



## ***4.8 Merilni transformatorji***

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

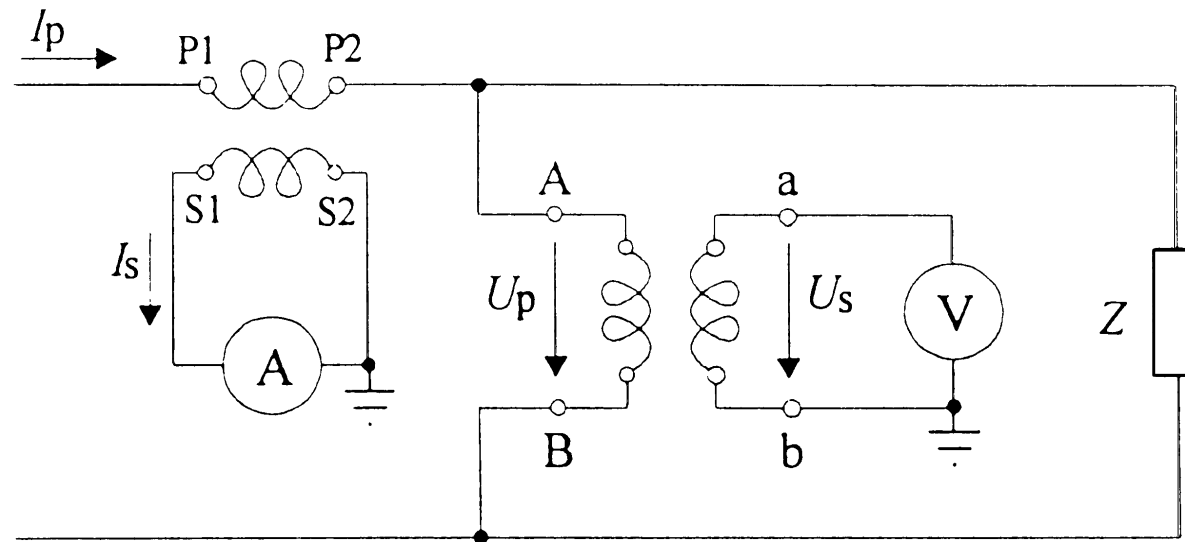
Sestavljen je iz:

- **feromagnetnega jedra,**
- **primarnega navitja,**
- **in galvansko ločenega sekundarnega navitja.**

Poznamo:

- **tokovni merilni transformator** (tokovnik),
- **napetostni merilni transformator** (napetostnik).





Slika 4.38 Priključek tokovnika in napetostnika

Poznati moramo **prestavo** transformatorja ( $K_i$  oz.  $K_u$ ):

- $I_p = K_i I_s$  - za tokovnik
  - tok primarnega navitja dobimo tako, da tok sekundarnega navitja, ki ga merimo z ampermetrom, pomnožimo s prestavo!
- $U_p = K_u U_s$  - za napetostnik





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**:  $I_p = K_{in} I_s$





**Podobno velja tudi za napetostnik:**

$$U_p = K_{un} U_s \quad \Leftrightarrow \quad K_{un} = \frac{U_{pn}}{U_{sn}}$$

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

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

- tokovni prestavni pogrešek:

$$e_i = \frac{K_{in} I_s - I_p}{I_p},$$

- napetostni prestavni pogrešek:

$$e_u = \frac{K_{un} U_s - U_p}{U_p}$$

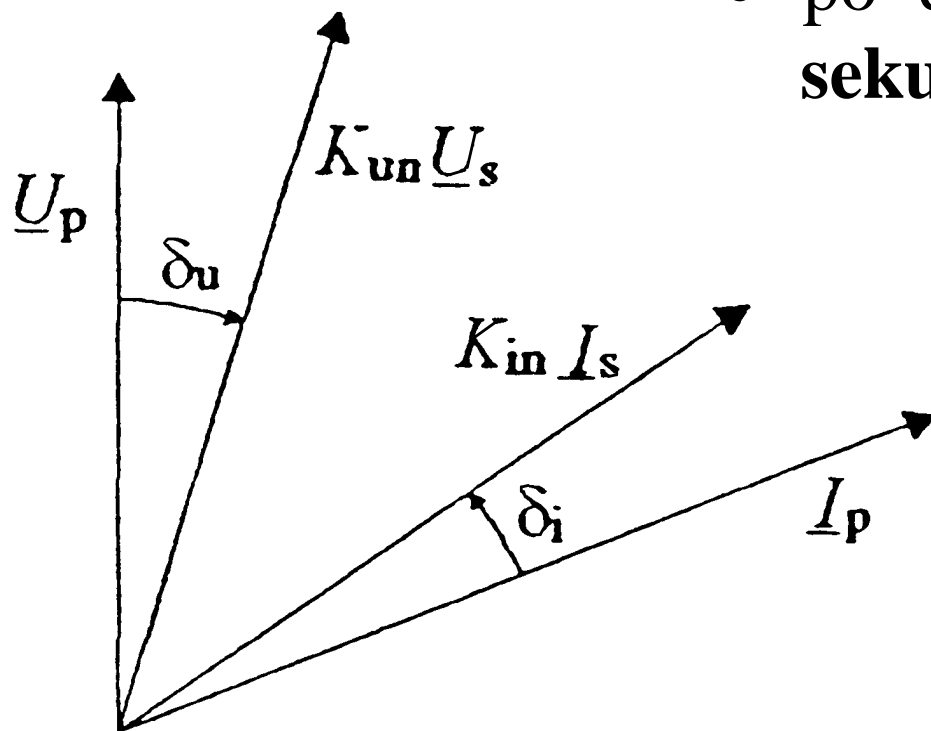




Pri posrednem merjenju moči, energije, ... moramo upoštevati tudi **kotni pogrešek**:

- **fazna razlika** med fazorjema primarnega in sekundarnega navitja.

- po dogovoru je **pozitiven**, če sekundar prehiteva primar.



$e_u$  - pozitiven,  
 $\delta_u$  - negativen,

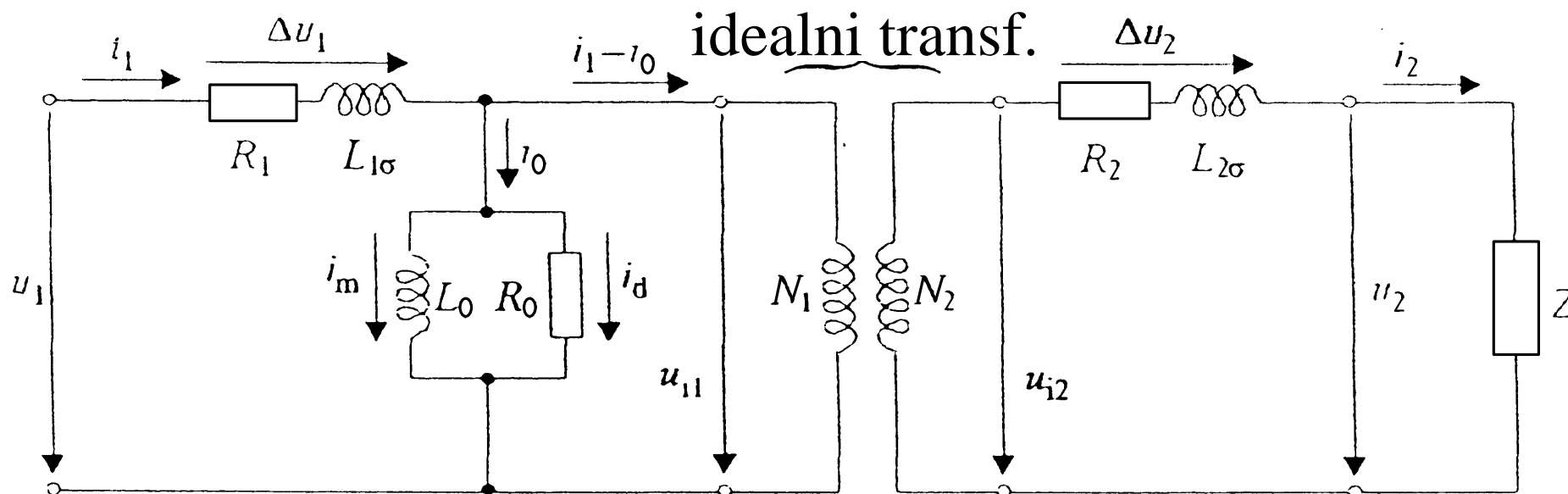
$e_i$  - negativen,  
 $\delta_i$  - pozitiven,

Slika 4.41 Pogreška tokovika in napetostnika





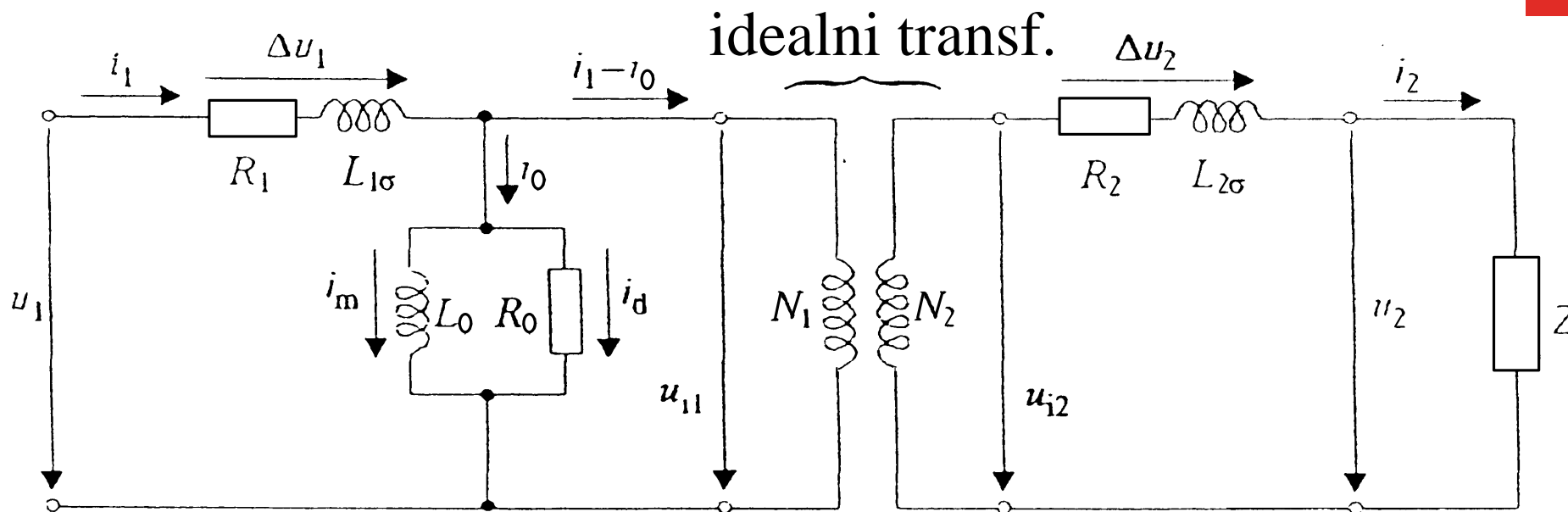
## *Nadomestno vezje merilnega transformatorja*



Slika 4.42 Nadomestno vezje merilnega transformatorja

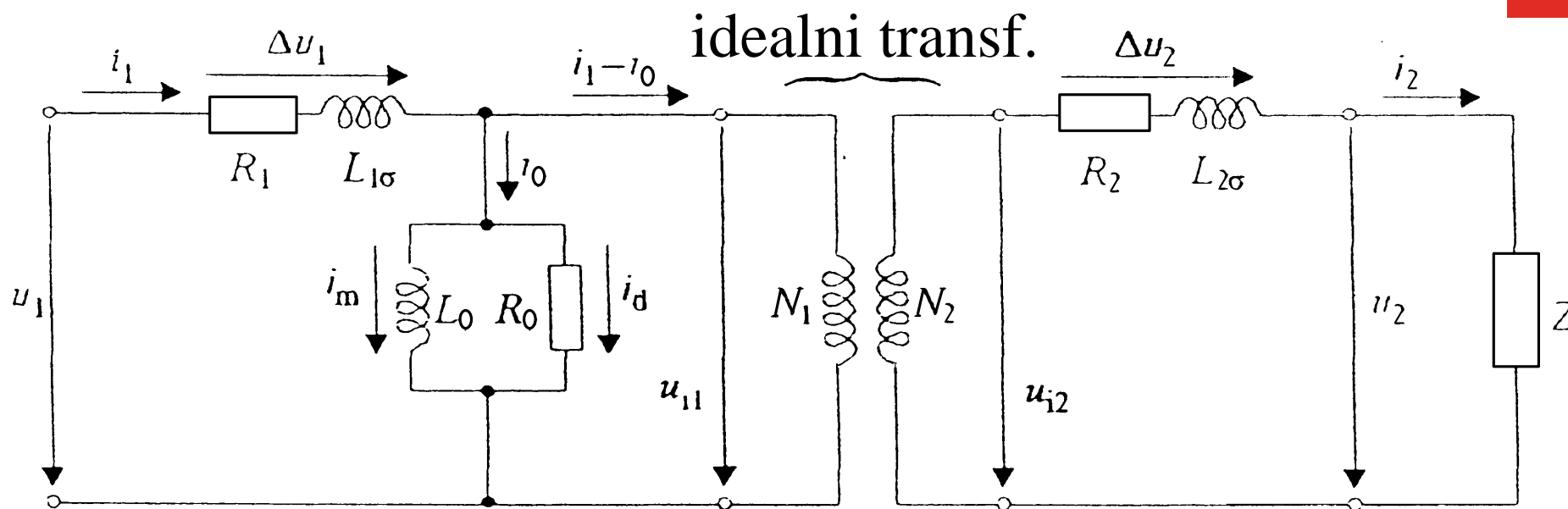
- $R_1$  - ohmska **upornost primarnega** navitja,
- $L_{1\sigma}$  - stresana **induktivnost primarnega** navitja,
- $R_2$  - ohmska **upornost sekundarnega** navitja,
- $L_{2\sigma}$  - stresana **induktivnost sekundarnega** navitja,





- $L_0$  - induktivnost jedra,
  - z magnetilnim tokom  $i_m$  vzbuja magnetni pretok v jedru
- $R_0$  - upornost jedra,
  - z  $i_d$  ponazarja izgube v jedru
- na sekundarju imamo priključeno impedanco  $Z$





Slika 4.42 Nadomestno vezje merilnega transformatorja

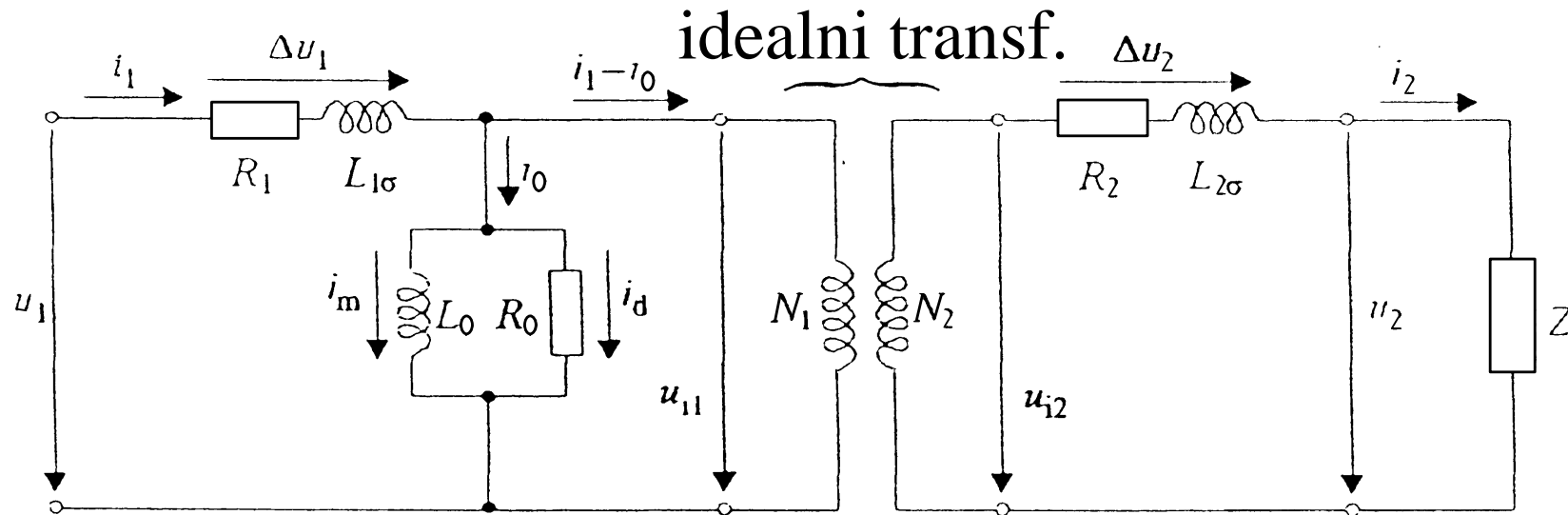
Pri tokovniku imamo vsiljen tok (napetost  $u_1$  čim manjša).

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

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





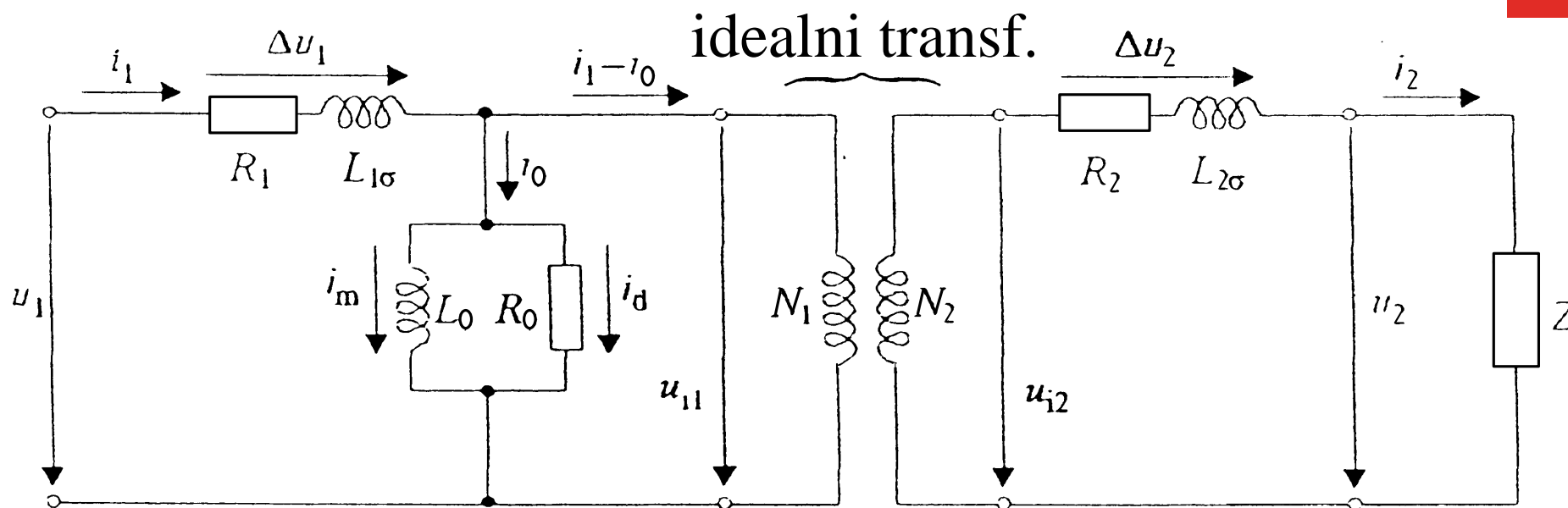


**Povečano breme** povzroči tudi povečano magnetenje,

- 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.

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





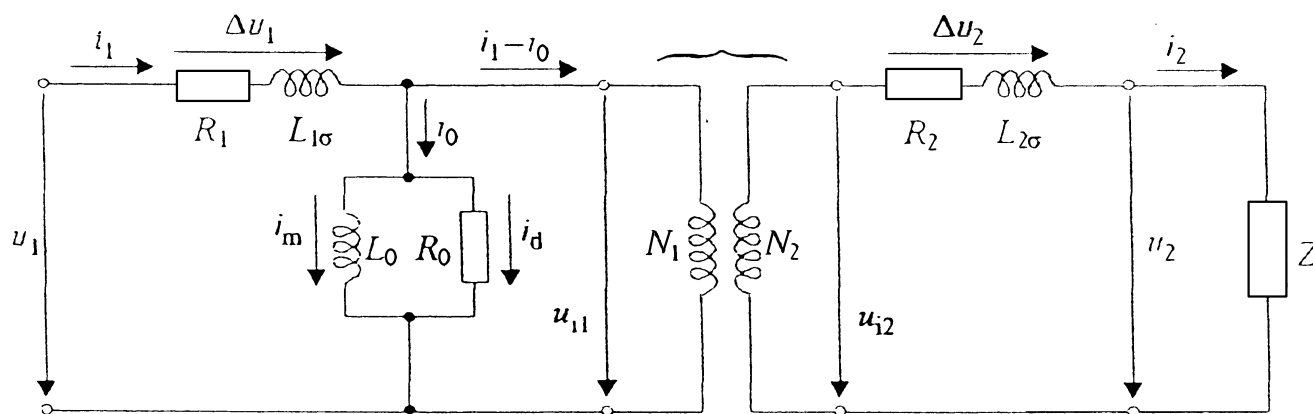
Slika 4.42 Nadomestno vezje merilnega transformatorja

Pri **napetostniku** imamo **vsiljeno napetost** (tok  $i_1$  čim manjši).

Velja:

$$\frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{N_1 d\phi/dt}{N_2 d\phi/dt} = \frac{N_1}{N_2}$$





$$\frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{N_1 d\phi/dt}{N_2 d\phi/dt} = \frac{N_1}{N_2}$$

Upoštevati moramo še **padce napetosti**  $\Delta u_1$  oz.  $\Delta u_2$

- na **upornostih** navitij ( $R_1, R_2$ ) in stresanih **induktivnostih** ( $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ ).  $u_1 - u_{i1} - \Delta u_1 = 0$   $u_{i2} - u_2 - \Delta u_2 = 0$

$$u_2 + \Delta u_2 = u_{i2} = \frac{u_{i2}}{u_{i1}} u_{i1} = \frac{N_2}{N_1} (u_1 - \Delta u_1)$$

$$u_2 = u_1 \frac{N_2}{N_1} \left[ 1 - \left( \frac{\Delta u_1}{u_1} + \frac{\Delta u_2}{u_2} \right) \right]$$

- **prestava** je odvisna tudi **od padcev napetosti** na navitjih.





## *Osnovni podatki tokovnih merilnih transformatorjev*

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

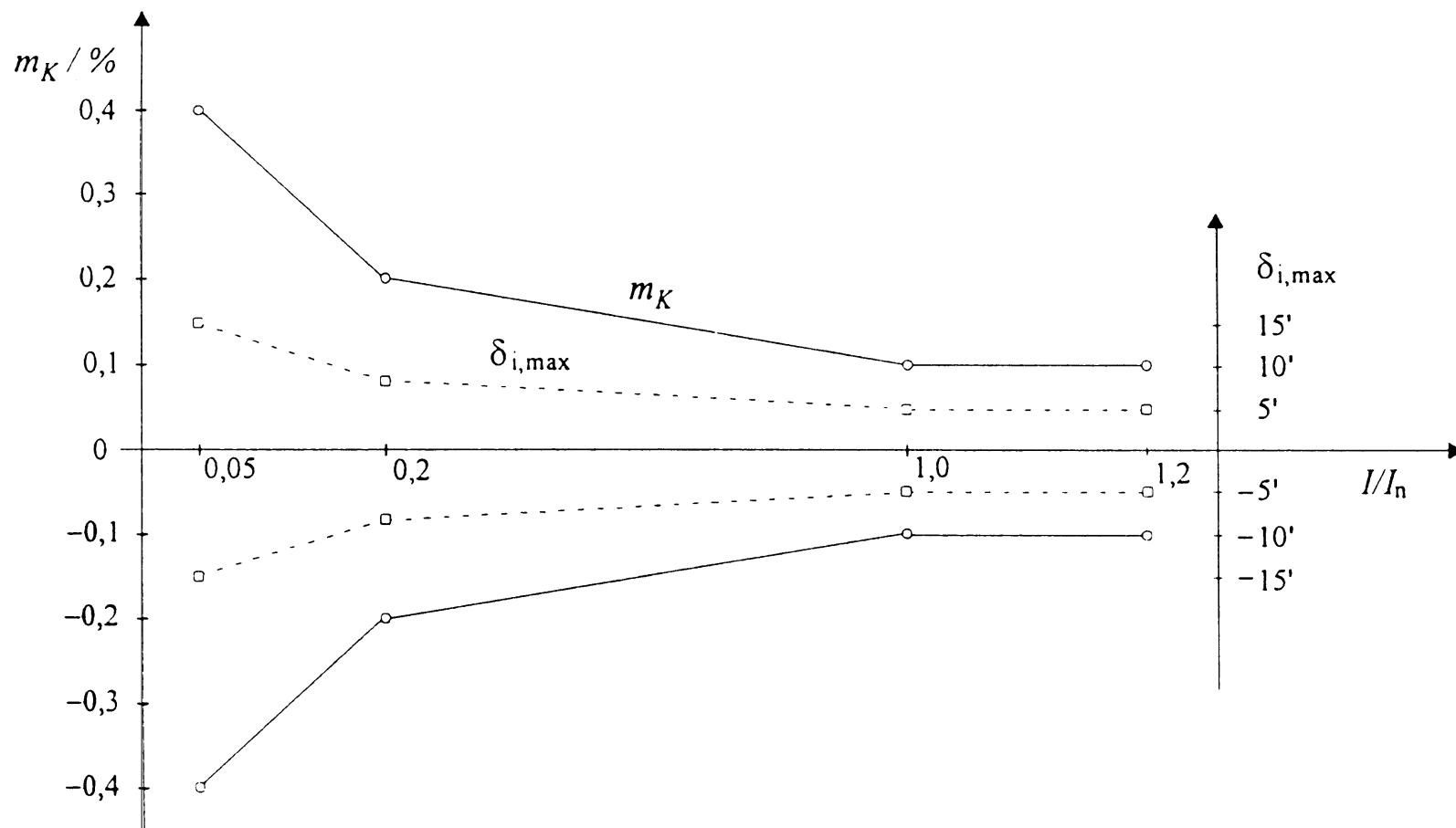
0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – 5

- **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 4.39 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) A
- sekundarni nazivni tok: 1 A, 2 A in priporočeno 5 A,
- **nazivna moč**: (2,5 – 5 – 10 – 15 – 30) 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!).





## *Osnovni podatki napetostnih merilnih transformatorjev*

Po mednarodnih priporočilih IEC 186-1987 so napetostniki razvrščeni v pet razredov točnosti:

0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3

- pogoji:
  - nazivna frekvenca,
  - napetost med 80% in 120% nazivne napetosti,
  - breme med 25% in 100% nazivnega bremena,
  - faktor moči 0,8 induktivnega značaja.

Tabela 4.4 Meje pogreškov napetostnikov

razred točnosti	0,1	0,2	0,5	1	3
meje napetostnega pogreška	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,2\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 1,0\%$	$\pm 3,0\%$
meje kotnega pogreška	$\pm 5'$	$\pm 10'$	$\pm 20'$	$\pm 40'$	/







## Priporočene **standardne vrednosti**:

- primarna nazivna napetost v skladu z nazivnimi vrednostmi omrežij,
- sekundarna nazivna napetost: 100 V, (200 V)
- **nazivna moč**: (10 – 25 – 50 – 100 – 200 – 500) VA.
  - To je **vrednost navidezne moči**, ki jo napetostnik daje v sekundarni tokokrog pri **nazivni sekundarni napetosti in nazivni obremenitvi**:

$$S_n = U_{sn}^2 Y_n$$





- **nazivno breme** je admitanca podana v siemensih:

$$Y_n = \frac{S_n}{U_{sn}^2} = \frac{50 \text{ VA}}{(100 \text{ V})^2} = 5 \text{ mS}$$

- ustreza impedanci  $200 \Omega$

- 25% nazivnega bremena:

$$Y_{25\%} = \frac{S_{25\%}}{U_{sn}^2} = \frac{12,5 \text{ VA}}{(100 \text{ V})^2} = 1,25 \text{ mS}$$

- ustreza impedanci  $800 \Omega$

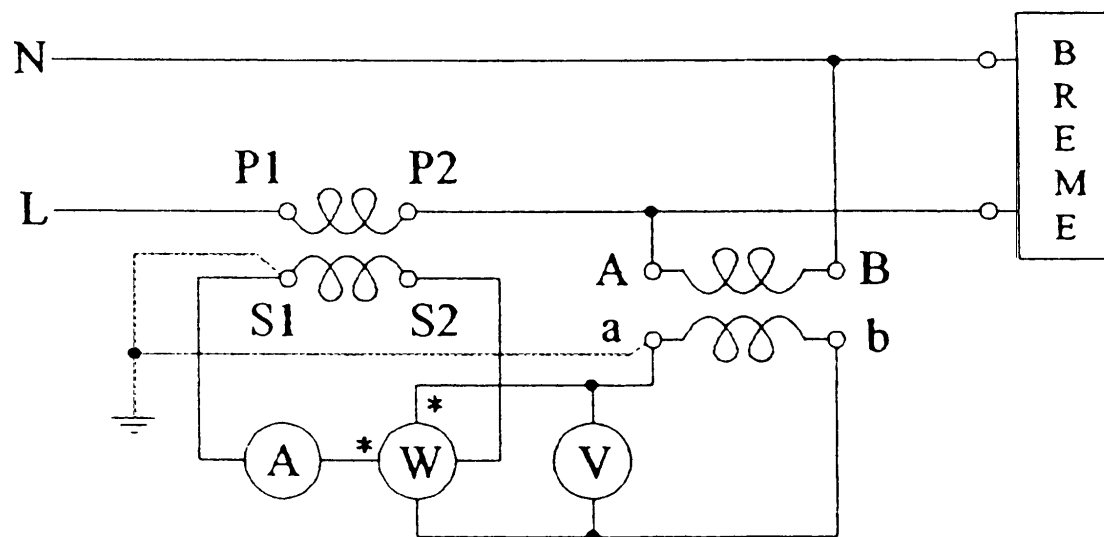




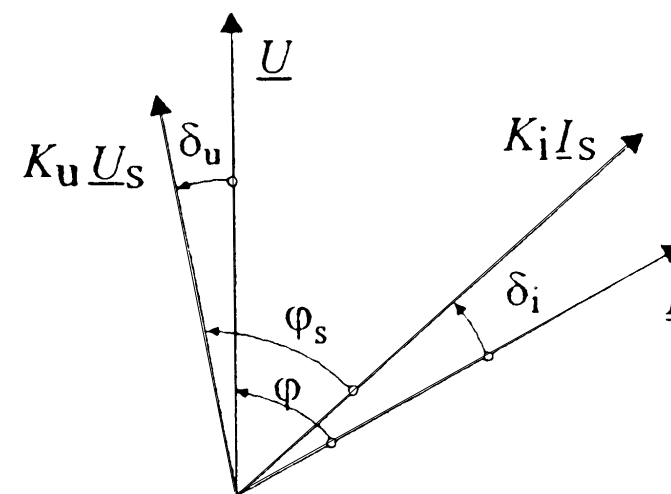
## *Vpliv merilnih transformatorjev na merilno negotovost*

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

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



a)



b)

Slika 4.44 Indirektno merjenje delovne moči





**Delovna moč** porabnika:

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

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

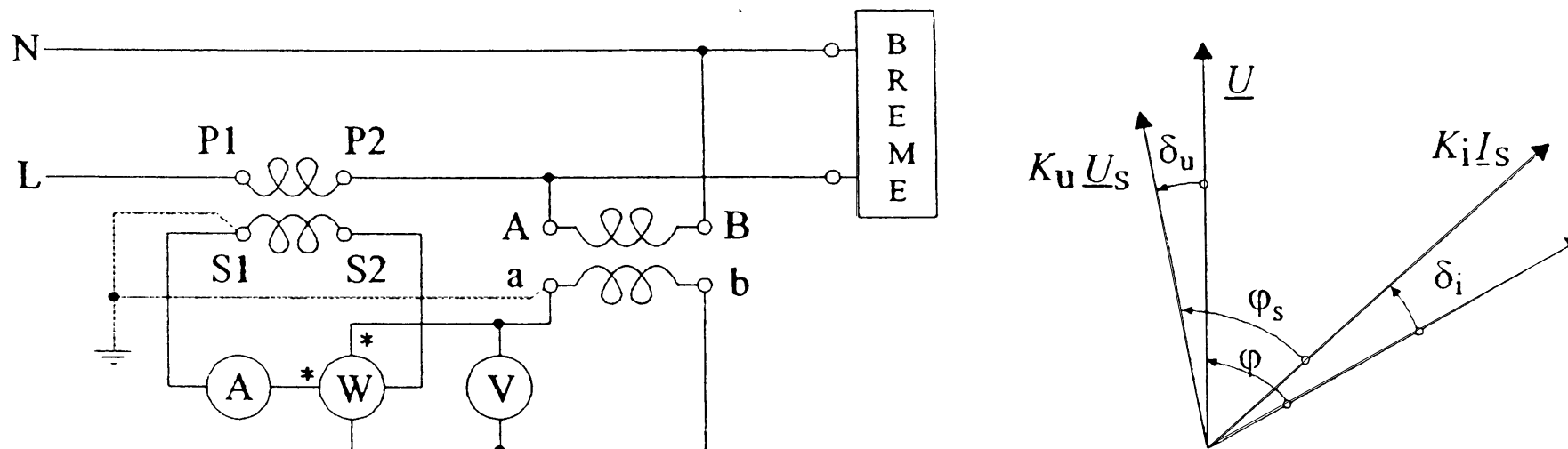
**Točni vatmeter** bi kazal:

$$P_{\text{W}} = U_s I_s \cos \varphi_s$$

**Realni vatmeter** (z lastnim pogreškom  $e_{\text{W}}$ ) kaže:

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





Slika 4.44 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!):

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

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

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

**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!

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

