



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za osnove elektrotehnike i električka mjerenja



9. TEMA

MJERENJE SNAGE I ENERGIJE

Predmet "Mjerenja u elektrotehnici"
Prof.dr.sc. Damir Ilić
Zagreb, 2020.

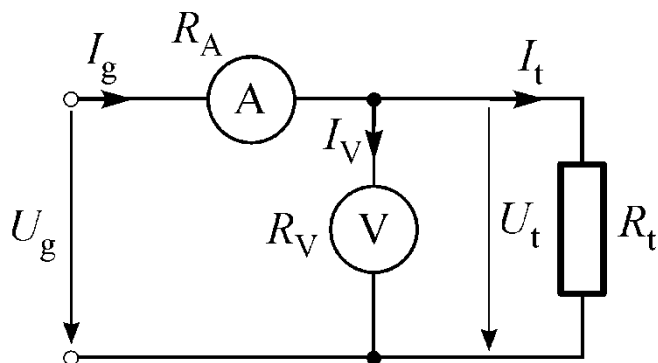
Teme cjeline

- ❑ **Mjerenje djelatne snage pri istosmjernoj struji**
- ❑ **Mjerenje djelatne snage pri izmjeničnoj struji**
- ❑ **Mjerenje djelatne i jalove snage u trofaznim sustavim**
- ❑ **Mjerenje energije**
- ❑ **Mjerni transformatori**
- ❑ **Naponski mjerni transformatori (induktivni)**
- ❑ **Strujni mjerni transformatori**

Mjerenje djelatne snage

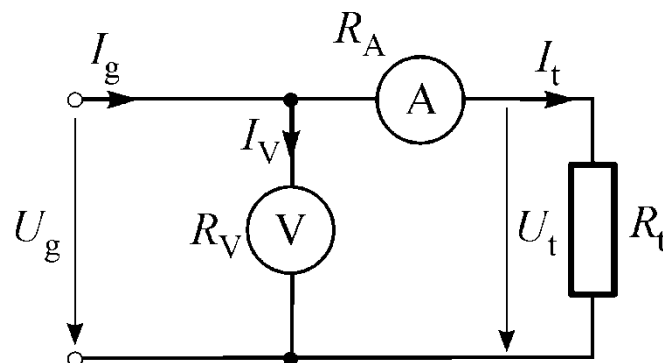
■ Mjerenje kod istosmjjerne struje ampermetrom i voltmetrom

- odabire se spoj kod kojeg se može izbjeći korekcija zbog potroška instrumenata (lijevi, za $R_t \ll R_V$, a desni za $R_t \gg R_A$)
- ako se korekcija ne može izbjeći, bolje je odabrati onaj spoj u kojem se kao korekcija pojavljuje otpor voltmetra (zašto?) kad određujemo ili snagu izvora P_g ili snagu trošila P_t



$$P_t = U_t I_g - \frac{U_t^2}{R_V}$$

$$P_g = U_t I_g + I_g^2 R_A$$



$$P_t = U_g I_t - I_t^2 R_A$$

$$P_g = U_g I_t + \frac{U_g^2}{R_V}$$

Mjerenje djelatne snage

▣ Jednofazno mjerenje snage

- kod izmjenične struje, srednja vrijednost djelatne snage jest

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt$$

- uz frekvenciju sinusnog valnog oblika ω , napon i struja te fazni pomak φ su

$$u(t) = U \sqrt{2} \sin \omega t \qquad i(t) = I \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi)$$

- tako dobivamo:

- ▣ djelatnu snagu $P = UI \cos \varphi$

- ▣ jalovu snagu $Q = UI \sin \varphi$

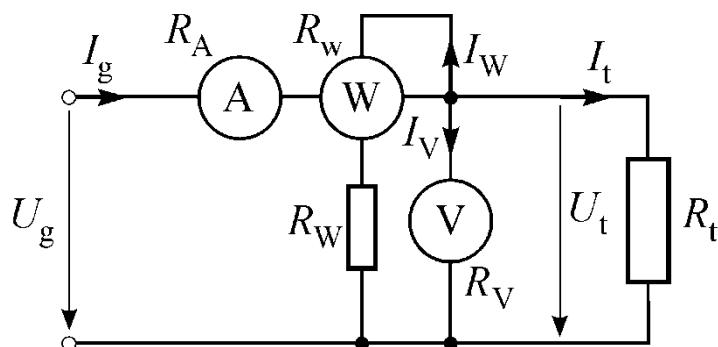
- ▣ prividnu snagu $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$

- **vatmetri** su instrumenti za mjerenje djelatne snage P (odziv ovisi o umnošku struje i napona te o $\cos \varphi$)
- **varmetri** su instrumenti za mjerenje jalove snage Q

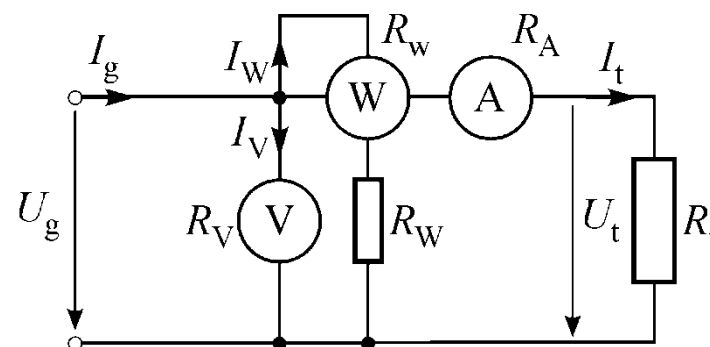
Mjerenje djelatne snage

□ Osnovni spoj za mjerenje snage

- ampermetrom i voltmetrom se kontrolira opterećenje strujne (otpor R_W) i naponske grane vatmetra (otpor R_W)
- kod mjerenja je potrebno uzeti u obzir i potrošak vatmetra
- ova metoda se rabi i kod istosmjerne i kod izmjenične struje



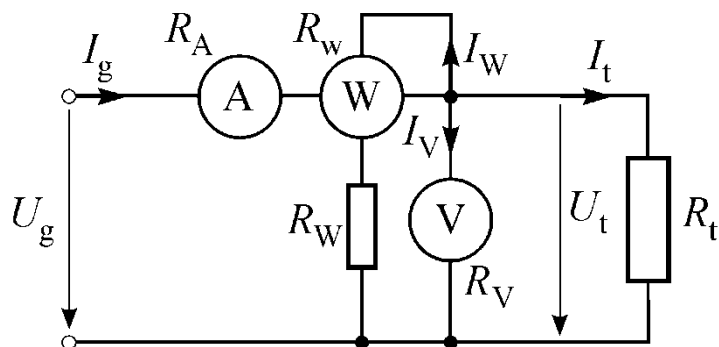
$$P_t = P_W - \left(\frac{U_t^2}{R_V} + \frac{U_t^2}{R_W} \right)$$
$$P_g = P_W + I_g^2 (R_A + R_W)$$



$$P_t = P_W - I_t^2 (R_A + R_W)$$
$$P_g = P_W + \frac{U_g^2}{R_V} + \frac{U_g^2}{R_W}$$

Mjerenje djelatne snage

- ovim spojem može se odrediti i $\cos\varphi$ trošila
- uvjet za točno mjerenje vatmetrom: struja kroz naponsku granu I_W mora biti u fazi s naponom na naponskoj grani!



$$U_t = U_V$$

$$I_t = I_A - \frac{U_V}{R_W} - \frac{U_V}{R_V}$$

$$\cos\varphi_t = \frac{P_t}{U_t I_t}$$

$$P_t = P_W - \left(\frac{U_t^2}{R_V} + \frac{U_t^2}{R_W} \right)$$

$$\cos\varphi_t = \frac{P_W - \left(\frac{U_V^2}{R_V} + \frac{U_V^2}{R_W} \right)}{U_V \left(I_A - \frac{U_V}{R_W} - \frac{U_V}{R_V} \right)}$$

Mjerenje djelatne snage

■ Problem faznog pomaka δ između napona na naponskoj grani U_t i struje kroz naponsku granu I_w (analogno razmatranje vrijedi i za shuntove)

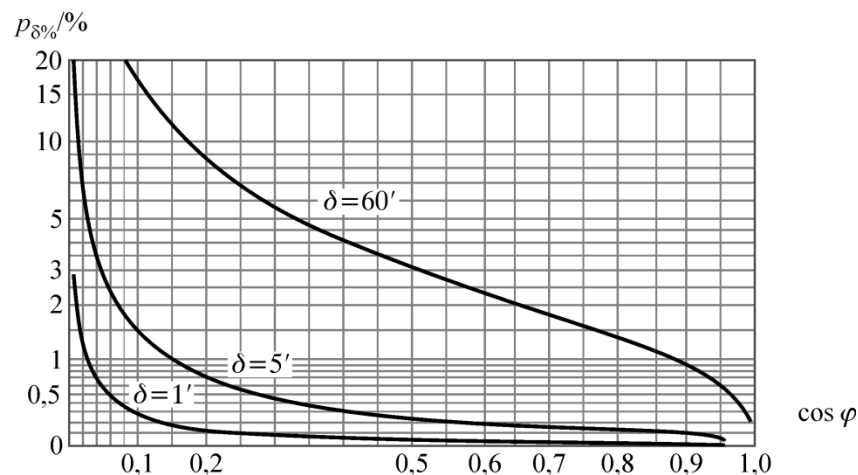
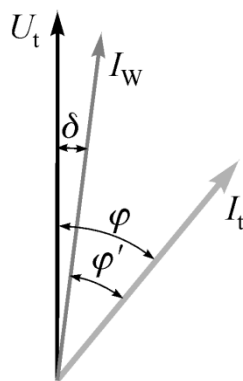
- u tom slučaju vatmetar neće mjeriti stvarnu snagu tereta $P = U_t I_t \cos\varphi$ nego snagu $P_W = U_t I_t \cos(\varphi - \delta)$, pa posljedično nastaje pogreška:

$$p_{\delta\%} = \frac{P_W - P}{P} 100\% = \frac{\cos(\varphi - \delta) - \cos\varphi}{\cos\varphi} 100\%$$

$$p_{\delta\%} = \frac{\cos\varphi \cos\delta + \sin\varphi \sin\delta - \cos\varphi}{\cos\varphi} 100\%$$

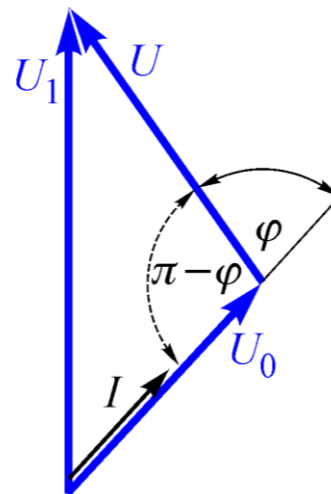
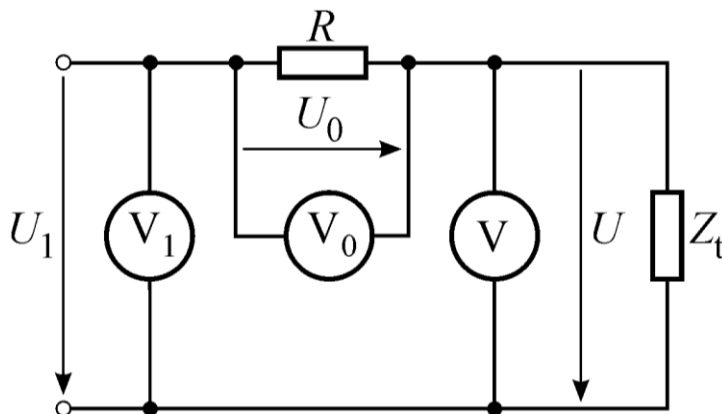
- kako je u realnom slučaju $\delta \ll \varphi$, a δ je mali kut ($\sin\delta \approx \delta$, $\cos\delta \approx 1$), slijedi da je:

$$p_{\delta\%} = \frac{\cos\varphi + \delta \sin\varphi - \cos\varphi}{\cos\varphi} 100\% = \delta \tan\varphi \cdot 100\%$$



Mjerenje djelatne snage

Metoda 3 voltmetra



- metoda za jednofazno mjerenje djelatne snage
- u seriju s mjerenim teretom spaja se poznati djelatni otpor R i mjeri napon U tereta, napon U_0 na otporu R i ukupni napon U_1 :
- napon U_0 je u fazi sa strujom I , dok napon U ima prema toj struji fazni pomak φ , koji ovisi o impedanciji tereta Z_t

$$U_1^2 = U_0^2 + U^2 - 2U_0U \cos(180^\circ - \varphi)$$

Mjerenje djelatne snage

- djelatna snaga i faktor snage tereta:

$$P = U \frac{U_0}{R} \cos \varphi = \frac{U_1^2 - U_0^2 - U^2}{2R}$$

$$\cos \varphi = \frac{U_1^2 - U_0^2 - U^2}{2U_0U}$$

- uporabom vrhunskih digitalnih voltmetara može se postići mala mjerna nesigurnost
- najpovoljnije: kada je otpor R približno jednak impedanciji tereta
- ovom metodom može se snaga mjeriti i na području viših frekvencija
- uočiti: struja kroz R mora biti u fazi s naponom na njemu jer u protivnom ne vrijede navedeni izrazi (vidi problem faznog pomaka)!

Mjerenje snage u trofaznim sustavima

■ Trofazni sustavi

- četverožični sustav: 3 faze (R, S i T) i nulvodič – spoj u zvijezdu
- trožični sustav: 3 faze (R, S i T) bez nulvodiča – spoj u trokut
- mjerenje djelatne snage P , jalove snage Q i prividne snage S
 - mjerne jedinice u kojima se one iskazuju redom su W, var i VA
- ako u to mjerenje uključimo i mjerenje vremena (vremenskog intervala) dobivamo mjerenje djelatne energije W_P , jalove energije W_Q i prividne energije W_S
 - mjerne jedinice u kojima se iskazuju ove energije mogu biti vezane na sekundu (Ws, vars i VAs) ili na sat (Wh, varh i VAh)
- **simetrično opterećenje** - struje i $\cos\varphi$ jednaki su u svim fazama pa je ukupna djelatna snaga sustava $P = 3P_F = 3U_F I_F \cos\varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi$
 - indeks "F" označava fazne veličine, dok indeks "L" označava linijske veličine
- **nesimetrično opterećenje** - struje i $\cos\varphi$ nisu jednaki u svim fazama pa je ukupna djelatna snaga suma snaga svih triju faza:

$$P_R = U_R I_R \cos\varphi_R; P_S = U_S I_S \cos\varphi_S; P_T = U_T I_T \cos\varphi_T$$

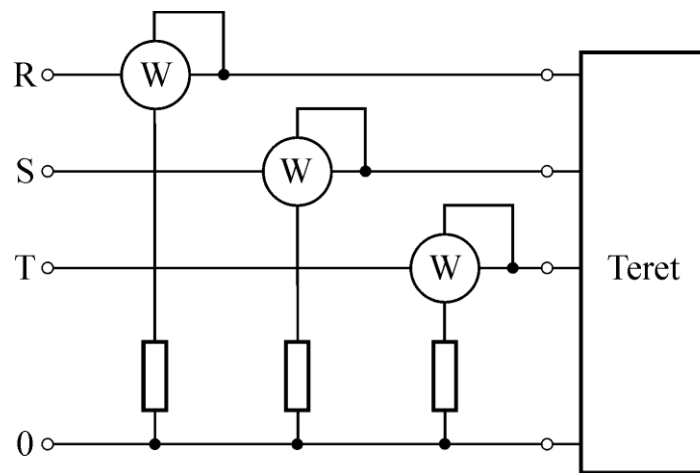
$$P = P_R + P_S + P_T$$

Mjerenje snage u trofaznim sustavima

■ Mjerenje djelatne snage P metodom 3 vatmetra

- četverožični sustav: 3 faze (R, S i T) i nulvodič
- kroz strujne grane vatmetara teku FAZNE struje tereta, a naponske grane mjere FAZNE napone pa svaki vatmetar mjeri snagu jedne faze
- njihov zbroj daje ukupnu djelatnu snagu trofaznog sustava:

$$P = P_{WR} + P_{WS} + P_{WT}$$



- ako je sustav simetričan i opterećenje dovoljno stabilno, mjerenje se načelno može provesti i samo jednim vatmetrom (koji se slijedno prebacuje u pojedine faze), no to nije preporučljivo zbog lošije točnosti mjerenja te zbog problema prespajanja strujnih grana
- metoda je primjenjiva i kod trožičnog sustava bez nulvodiča - uspostavi se umjetna nultočka sustava (izlazne naponske stezaljke spoje se zajedno)

Mjerenje snage u trofaznim sustavima

■ Mjerenje djelatne snage P metodom 2 vatmetra (Aronov spoj)

- trožični sustav bez nulvodiča: 3 faze (R, S i T); mjerenje djelatne snage P i simetričnih i nesimetričnih opterećenja

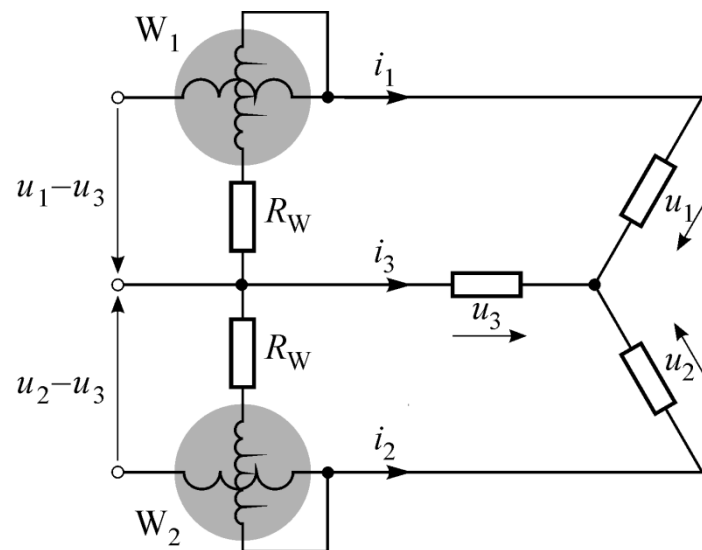
$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3$$

$$p = i_1(u_1 - u_3) + i_2(u_2 - u_3)$$

- vatmetar W_1 pokazat će srednju snagu P_1 prvog sumanda, a vatmetar W_2 srednju snagu P_2 drugog sumanda
- njihova suma daje djelatnu snagu trofaznog sustava:

$$P = P_1 + P_2$$



Mjerenje snage u trofaznim sustavima

- vektorski prikaz za slučaj simetričnog opterećenja

$$P_1 = U_{BT} I_R \cos(30^\circ - \phi) = U_1 I_1 \cos(30^\circ - \phi)$$

$$P_2 = U_{ST} I_S \cos(30^\circ + \varphi) = U_L I_L \cos(30^\circ + \varphi)$$

$$P_1 + P_2 = 2 U_1 I_1 \cos(30^\circ) \cos \varphi$$

$$P_1 + P_2 = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi = P$$

- očitavanja mogu biti i pozitivna i negativna

□ za $\varphi = 0$ $P_1 = P_2 = U_1 I_1 \cos(30^\circ)$

□ za $\varphi = 90^\circ$ $P_1 = -P_2$

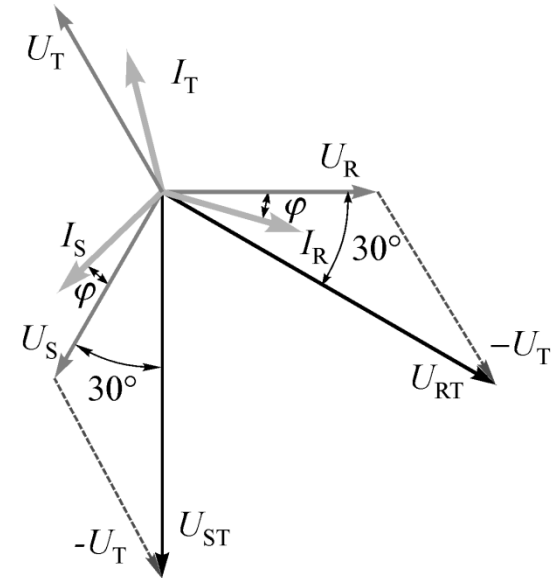
□ za $\varphi = -90^\circ$ $P_1 = -P_2$

- za simetrično opterečenje može se odrediti faktor snage:

$$P_1 - P_2 = U_1 I_1 \sin \varphi$$

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin\phi = \sqrt{3} (P_1 - P_2)$$

$$\tan \varphi = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}; \quad \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tan \varphi)^2}}$$



Mjerenje snage u trofaznim sustavima

□ Mjerenje jalove snage Q varmetrom

- načelno je to ostvarivo na jednak način kao i primjenom vatmetara kod mjerenja djelatne snage, a to znači metodom jednog, dva ili tri varmetra

□ Mjerenje jalove snage Q vatmetrom

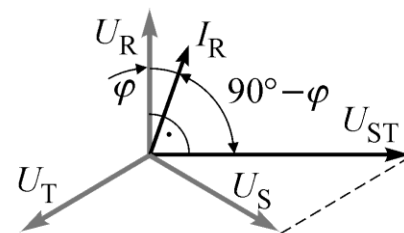
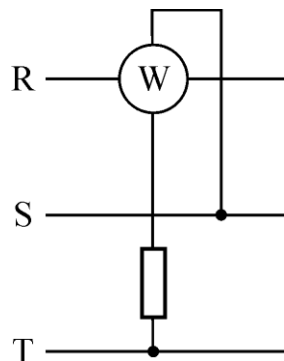
- jalova snaga može se mjeriti vatmetrom, no pritom je potrebno postići zakret od 90° , jer je $\cos(90^\circ - \varphi) = \sin\varphi$
- u trofaznim sustavim to se lako postiže spajanjem naponske grane vatmetra između onih dviju faza u koje nije spojena strujna grana (u primjeru strujna grana mjeri faznu struju I_R , a naponska grana linijski napon U_{ST} , koji je za faktor $\sqrt{3}$ veći od faznog:

$$P_W = U_{ST} I_R \cos(90^\circ - \varphi) = \sqrt{3} U_F I_F \sin\varphi = \sqrt{3} Q_F$$

- za simetrično opterećenje vrijedi:

$$Q = 3Q_F = 3(P_W/\sqrt{3})$$

- kod nesimetričnog opterećenja mjerenje se može provesti s tri vatmetra

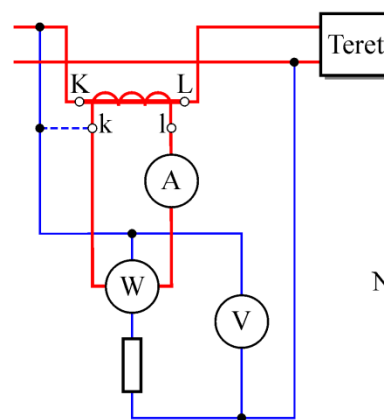


Mjerenje snage u trofaznim sustavima

■ Poluizravno mjerenje snage

- kad se nadmaši granica izravnog mjerenja veličina (napona i/ili struje) u strujni krug uključuju se i naponski i/ili strujni transformatori, kojima se mjereni napon i/ili struja smanjuju na razinu koja se može izravno mjeriti
 - kod struje ta je granica oko 50 A, a kod napona oko 1000 V
 - kad se mjeri snaga većih trošila na nižim naponima (npr. do 750 V) tada se koristi strujni mjerni transformator (SMT), a strujna grana vatmetra spaja se na njegov sekundar – to je poluizravna metoda
- na slici je prikazan jednofazni spoj (isti pristup vrijedi i za trofazni sustav, kad je potrebno koristiti više strujnih mjernih transformatora, ovisno o metodi mjerenja), a mjerenu snagu dobivamo tako da očitavanje na vatmetru pomnožimo prijenosnim omjerom SMT-a:

$$P = P_W K_I$$

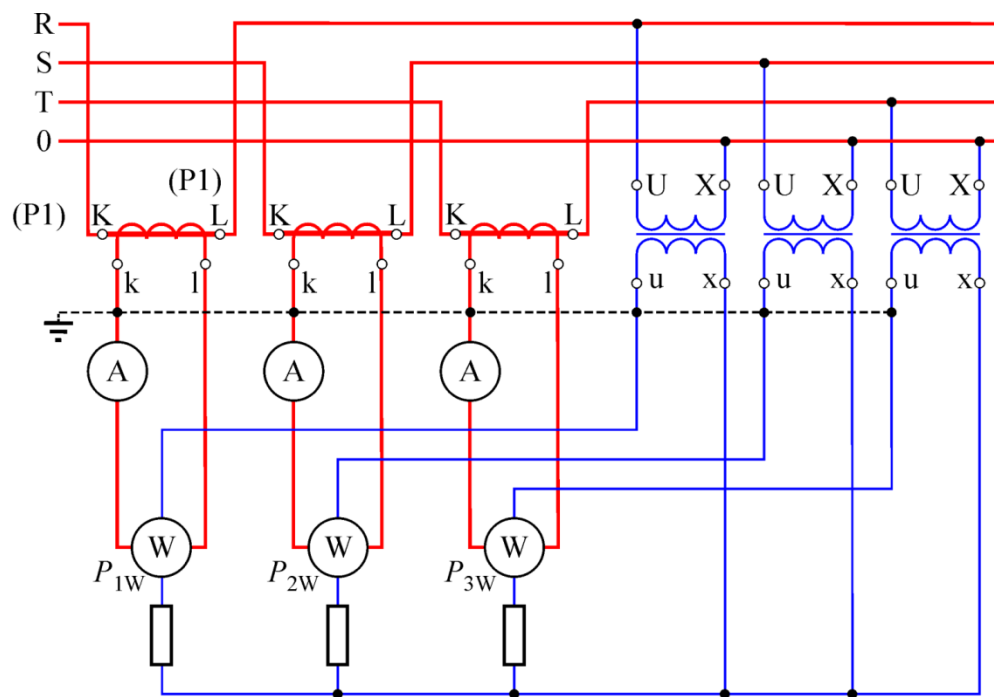


	Stare oznake	Nove oznake
Strujni transf.	K	P1
	L	P2
	k	s1
	l	s2
Naponski transf.	U	A
	X	B
	u	a
	x	b ili n

Mjerenje snage u trofaznim sustavima

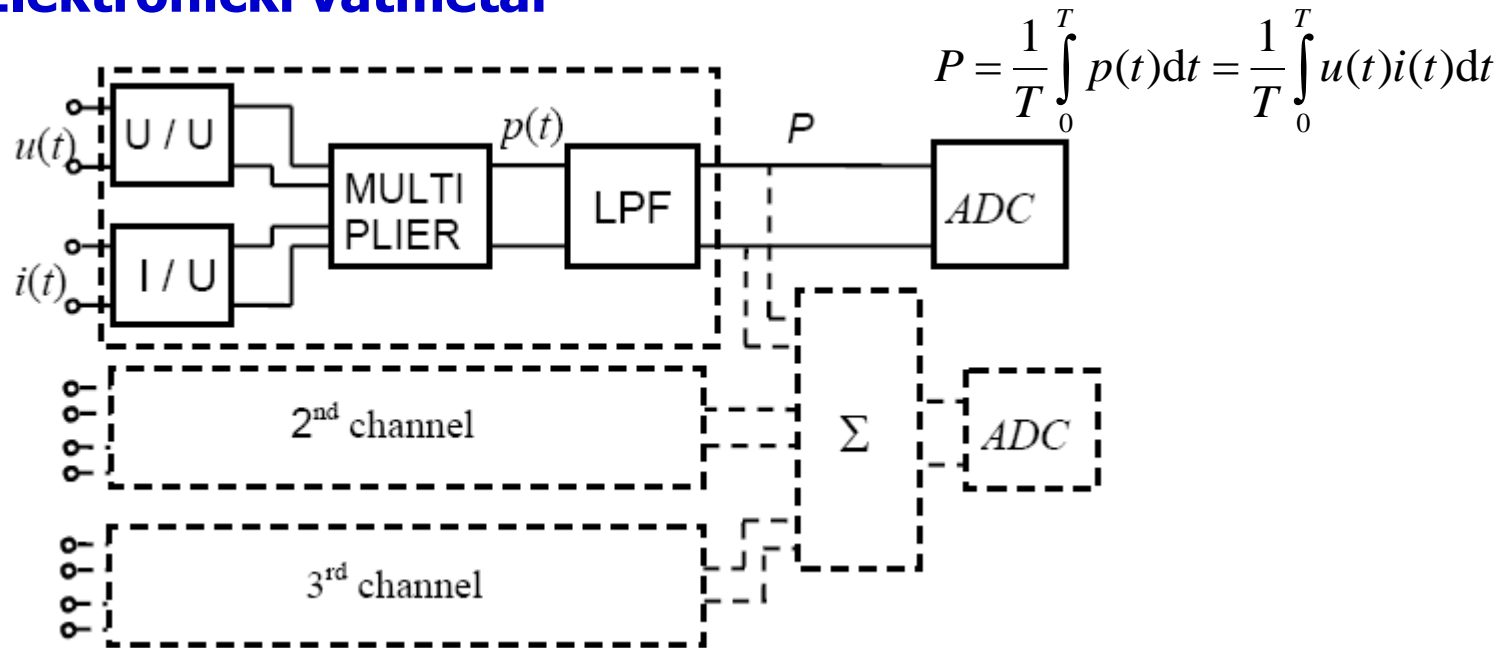
■ Neizravno mjerenje snage

- kod viših napona, osim SMT-a, u strujni krug uključuje se i naponski mjerni transformator (NMT) te se naponska grana vatmetra spaja na njegov sekundar
 - obavezno treba uzemljiti jednu sekundarnu stezaljku svakog strujnog i naponskog transformatora
- mjerenu snagu dobivamo tako da očitavanje na vatmetrima pomnožimo s prijenosnim omjerom SMT-a i NMT-a: $P = K_I K_U (P_{1W} + P_{2W} + P_{3W})$



Mjerenje snage

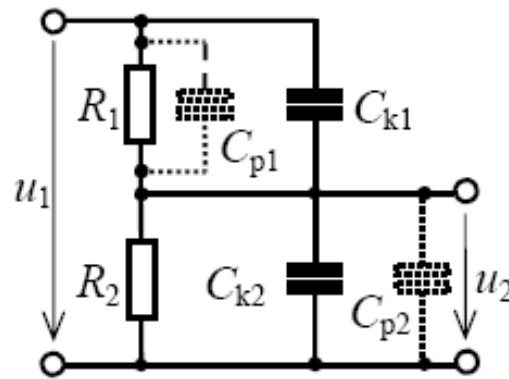
❑ Elektronički vatmetar



- mjere istosmjernu i izmjeničnu djelatnu snagu
- načelo rada: množe se trenutne vrijednosti napona i struje (ili njima razmjerne vrijednosti napona) te nakon niskog propusta "izvlači" srednja vrijednost napona, koja je razmjerna srednoj vrijednosti snage ($P = UI \cos \varphi$), i digitalizira A/D pretvornikom
- pretvorba u istosmjerni napon putem analognih i digitalnih množila

Mjerenje snage

- **pretvorba U/U :** putem frekvencijski kompenziranog djelila (vremenske konstante gornjeg i donjeg dijela djelila moraju biti jednake)



$$R_1(C_{k1} \parallel C_{p1}) = R_2(C_{k2} \parallel C_{p2})$$

- **pretvorba I/U :** SMT + shunt, shunt + pojačalo s galvanskom izolacijom, pretvornik s Hallovom sondom
 - uvjet: generirani napon mora biti u fazi s mjerenom strujom!

SMT i shunt	Shunt i pojačalo s galvanskom izolacijom (optocoupler)	Pretvornik s Hallovom sondom
50 Hz – 500 Hz	50 Hz – 100 kHz	50 Hz – 10 kHz

Mjerenje energije

■ Mjerenje djelatne energije kod izmjenične struje

- utrošena djelatna energija je razmjerna djelatnoj snazi i vremenskom intervalu:

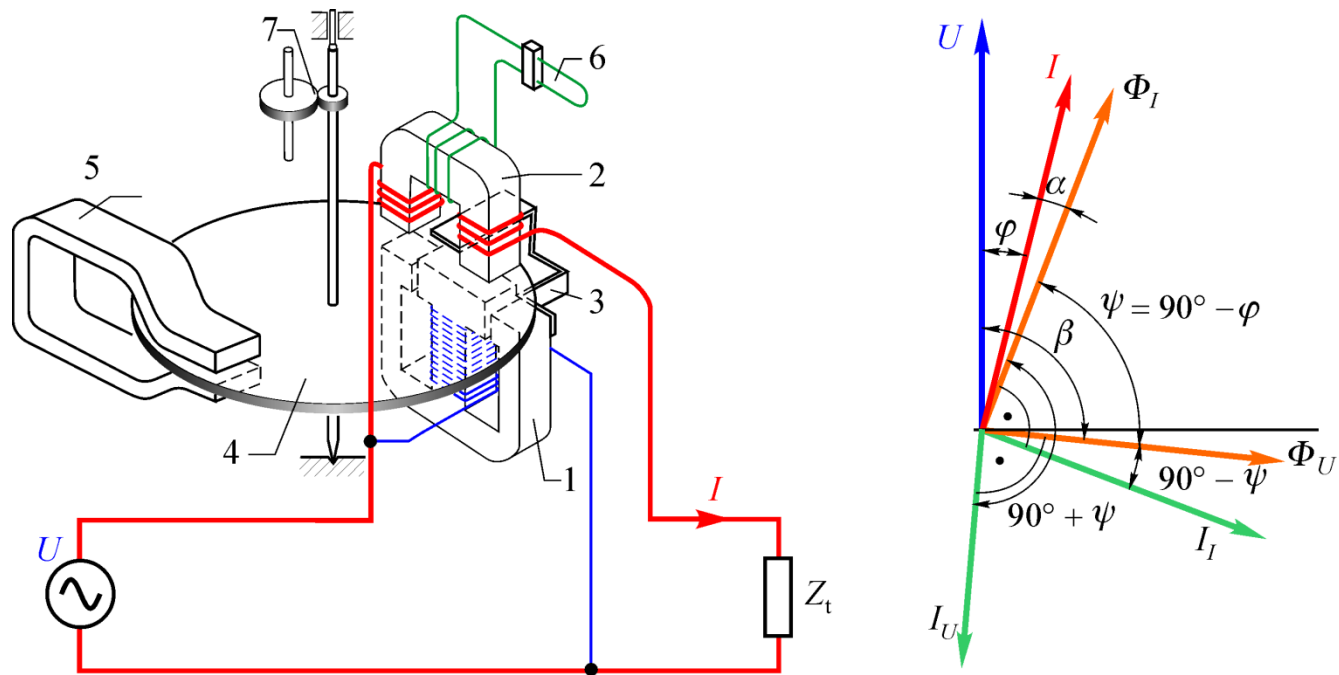
$$W_p = P \Delta t$$

- brojilo električne energije je mjerilo namijenjeno mjerenju električne energije integriranjem snage po vremenu, a mogu biti istosmjerna ili izmjenična
- brojila su najrašireniji mjerni uređaji (milijuni primjeraka!)
- izmjenična brojila mogu biti jednofazna i trofazna, najčešće se koriste za mjerenje djelatne energije, rjeđe za mjerenje jalove energije, a postoje i posebne izvedbe za mjerenje prividne energije
- za izmjeničnu struju najčešće su u primjeni indukcijska brojila (elektromehanička) i statička (elektronička) brojila
- indukcijsko brojilo (elektromehaničko) je brojilo kod kojeg magnetski tokovi proizvedeni od struja u namotima nepokretnih elektromagneta i sustava za kočenje djeluju na inducirane struje u pokretnom dijelu – rotoru, što izaziva njegovo kretanje, koje je razmjerno opterećenju (Pravilnik NN 4/19)
- statičko brojilo (elektroničko) je brojilo u kojem struja i napon djeluju na poluvodičke (elektroničke) dijelove stvarajući izlazni signal razmjeran energiji koja se mjeri (Pravilnik NN 4/19)

Mjerenje energije

Indukcijska (elektromehanička) brojila

- načelo rada objašnjeno je na sljedećoj prikaznici
- osnovni dijelovi su: dva elektromagneta (gornji, strujni **2**, namotan s nekoliko zavoja debele žice i donji, naponski **1**, namotan s puno zavoja tanke žice), kočni permanentni magnet **5**, rotirajuća aluminijska ploča **4** između polova elektromagneta, stremen za povrat magnetskog toka **3**, petlja **6** za ugađanje faznog pomaka, prijenos na brojač **7**



Mjerenje energije

■ Načelo rada:

- magnetski tok Φ_I strujnog elektromagneta razmjernan je struji I trošila, dok je tok Φ_U naponskog elektromagneta razmjernan naponu U trošila
- tokovi Φ_I i Φ_U induciraju u aluminijskoj ploči napone U_I i U_U koji za njima fazno zaostaju za 90° , a oni induciraju vrtložne struje I_I i I_U koje su s njima u fazi
- tok Φ_U s vrtložnim strujama I_I stvara zakretni moment M_1' , a tok Φ_I s vrtložnim strujama I_U zakretni moment M_1'' :

$$M_1' = k_1 \Phi_U I_I \cos(90^\circ - \Psi) = k_1 \Phi_U I_I \sin \Psi$$

$$M_1'' = k_2 \Phi_I I_U \cos(90^\circ + \Psi) = -k_2 \Phi_I I_U \sin \Psi$$

- vrtložne struje I_I i I_U razmjerne su tokovima Φ_I i Φ_U pa slijedi:

$$M_1' = k_3 \Phi_U \Phi_I \sin \Psi$$

$$M_1'' = -k_4 \Phi_I \Phi_U \sin \Psi$$

- tokovi Φ_I i Φ_U ne stvaraju nikakav moment sa strujama koje sami induciraju (kut između njih je 90°), pa je ukupni zakretni moment koji djeluje na rotirajuću aluminijsku ploču:

$$M_1 = M_1' + M_1'' = k_5 \Phi_U \Phi_I \sin \Psi \sim k_6 U I \sin \Psi$$

- zakretni moment M_1 bit će razmjerna djelatnoj snazi $P = U I \cos \varphi$ samo ako je

$$\sin \Psi = \cos \varphi, \text{ tj. } \Psi = 90^\circ \pm \varphi$$

- zbog gubitaka u željezu strujnog elektromagneta i gubitaka u aluminijskoj ploči, tok Φ_I zaostajat će strujom I za mali kut α
- tok Φ_U induciraju naponskog elektromagneta mora zaostajati za kut $\beta = \alpha + 90^\circ$

Mjerenje energije

- zadovoljavanje prethodnog uvjeta postiže se grananjem toka Φ_U izvedbom jezgre, te finim faznim ugađanjem: pomicanjem metalnog krilca u zračnom rasporu kod naponskog elektromagneta te ugađanjem djelatnog otpora namota strujnog elektromagneta
- protumoment M_2 dobiva se permanentnim magnetom, čiji magnetski tok zahvaća aluminijsku ploču brojila, a razmjeran njezinoj brzini vrtnje:

$$M_2 = k_7 \omega$$

- kad su momenti M_1 i M_2 u ravnoteži ($M_1 = M_2$) tada je brzina vrtnje aluminijske ploče razmjerna mjerenoj snazi,

$$\omega = k P$$

pa je broj okretaja u vremenskom intervalu Δt razmjeran mjerenoj energiji

- indukcijska brojila konstruirana su za struje trošila do 100 A, mogu biti jednotarifna ili dvotarifna, a redovito se registrirana potrošnja mjeri u kilovatsatima (kWh)
- za svaki tip indukcijskog brojila proizvođač definira konstantu brojila c koja se izražava u broju okretaja po kWh (npr. 1000 okr/kWh)
- ako se pločica brojila okrenula za vrijeme mjerenja N puta, onda brojilo pokazuje utrošak djelatne energije:

$$W_p = N / c \quad ; \text{ za } [c] = \text{okr/kWh} \text{ izračunata energija bit će u kWh}$$

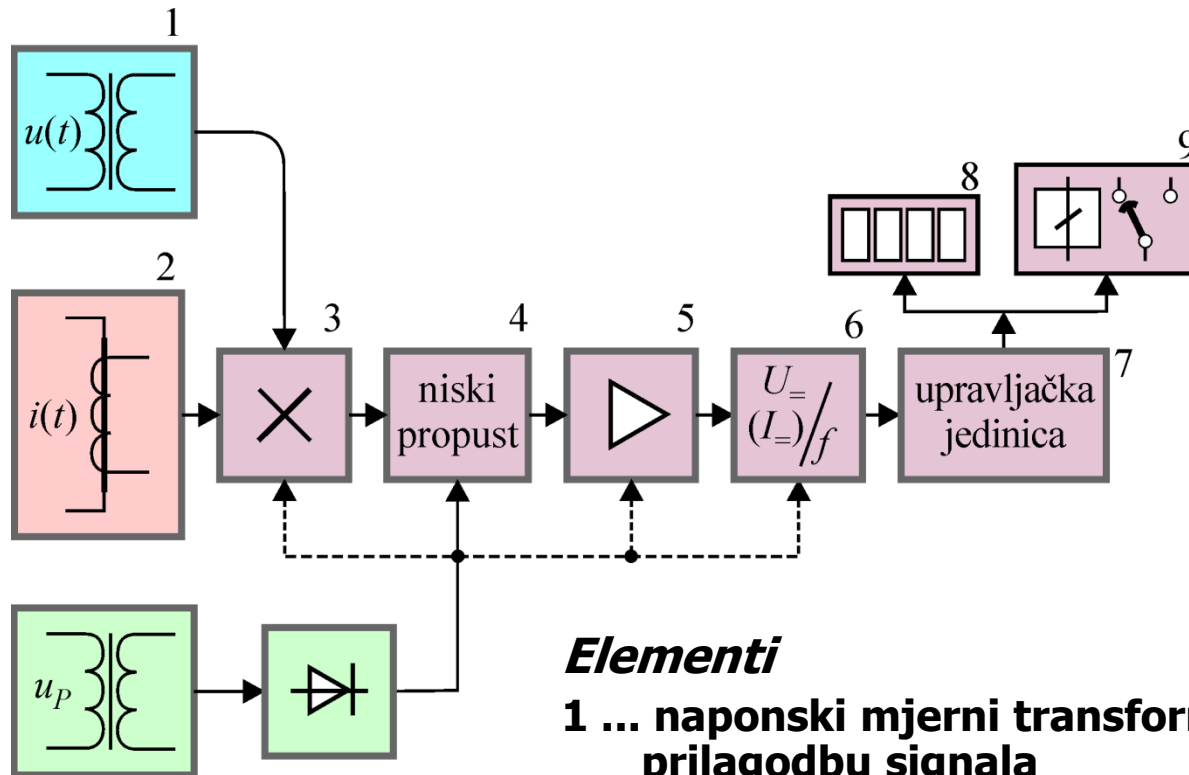
Mjerenje energije

□ Statička (elektronička) brojila

- koriste se na obračunskim mjernim mjestima većih potrošača, dok u niskonaponskim mrežama postupno zamjenjuju indukcijska brojila
- prednosti:
 - znatno bolja točnost (mogu se postići nesigurnosti i 0,1 %)
 - znatno manji vlastiti potrošak
 - neosjetljivost na nagib i položaj pri ugradnji
 - manja ovisnost pokazivanja o promjenama napona i frekvencije
 - sposobnost pohranjivanja obračunskih podataka nekoliko mjeseci i automatsko očitavanje mjernih vrijednosti na mjernom mjestu

načelo rada: mjerena djelatna snaga pretvara u njoj razmjern istosmjerni napon, a on u broj impulsa u određenom intervalu

Mjerenje energije



Elementi

- 1 ... naponski mjerni transformator (NMT) za prilagodbu signala
- 2 ... strujni mjerni transformator (SMT) za prilagodbu signala
- 3 ... množilo
- 4 ... niskopropusni filter koji izdvaja istosmjernu komponentu izlaznog napona razmjernu snazi trošila
- 5 ... pojačalo

Mjerenje energije

Elementi

6 ... nakon pojačanja, izlazni istosmjerni napon se pretvara u frekvenciju (niz impulsa); broj impulsa u vremenu Δt iza tog pretvornika razmjeran je energiji $W = P \cdot \Delta t$

7 ... upravljačka jedinica

8 ... brojač impulsa

9 ... izlazi koji omogućuju prijenos podataka na daljinu ili obradu podataka računalom

- posebnim sklopom dobivaju se pomoćni naponi napajanja potrebni za rad pojedinih elektroničkih sklopova (napajanje se uzima s naponskih stezaljki brojila)
- za elektroničko brojilo definira se konstanta brojila c koja se izražava u broju impulsa po kWh (npr. 10 000 imp/kWh)
- kod elektroničkih brojila razlikujemo analogna množila i digitalna množila

Mjerenje energije

■ Dodatne mogućnosti:

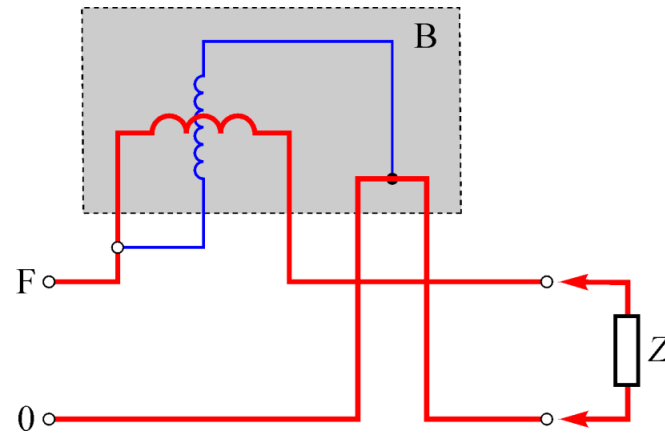
- daljinsko očitavanje brojila (žično ili bežično)
- složena tarifna politika
- memoriranje podataka
- više registara



Mjerenje energije

□ Priključivanje brojila

- u načelu se spajaju kao i vatmetri (naponska grana paralelno trošilu, a strujna grana u seriju s trošilom)



- ovdje je važno uočiti da struja trošila teče i kroz brojilo, pa ono mora tomu odgovarati
- podjela:
 - izravno spojeno brojilo - brojilo koje je namijenjeno za izravni priključak na električnu mrežu
 - transformatorsko brojilo - brojilo namijenjeno za priključak na električnu mrežu preko jednog ili više mjernih transformatora

■ Norme i pravilnici koji se odnose na brojila

- Pravilnik o tehničkim i mjeriteljskim zahtjevima koji se odnose na mjerila (»Narodne novine«, broj 21/16)
- Pravilnik o postupku ispitivanja brojila električne energije namijenjenih za uporabu u kućanstvu, trgovini i lakoj industriji (»Narodne novine«, broj 4/19) – skraćeno **Pravilnik NN 4/19**
- DIREKTIVA 2014/32/EU EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA od 26. veljače 2014. o usklađivanju zakonodavstva država članica u odnosu na stavljanje na raspolaganje mjernih instrumenata na tržištu (preinačena) – skraćeno **MID**
- [HRN EN 62052-11:2008](#) (+ispravci) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- Opći zahtjevi, ispitivanja i ispitni uvjeti -- 11. dio: Mjerna oprema (IEC 62052-11:2003; EN 62052-11:2003)
- [HRN EN 62052-21:2008](#) (+ispravci) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- Opći zahtjevi, ispitivanja i ispitni uvjeti -- 21. dio: Oprema za upravljanje tarifom i potrošnjom (IEC 62052-21:2004; EN 62052-21:2004)
- [HRN EN 62052-31:2016](#) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- Opći zahtjevi, ispitivanja i ispitni uvjeti -- 31. dio: Sigurnosni zahtjevi i ispitivanja (IEC 62052-31:2015; EN 62052-31:2016)
- [HRN EN 62053-11:2008](#) (+ispravci) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- Posebni zahtjevi -- 11. dio: Elektromehanička brojila djelatne energije (razreda 0,5, 1 i 2) (IEC 62053-11:2003; EN 62053-11:2003)
- [HRN EN 62053-21:2008](#) (+ispravci) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- Posebni zahtjevi -- 21. dio: Statička brojila djelatne energije (razreda 1 i 2) (IEC 62053-21:2003; EN 62053-21:2003)

* (+ispravci) – znači da postoje i ispravci navedene norme

■ Norme i pravilnici koji se odnose na brojila

- [HRN EN 62053-22:2008](#) (+ispravci) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- Posebni zahtjevi -- 22. dio: Statička brojila djelatne energije (razreda 0,2 S i 0,5 S) (IEC 62053-22:2003; EN 62053-22:2003)
- [HRN EN 62053-23:2008](#) (+ispravci) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- Posebni zahtjevi -- 23. dio: Statička brojila jalove energije (razreda 2 i 3) (IEC 62053-23:2003; EN 62053-23:2003)
- [HRN EN 62053-24:2015](#) (+ispravci) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- Posebni zahtjevi -- 24. dio: Statička brojila jalove energije osnovne frekvencije (razreda 0,5 S, 1S i 1) (IEC 62053-24:2014; EN 62053-24:2015)
- [HRN EN 62053-31:2008](#) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- Posebni zahtjevi -- 31. dio: Impulsni izlazni sklopovi za elektromehanička i elektronička brojila (samo dvožična) (IEC 62053-31:1998; EN 62053-31:1998)
- [HRN EN 62053-52:2008](#) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- Posebni zahtjevi -- 52. dio: Simboli (IEC 62053-52:2005; EN 62053-52:2005)
- [HRN EN 50470-1:2008](#) (+ispravci) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- 1. dio: Opći zahtjevi, ispitivanja i ispitni uvjeti -- Mjerna oprema (razredi točnosti A, B i C) (EN 50470-1:2006)
- [HRN EN 50470-2:2008](#) (+ispravci) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- 2. dio: Posebni zahtjevi -- Elektromehanička brojila djelatne energije (razredi točnosti A i B) (EN 50470-2:2006)
- [HRN EN 50470-3:2008](#) (+ispravci) - Električna brojila za izmjeničnu struju -- 3. dio: Posebni zahtjevi -- Statička brojila djelatne energije (razredi točnosti A, B i C) (EN 50470-3:2006)

Mjerenje energije

■ Pravilnik NN 4/19

□ odnosi se na:

- brojila djelatne električne energije razreda točnosti A, B i C,
- indukcijska brojila električne energije razreda točnosti 0,5, 1, 2 i 3
- statička brojila djelatne električne energije razreda točnosti 0,2 S i 0,5 S, 1 i 2,
- statička brojila jalove električne energije razreda točnosti 2 i 3

□ **dvosmjerno brojilo** - brojilo koje mjeri električnu energiju u dva smjera: smjer + (pozitivni smjer, prijam, potrošnja) te smjer – (negativni smjer, predaja, proizvodnja)

□ **kombi brojilo** - statičko brojilo električne energije koje unutar jednog kućišta ima mjerne sustave za odvojeno mjerenje djelatne i jalove električne energije; kombi brojilo može biti i dvosmjerno i u tom slučaju mjeri potrošenu djelatnu energiju (A+), proizvedenu djelatnu energiju (A–), potrošenu jalovu energiju (R+) i proizvedenu jalovu energiju (R–)

□ **višetarifno brojilo** - brojilo s više brojača (registara energije), koji u određenim vremenskim razmacima bilježe električnu energiju različitih tarifa

□ **brojilo za registraciju vršne električne snage** (brojilo s pokazivanjem maksimuma) - brojilo s dodatnim uređajem koje mjeri najveću vrijednost srednje električne snage u uzastopnim vremenskim razmacima jednakog trajanja (u razdoblju između dvaju uzastopnih očitavanja)

□ **brojilo s davačem impulsa** - brojilo s dodatnim uređajem koji daje impulse, koji odgovaraju određenoj količini električne energije, a služe za daljinsko mjerenje

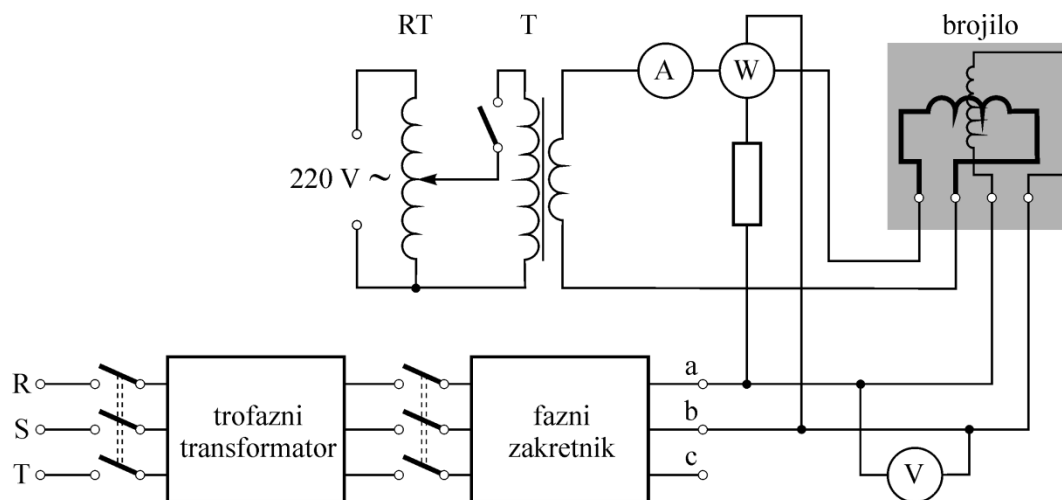
Mjerenje energije

- Pravilnik NN 4/19
 - Postupak ispitivanja mjeriteljskih značajki brojila sastoji se od:
 - 4.2.1. Zagrijavanja
 - 4.2.2. Ispitivanja izolacije (ispitivanje izmjeničnim naponom)
 - 4.2.3. Ispitivanja praznog hoda (stanje bez opterećenja)
 - 4.2.4. Ispitivanja pokretanja brojila
 - 4.2.5. Ispitivanja točnosti brojila
 - 4.2.6. Provjere konstante brojila i ispravnosti registriranja električne energije
 - 4.2.7. Ispitivanja dodatnih naprava brojila
- Ispitivanje točnosti brojila u principu se provodi tako da se usporedi utrošak energije W_B koje je pokazalo brojilo s referentnom vrijednošću utroška energije W_{ref} – ona se može odrediti ili mjerenjem snage i vremenskog intervala ($W = Pt$), ili pak pomoću etalonskih brojila (komparatora)
- Relativna postotna pogreška tada je:

$$p_{\%} = \frac{W_B - W_{\text{ref}}}{W_{\text{ref}}} 100 \%$$

□ Ispitivanje točnosti brojila

- Na slici je prikazan primjer ispitivanja točnosti jednofaznog brojila u spoju "umjetnog" opterećenja
 - naponska i strujna grana brojila priključene su na neovisne izvore (uz mogućnost ugađanja njihovih veličina te faznog pomaka između napona i struje) - naponski izvor, koji daje "nominalni" napon, opterećen je malim strujama naponskih grana brojila i vatmetra, a da bi izvor struje dao potrebnu "nominalnu" struju dovoljan je mali napon potreban za pokrivanje padova napona na strujnim granama brojila i vatmetra
 - pri ovom spoju utrošak energije (ukupna snaga koju daju naponski i strujni izvor) nije značajan, dok brojilo "vidi" umnožak $(\text{nominalni napon}) \times (\text{nominalna struja}) \times \cos \varphi \times t$
 - ispitivanje se provodi pri različitim vrijednostima nominalnog napona, nominalne struje i faznog pomaka (ovisno o tipu brojila i zahtjevima pravilnika i/ili normi)



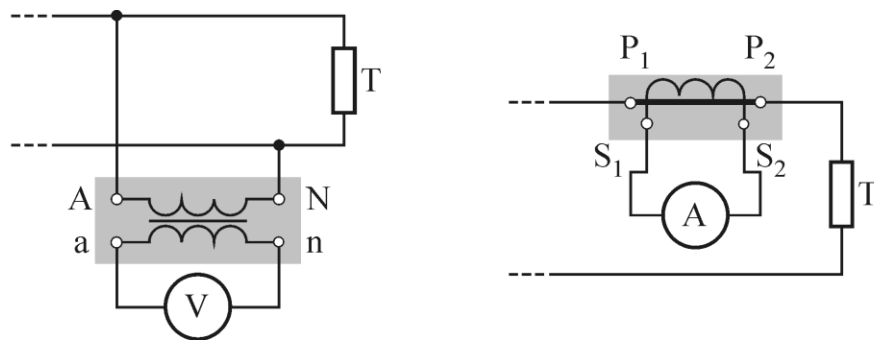
Mjerni transformatori

□ Ovdje razmatramo prvenstveno mjerenja izmjeničnih veličina pri frekvenciji mreže (50 Hz)

- previsoki izmjenični naponi i prevelike izmjenične struje, koji se ne mogu izravno mjeriti mjernim instrumentima, smanjuju se na prikladne razine mjernim transformatorima
- njima se ujedno mjerni krug galvanski odvaja (izolira) od opasnih visokih napona (!)

□ Razlikujemo naponske mjerne transformatora (NMT) i strujne mjerne transformatore (SMT)

- na slici prikazan je primjer spajanja NMT-a i SMT-a pri jednofaznom mjerenju: primarna strana spaja se u mjerni krug čiju veličinu želimo mjeriti (napon ili struju), a na sekundarnoj strani mjernim instrumentom (voltmetrom ili ampermetrom) mjerimo sekundarnu veličinu



Mjerni transformatori

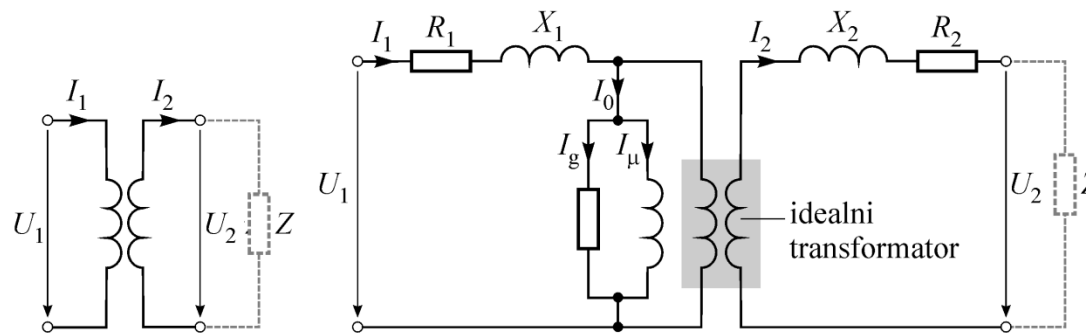
□ Od mjernih transformatora zahtijeva se:

- transformacija veličine u točnom omjeru i bez faznog pomaka
- tim zahtjevima odgovara idealni transformator i pritom vrijedi

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}; \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

□ Kod realnog transformatora imamo:

- otpor namota (R_1 na primaru, R_2 na sekundaru), rasipni induktivitet namota (L_1 na primaru, L_2 na sekundaru, $X_1 = \omega L_1$, $X_2 = \omega L_2$) i jezgru koja ima konačnu magnetsku vodljivost i treba struju magnetiziranja (djelatne gubitke nadomještamo s R_0 , a gubitke magnetiziranja reaktancijom X_0)

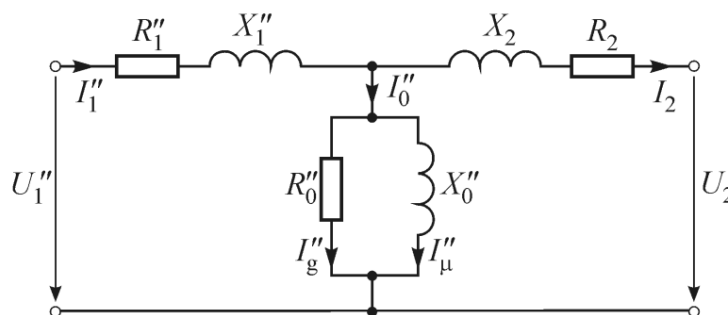


Mjerni transformatori - naponski (induktivni)

■ Nadomjesna shema naponskog mjernog transformatora (NMT-a)

- sve veličine reducirane su na sekundarnu stranu

$$U_1'' = U_1 \frac{N_2}{N_1} ; \quad I_1'' = I_1 \frac{N_1}{N_2} ; \quad R_1'' = R_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 ; \quad X_1'' = X_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

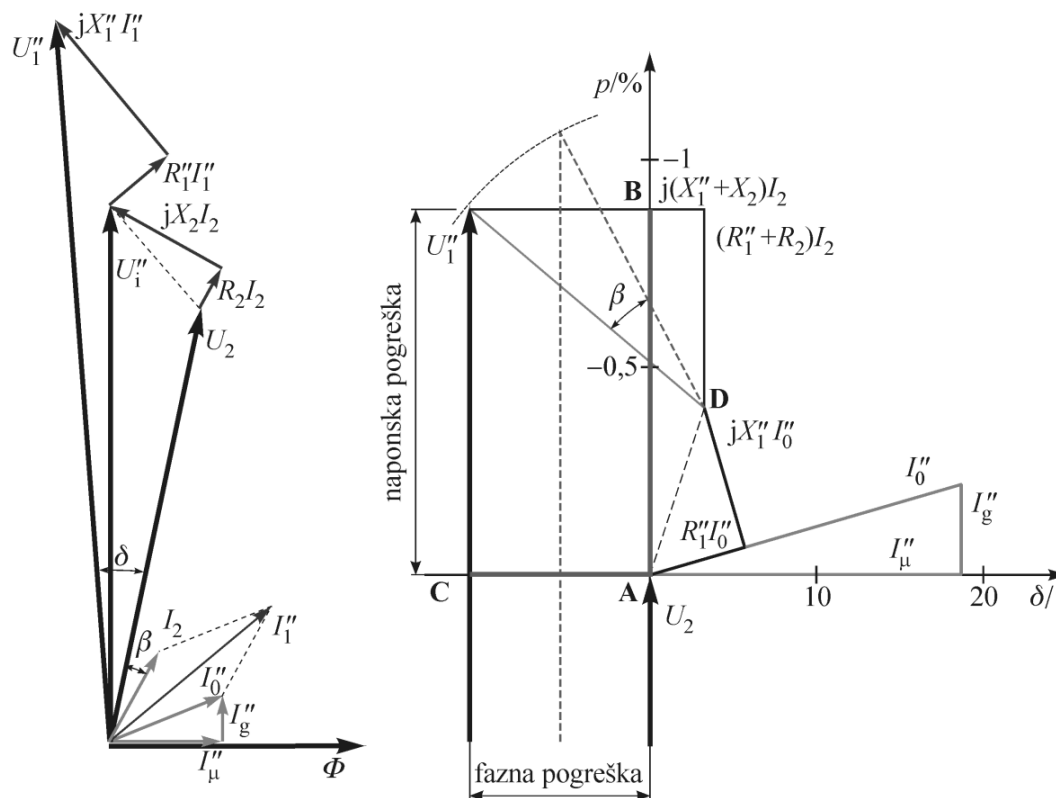


- sekundarna struja I_2 , koja općenito zaostaje za naponom U_2 za kut β , stvara padove napona $I_2 R_2$ i $j I_2 X_2$, pa inducirani napon u sekundaru U_i'' mora biti jednak vektorskom zbroju svih napona na sekundarnoj strani; efektivna vrijednost je $U_i'' = 4,44 \Phi_m N_2 f$, gdje je Φ_m tjemena vrijednost glavnog toka Φ , zajedničkog za primar i sekundar, koji inducira U_i''
- za održavanje toka Φ potrebna je struja magnetiziranja I_0'' : komponenta $I_g'' = U_i'' / R_0''$ pokriva gubitke u željezu i okomita je na Φ , dok je komponenta $I_\mu'' = U_i'' / X_0''$ u fazi s Φ
- struja I_1'' jednaka je vektorskom zbroju I_0'' i I_2
- napon U_1'' veći je od napona U_i'' za padove napona $I_1'' R_1''$ i $j I_1'' X_1''$

Mjerni transformatori - naponski (induktivni)

■ Vektorski dijagram realnog NMT-a

- na prikazanom vektorskom dijagramu padovi napona i fazni pomaci prikazani su pretjerano veliki u odnosu na stvarni slučaj
- očito je da naponi \mathbf{U}_2 i \mathbf{U}_1'' nisu jednaki niti po amplitudi niti po fazi



Mjerni transformatori - naponski (induktivni)

□ Pogreške kod realnog NMT-a

- K_n je nazivni omjer transformacije naponskog mjernog transformatora, odnosno omjer nazivnog primarnog i sekundarnog napona:

$$K_n = U_{1n} / U_{2n}$$

- nazivni sekundarni napon je **100 V ili 100/√3 V**, dok su nazivne vrijednosti primarnog napona određene normom IEC 60038:2009 *IEC standard voltages* (od par stotina volta do više stotina kilovolta)
- **naponska pogreška** NMT-a (pogreška prijenosnog omjera) redovito se iskazuje kao relativna postotna pogreška, a računa se izrazom:

$$\varepsilon_{U\%} = \frac{K_n U_2 - U_1}{U_1} 100 \%$$

- **kutna pogreška** $\Delta\varphi$ (fazna pogreška) jest razlika u fazi napona U_2 i U_1 , redovito se iskazuje u apsolutnom iznosu, ili u kutnim minutama (') ili u centiradijanima (crad); 1 crad = 34,38' – pogreška je pozitivna ako je vektor sekundarnog napona ispred vektora primarnog napona
- pogreške transformatora rastu s porastom opterećenja (struje) na sekundaru, pa se mjerni transformator može opteretiti do određene vrijednosti prividne snage (ponekad se to naziva i teret) na sekundaru

Mjerni transformatori - naponski (induktivni)

■ Točnost NMT-a (za mjerenje)

- klasa točnosti označena je najvećom dozvoljenom postotnom naponskom pogreškom kod nazivne frekvencije i nazivnog tereta, a normirane klase točnosti su: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0
- dozvoljene granice pogrešaka su sljedeće:

Klasa točnosti	$\varepsilon_U\%$	$\Delta\varphi$
0,1	$\pm 0,1 \%$	$\pm 5'$
0,2	$\pm 0,2 \%$	$\pm 10'$
0,5	$\pm 0,5 \%$	$\pm 20'$
1,0	$\pm 1,0 \%$	$\pm 40'$
3,0	$\pm 3,0 \%$	nisu ograničene

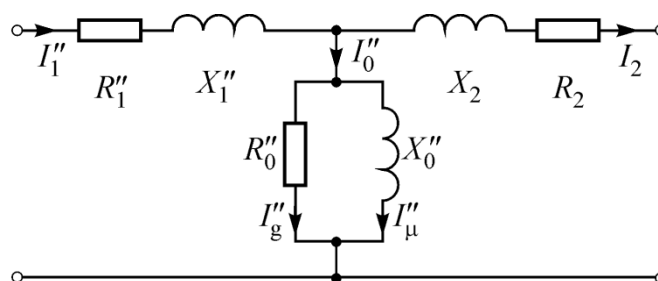
- naponska i fazna pogreška ne smiju prijeći granice iz gornje tablice za napone između 80 % i 120 % nazivnog napona, te za prividnu snagu na sekundaru između 25 % i 100 % nazivne, uz faktor snage 0,8 induktivno
- vrijednosti nazivne prividne snage (tereta) NMT-a za mjerenje kreću se od 10 VA do 500 VA

Mjerni transformatori - strujni

□ Nadomjesna shema strujnog mjernog transformatora (SMT-a)

- identična je onoj NMT-a, samo je ovdje interes omjer struja
- sve veličine reducirane su na sekundarnu stranu

$$U_1'' = U_1 \frac{N_2}{N_1} ; \quad I_1'' = I_1 \frac{N_1}{N_2} ; \quad R_1'' = R_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 ; \quad X_1'' = X_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$



- sekundarna struja I_2 , koja općenito zaostaje za naponom U_2 za kut β , stvara padove napona $I_2 R_2$ i $j I_2 X_2$, pa inducirani napon u sekundaru U_1'' mora biti jednak vektorskom zbroju svih napona na sekundarnoj strani; efektivna vrijednost je $U_1'' = 4,44 \Phi_m N_2 f$
- za održavanje toka Φ potrebna je struja magnetiziranja I_0'' : komponenta $I_g'' = U_1'' / R_0''$ pokriva gubitke u željezu i okomita je na Φ , dok je komponenta $I_\mu'' = U_1'' / X_0''$ u fazi s Φ
- struja I_1'' jednaka je vektorskom zbroju I_0'' i I_2 , pa je jasno da I_1'' i I_2 nisu jednake niti po amplitudi niti po fazi
- ako sekundar SMT-a ostane otvoren, tada je $I_2 = 0$ i čitava primarna struja služi za magnetiziranje jezgre – veliki gubici u željezu, termičko naprezanje, mehaničko naprezanje (OPASNO!)

□ Pogreške kod realnog SMT-a

- K_n je nazivni omjer transformacije strujnog mjernog transformatora, odnosno omjer nazivne primarne i sekundarne struje:

$$K_n = I_{1n} / I_{2n}$$

- nazivna sekundarna struja je 1 A ili 5 A
- **strujna pogreška** SMT-a (pogreška prijenosnog omjera) redovito se iskazuje kao relativna postotna pogreška, a računa se izrazom:

$$\varepsilon_{I\%} = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1} 100 \%$$

- **kutna pogreška** $\Delta\varphi$ (fazna pogreška) jest razlika u fazi struja I_2 i I_1 , redovito se iskazuje u apsolutnom iznosu, ili u kutnim minutama (') ili u centiradijanima (crad); 1 crad = 34,38' – pogreška je pozitivna ako je vektor sekundarne struje vremenski ispred vektora primarne struje
- pogreške transformatora prouzročuje upravo struja magnetiziranja I_0 pa se ona nastoji smanjiti izborom niskih indukcija, izborom odgovarajućih magnetskih materijala za jezgru, i dr.

Mjerni transformatori - strujni

□ Točnost SMT-a (za mjerenje)

- klasa točnosti označena je najvećom dozvoljenom postotnom strujnom pogreškom kod nazivne frekvencije i nazivne prividne snage (tereta), a normirane klase točnosti su: 0,1; 0,2; 0,2 S; 0,5; 0,5 S; 1; 3; 5
- nazivne prividne snage (teret) SMT-a za mjerenje: 2,5 VA, 5 VA, 10 VA, 15 VA i 30 VA
- dozvoljene granice pogrešaka su sljedeće:

Klasa točnosti	$\varepsilon_P\%$				$\Delta\varphi$			
	$0,05I_{1n}$	$0,2I_{1n}$	I_{1n}	$1,2I_{1n}$	$0,05I_{1n}$	$0,2I_{1n}$	I_{1n}	$1,2I_{1n}$
0,1	$\pm 0,4 \%$	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,1 \%$	$\pm 0,1 \%$	$\pm 15'$	$\pm 8'$	$\pm 5'$	$\pm 5'$
0,2	$\pm 0,75 \%$	$\pm 0,35 \%$	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,2 \%$	$\pm 30'$	$\pm 15'$	$\pm 10'$	$\pm 10'$
0,5	$\pm 1,5 \%$	$\pm 0,75 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 90'$	$\pm 45'$	$\pm 30'$	$\pm 30'$
1	$\pm 3,0 \%$	$\pm 1,5 \%$	$\pm 1,0 \%$	$\pm 1,0 \%$	$\pm 180'$	$\pm 90'$	$\pm 60'$	$\pm 60'$

Klasa točnosti	$\varepsilon_P\%$					$\Delta\varphi$				
	$0,01I_{1n}$	$0,05I_{1n}$	$0,2I_{1n}$	I_{1n}	$1,2I_{1n}$	$0,01I_{1n}$	$0,05I_{1n}$	$0,2I_{1n}$	I_{1n}	$1,2I_{1n}$
0,2 S	$\pm 0,75 \%$	$\pm 0,35 \%$	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,2 \%$	$\pm 0,2 \%$	$\pm 30'$	$\pm 15'$	$\pm 10'$	$\pm 10'$	$\pm 10'$
0,5 S	$\pm 1,5 \%$	$\pm 0,75 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 0,5 \%$	$\pm 90'$	$\pm 45'$	$\pm 30'$	$\pm 30'$	$\pm 30'$

Mjerni transformatori - strujni

- strujna i fazna pogreška ne smiju prijeći granice iz prethodnih tablica za prividnu sekundarnu snagu (teret) između 25 % i 100 % nazivne, uz faktor snage 0,8 induktivno
- dozvoljene granice pogrešaka za preostale dvije klase su:

Klasa točnosti	$\varepsilon_{I\%}$		$\Delta\varphi$	
	$0,5I_{1n}$	$1,2I_{1n}$	$0,5I_{1n}$	$1,2I_{1n}$
3	$\pm 3,0 \%$		nisu ograničene	
5	$\pm 5,0 \%$		nisu ograničene	

- strujna i fazna pogreška ne smiju prijeći granice iz gornje tablice za prividnu sekundarnu snagu (teret) između 50 % i 100 % nazivne, uz faktor snage 0,8 induktivno
- nazivnu impedanciju tereta na sekundaru Z_n dobivamo iz poznate nazivne prividne snage na sekundaru i nazivne sekundarne struje (podaci koji daje proizvođač) :

$$S_t = I_{2n}^2 Z_n$$

Mjerni transformatori

- Norme i pravilnici koji se odnose na mjerne transformatore
 - Pravilnik o mjeriteljskim i tehničkim zahtjevima za mjerne transformatore u mjernim grupama za mjerenje električne energije («Narodne novine», broj 11/06) – skraćeno **Pravilnik NN 11/06**
 - [HRN EN 61869-1:2010](#) Mjerni transformatori -- 1. dio: Opći zahtjevi (IEC 61869-1:2007, MOD; EN 61869-1:2009) / Instrument transformers -- Part 1: General requirements (IEC 61869-1:2007, MOD; EN 61869-1:2009)
 - [HRN EN 61869-2:2013](#) Mjerni transformatori -- 2. dio: Dodatni zahtjevi za strujne transformatore (IEC 61869-2:2012; EN 61869-2:2012) / Instrument transformers -- Part 2: Additional requirements for current transformers (IEC 61869-2:2012; EN 61869-2:2012)
 - [HRN EN 61869-3:2012](#) Mjerni transformatori -- 3. dio: Dodatni zahtjevi za induktivne naponske transformatore (IEC 61869-3:2011; EN 61869-3:2011) / Instrument transformers -- Part 3: Additional requirements for inductive voltage transformers (IEC 61869-3:2011; EN 61869-3:2011)
 - [HRN EN 61869-4:2014](#) Mjerni transformatori -- 4. dio: Dodatni zahtjevi za kombinirane transformatore (IEC 61869-4:2013; EN 61869-4:2014) / Instrument transformers -- Part 4: Additional requirements for combined transformers (IEC 61869-4:2013; EN 61869-4:2014/AC:2014)
 - [HRN EN 61869-5:2012](#) (+ispravak) Mjerni transformatori -- 5. dio: Dodatni zahtjevi za kapacitivne naponske transformatore (IEC 61869-5:2011; EN 61869-5:2011) / Instrument transformers -- Part 5: Additional requirements for capacitor voltage transformers (IEC 61869-5:2011; EN 61869-5:2011)
 - [IEEE C57.13 - 2016 Standard requirements for Instrument transformers](#)

Zaključak

- **Prikazane su različite metode mjerenja snage kod istosmjerne i izmjenične struje**
- **Prikazane su metode mjerenja snage u trofaznim sustavima**
- **Prikazano je mjerenje energije brojilima**
- **Prikazana je analiza naponskih i strujnih mjernih transformatora**