov}$$





Slika 4.53 Instrument z odzivom na povprečno vrednost in termopretvornik

- če je tudi električni stik $\Rightarrow$ neizoliran termopret.(a),
- če stika ni $\Rightarrow$ izoliran termop.(b) – posredno ogrevan.



Za **ogrevanje** žice je potrebna moč:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (iR)i \, dt = R \frac{1}{T} \int_0^T i^2 \, dt = RI^2$$

- V ustaljenem stanju sta zaradi toplotne vztrajnosti termopretvornika ϑ_V in ϑ_H **stalni**.
- Temperaturna razlika $\Delta\vartheta$ je **odvisna od moči** na grelni žici in dobimo: $U = aP = aRI^2 = bI^2$
 - **skala** takega instrumenta je **kvadratična** (odziva se na efektivno vrednost).

Termopretvornik je občutljiv na preobremenitev.

Z uporabo tankostenske cevke (zmanjša se **kožni pojav**) je zgornja frekvenčna meja okoli 1GHz.

