

# Mérések

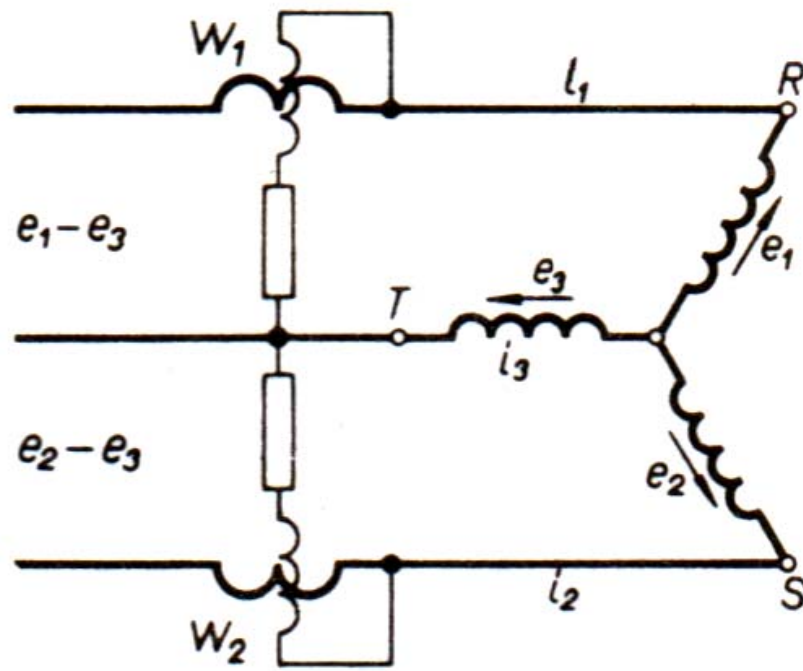
## 10. Előadás

# Teljesítménymérés két wattmérővel (Aron kapcsolás)

A háromfázisú rendszer teljesítményének pillanatértéke meghatározható a fázisteljesítmények pillanatértékeinek összege által.

$$P_{mom} = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3$$

A nullvezető nélküli háromfázisú rendszer áramainak összege minden pillanatban nullával egyenlő!



**Teljesítménymérés két wattmérővel  
(Aron kapcsolás)**

A nullvezető nélküli háromfázisú rendszer áramainak összege minden pillanatban nullával egyenlő!

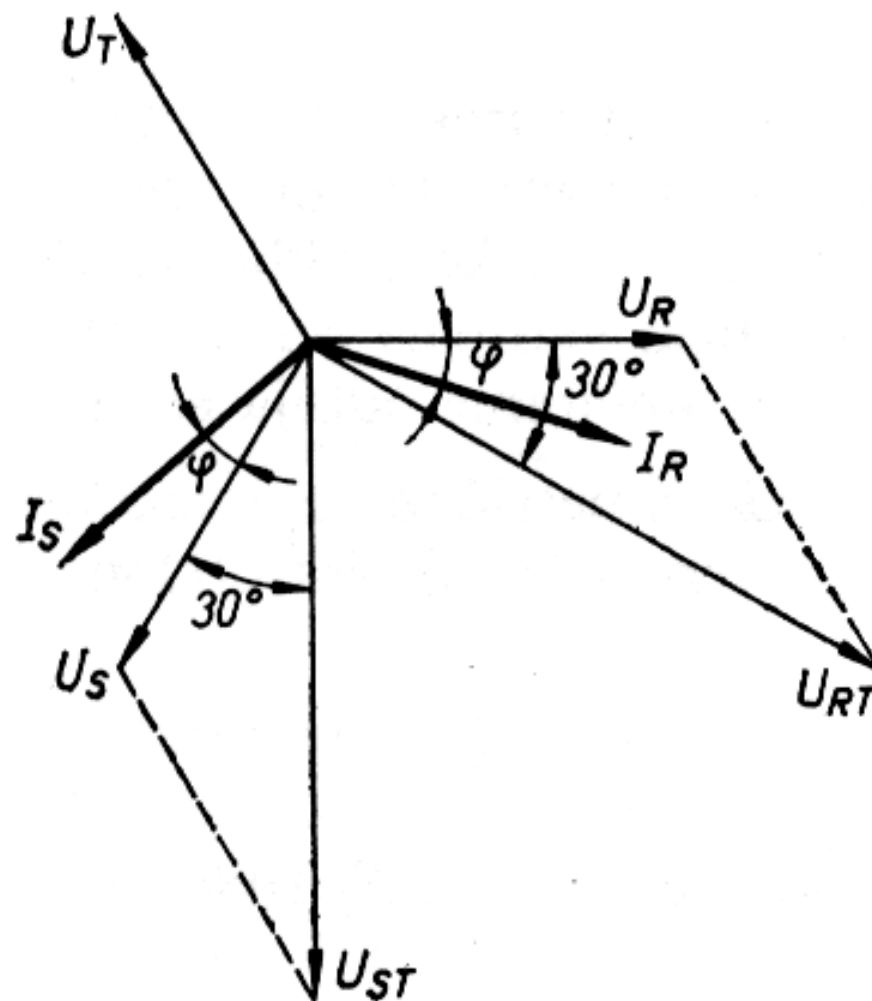
$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$-i_3 = i_1 + i_2$$

$$P_{mom} = e_1 i_1 + e_2 i_2 - e_3 (i_1 + i_2)$$

$$P_{mom} = i_1 (e_1 - e_3) + i_2 (e_2 - e_3)$$

$$P = P_1 + P_2$$



Slika 9.35. Vektorski dijagram Aronova spoja za mjerenje djelatne snage

$$P_1 = I_R U_{RT} \cos(30^\circ - \varphi)$$

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

$$\cos(30^\circ - \varphi) = \cos 30^\circ \cos \varphi + \sin 30^\circ \sin \varphi$$

$$\cos(30^\circ + \varphi) = \cos 30^\circ \cos \varphi - \sin 30^\circ \sin \varphi$$

$$\cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\sin 30^\circ = 0,5$$

$$P_1 + P_2 = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

$$P_1 - P_2 = UI \sin \varphi$$

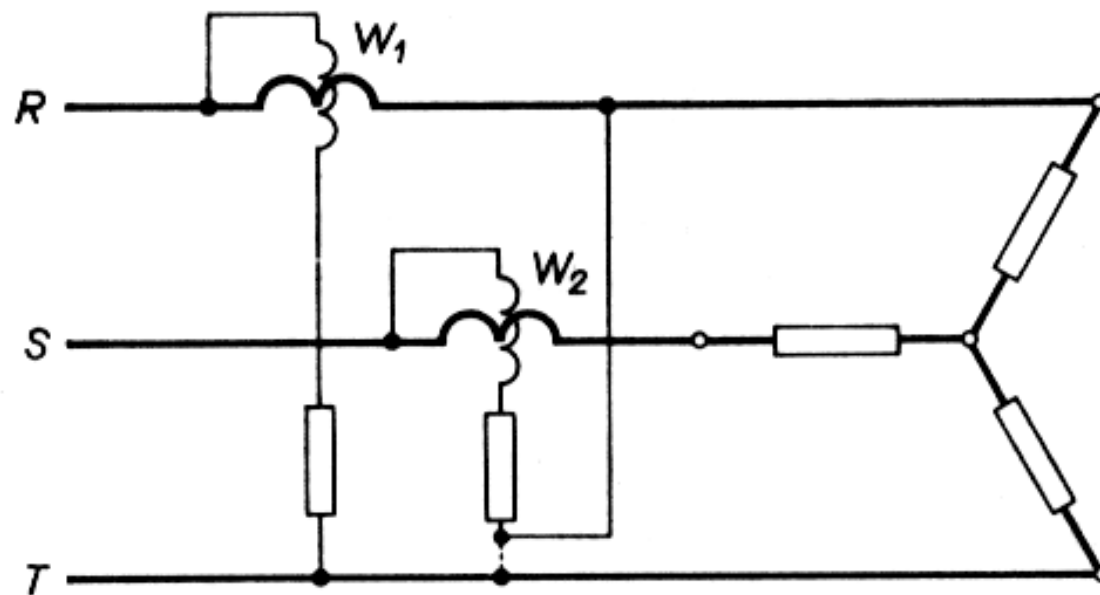
$$\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \frac{UI \sin \varphi}{\sqrt{3}UI \cos \varphi} = \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \varphi$$

jelöljük:  $\xi = \frac{P_2}{P_1}$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + 3 \left( \frac{1 - \xi}{1 + \xi} \right)^2}}$$

A wattméterekről leolvasott értékeket a fogyasztó fázistényezőjétől függően össze kell adni vagy ki kell vonni. Amennyiben még közelítőleg sem ismerjük a fázistényező nagyságát tévedhetünk az összegezésnél. Oda kell figyelni a helyes bekötésre, azaz figyelembe kell venni a fázisok időbeni sorrendjét, és melyek a be illetve kivezető csatlakozók a wattméter áram illetve feszültségkörében.

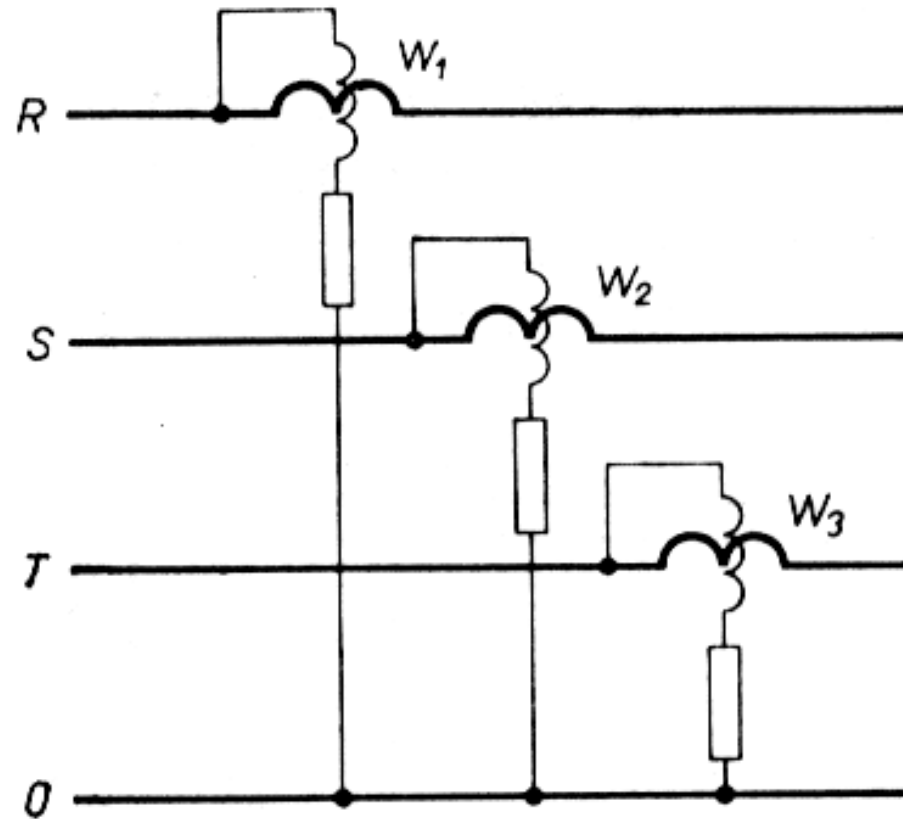




Slika 9.38. Kontrola pravilnog priključivanja vatmetara u Aronovu spoju

A bekötés helyességét a következőképpen ellenőrizhetjük: A  $W_1$  és  $W_2$  wattmérereket úgy kötjük be hogy pozitív kitérésük legyen. Az egyik kitérése kisebb lesz. Legyen az a  $W_2$  wattméter. Ennek a wattméternek a feszültségtekercsét leválasztjuk arról a fázisról amelyre nem kötöttünk áramtekercset, és arra a fázisra kötjük ahol a másik wattméter áramtekercse van. Amennyiben a kitérése most is pozitív, a wattméter helyesen volt bekötve és az értékét hozzá kell adni a másik wattméter értékéhez, ha most negatív a kitérés akkor ki kell vonni.

# Háromwattmérős módszer



Slika 9.40. Mjerenje djelatne snage metodom triju vatmetara

# Meddő teljesítmény mérési elve

A wattmérők az  $\underline{S}$  komplex teljesítmény valós összetevőjét realizálják mérési eredményként.

$$\operatorname{Re}[\underline{S}] = \operatorname{Re}[P + jQ] = P$$

A  $Q$  meddő teljesítmény mérésére alapvetően két út kínálkozik:

- Olyan mérőműszer alkalmazása amely a  $Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$  összefüggésnek közvetlenül megfelelő mérőegyenlettel rendelkezik. (Ilyen mérőművek az indukciós mérőművek)
- A  $P$  teljesítmény mérésére szolgáló wattmérők alkalmazása. A wattmérő a komplex teljesítmény reális összetevőjét méri.

**S** helyett tehát olyan transzformáltját kell képezni melynek reális összetevője: **Q**. Igazolható, hogy a kitűzött célnak megfelelő transzformálás a  $-j$  -vel való szorzás.

$$-j \cdot \underline{S} = -j \cdot [P + jQ] = Q - jP$$

és

$$\operatorname{Re}[-j \cdot \underline{S}] = Q$$

A wattmérők tehát helyesen mérik a  $Q$ -t ha

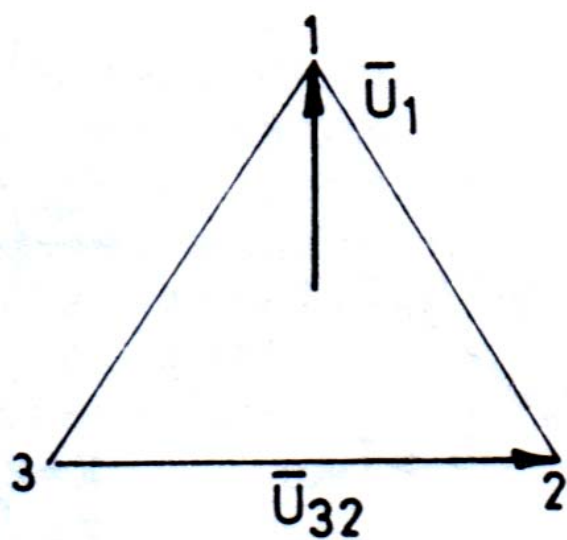
$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^*$$

helyett

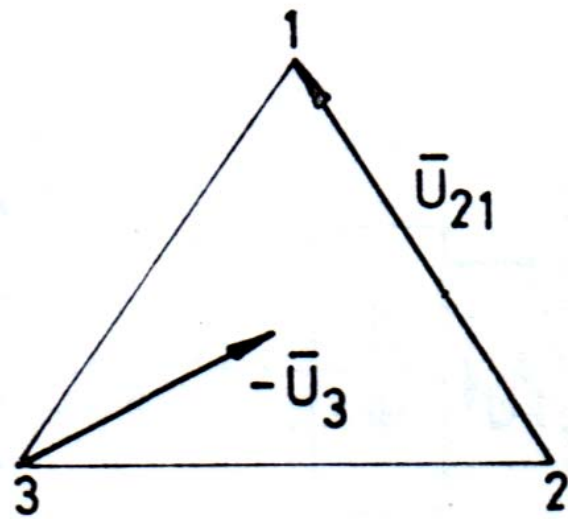
$$-j \cdot \underline{U} \cdot \underline{I}^*$$

mérésére kötjük be őket.

Ezt legegyszerűbben a feszültségtekercs táplálásánál lehet megoldani. Ez megoldható belső fázistolással vagy külső műkapcsolással



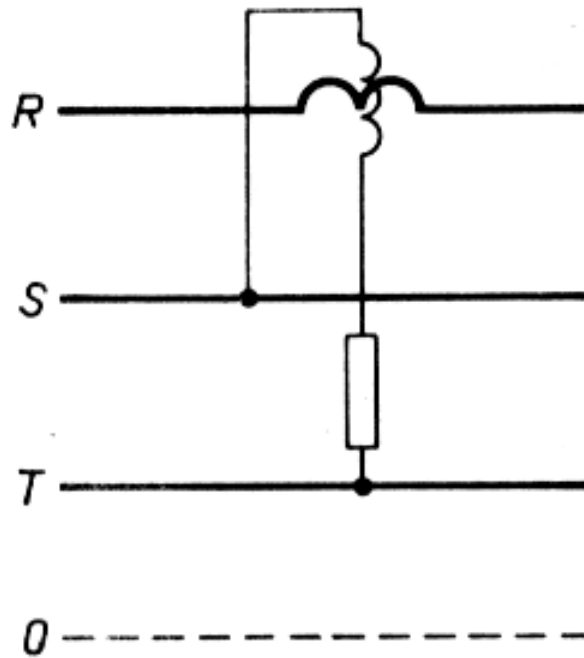
$$-j\bar{U}_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}\bar{U}_{32}$$



$$-j\bar{U}_{21} = \sqrt{3}(-\bar{U}_3)$$

3.6.28 ábra

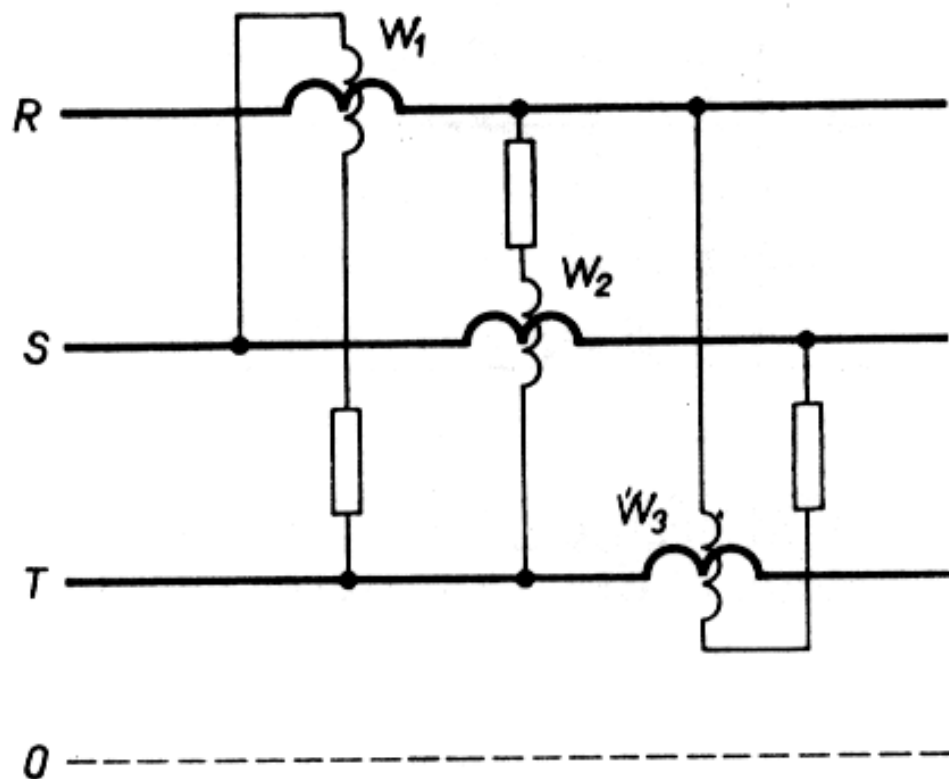
# Háromfázisú rendszer meddő teljesítményének mérése



$$Q = \frac{3 \cdot P}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot P$$

**Szimmetrikus háromfázisú fogyasztó  
meddő teljesítményének mérése egy  
wattmérővel**





$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (P_1 + P_2 + P_3)$$

**9.43 ábra: Háromfázisú fogyasztó meddő teljesítményének mérése három wattmérővel**

A háromfázisú rendszer meddő teljesítményének mérése elvégezhető műszerekkel melyek meddő teljesítményt mérnek (varméter), a hatásos teljesítmény mérés wattmérőireinek kapcsolása szerint kötve.

A meddő teljesítmény mérése szimmetrikus háromfázisú rendszer esetén elvégezhető wattmérők segítségével is, ha feszültség-tekercsüket olyan feszültségre kötjük, amely  $90^\circ$  fázistolásban van ahhoz a feszültséghez képest amelyet a hatásos teljesítmény mérésekor használnánk.

Ha a háromfázisú rendszer meddő teljesítményét a 9.43. ábra szerint mérjük, a meddő teljesítményt a következő képlet szerint határozzuk meg:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}}(P_1 + P_2 + P_3)$$

# Fogyasztásmérők

A fogyasztásmérők legtöbbször egy fordulatszámológót meghajtó kis elektromotorból állnak. A fordulatszámológóról leolvasható a megfigyelés idején elfogyasztott energia mennyisége. Hogy egy ilyen számláló a mért energiát mutassa

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt$$

szükséges, hogy a motor szögsebessége  $\omega$  arányos legyen a fogyasztó  $P$  teljesítményével:

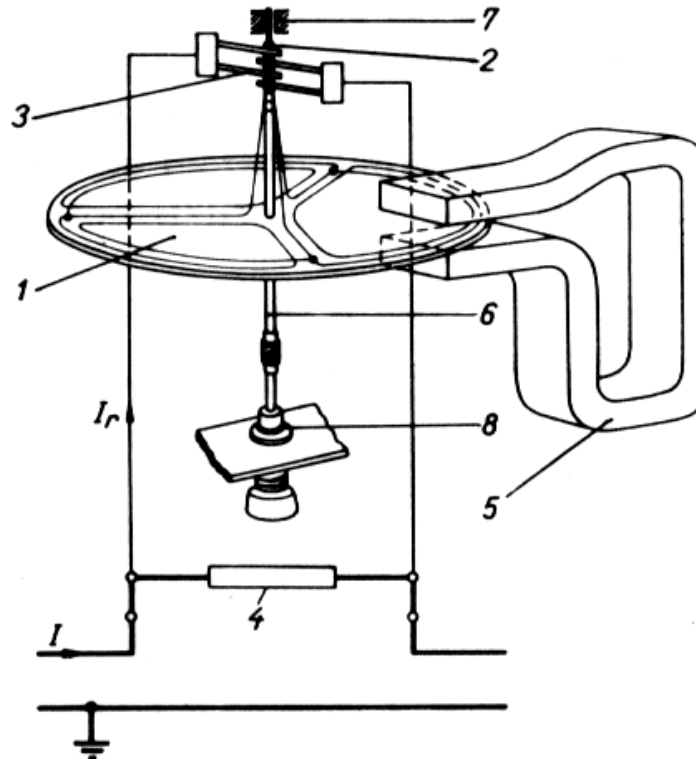
$$P = k\omega = k \frac{d\alpha}{dt}$$

Csak akkor lesz:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt = k \int_{t_1}^{t_2} \omega dt = k \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\alpha = k(\alpha_2 - \alpha_1) = 2\pi kN$$

ahol  $N = (\alpha_2 - \alpha_1)/2\pi$  a  $t_2 - t_1$  intervallumban megtett fordulatok számát jelöli.

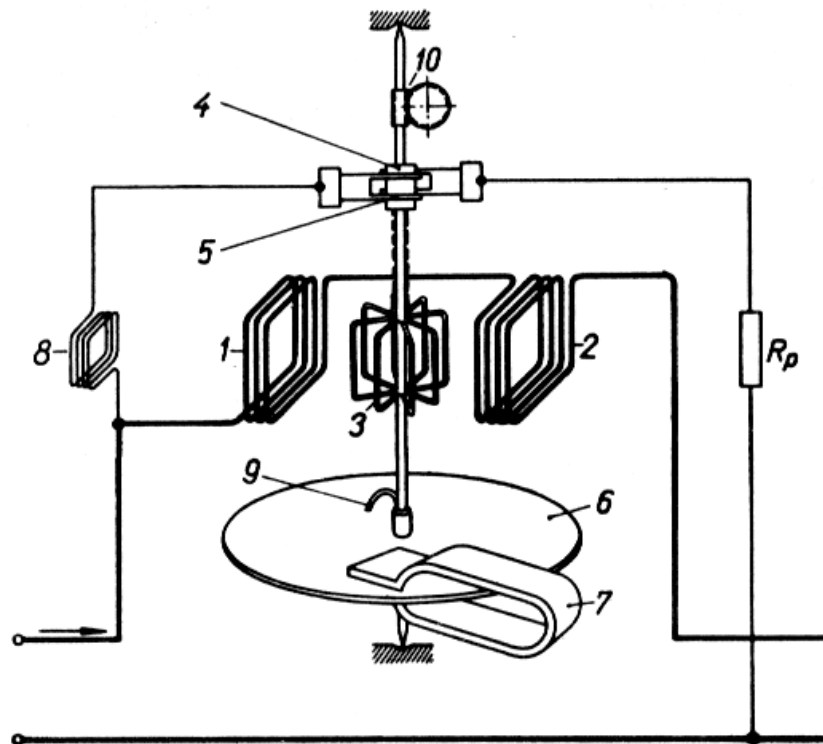
# Egyenáramú fogyasztásmérők



## Magnetomotoros számlálók

1 rotor s tri plosnata svitka; 2 kolektor; 3 čet-  
kice; 4 podesivi poredni otpornik  $R_s$ ; 5 perma-  
neñtni magnet; 6 vertikalna čelična osovína ro-  
tora; 7 gornji ležaj s rukavcem; 8 donji uporni  
ležaj

# Elektrodinamikus számlálók



$$M_1 = k_1 I I_r \quad (5.10)$$

Rotor je priključen na napon  $U$  potrošača preko velikog otpora  $R_p$ , pa je struja  $I_r \approx U/R_p$ . Iz toga slijedi:

$$M_1 = k_2 I U = k_2 P \quad (5.11)$$

Slika 5.3. Elektrodinamsko brojilo

1 i 2 strujni svici; 3 pravokutni svici rotora; 4 kolektor; 5 četkice; 6 aluminijska ploča; 7 permanentni magnet; 8 pomoćni svitak; 9 željezna zastavica; 10 pužni prenos

# Váltakozóáramú fogyasztásmérők

## Egyfázisú indukciós fogyasztásmérő

Az indukciós fogyasztásmérők két elektromágnesből állnak, amelyből az egyik vékony huzalból sok menettel a feszültségre van kapcsolva, a másikon néhány menetnyi vastag huzal a fogyasztó áramát vezeti át. Ezek az elektromágnesek melyeket a feszültség és az áram elektromágnesének nevezünk egymással szemben vannak elhelyezve, és közöttük egy forgó alumíniumtárcsa helyezkedik el. Ezt a tárcsát metszi az áram elektromágnes  $\Phi_I$  fluxusa mely arányos a fogyasztó áramával és feszültség elektromágnes  $\Phi_U$  fluxusa mely arányos a fogyasztó feszültségével.

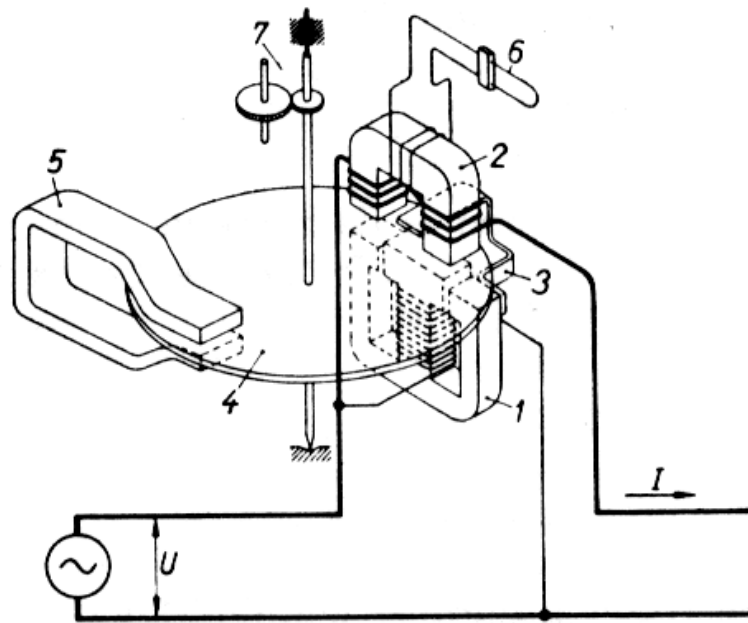


Ezek a fluxusok a tárcsában feszültséget indukálnak melyek 90 fokos fáziskésésben vannak a fluxusokhoz viszonyítva.

Ezek a feszültségek az alumíniumtárcsában  $I_U$  és  $I_I$  örvényáramokat hoznak létre, amelyek az örvényárampályák kis induktivitása miatt majdnem fázisban vannak ezekkel a feszültségekkel.

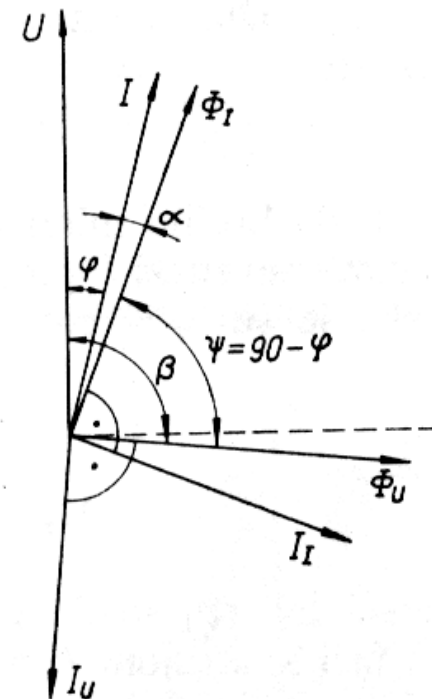
A  $\Phi_U$  fluxus az  $I_I$  örvényáramokkal  $M_1$  forgatónyomatékokot hoz létre, míg a  $\Phi_I$  fluxus az  $I_U$  örvényáramokkal  $M_2$  forgatónyomatékokot hoz létre.

A fékezőnyomatékokot egy állandó mágnes biztosítja melynek fluxusa szintén metszi a fogyasztásmérő alumíniumtárcsáját.

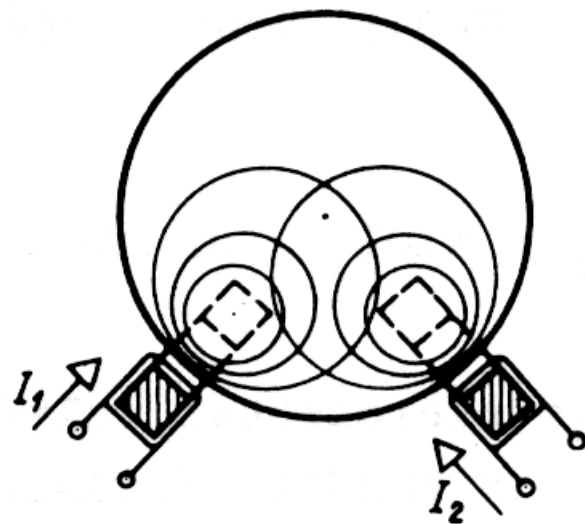
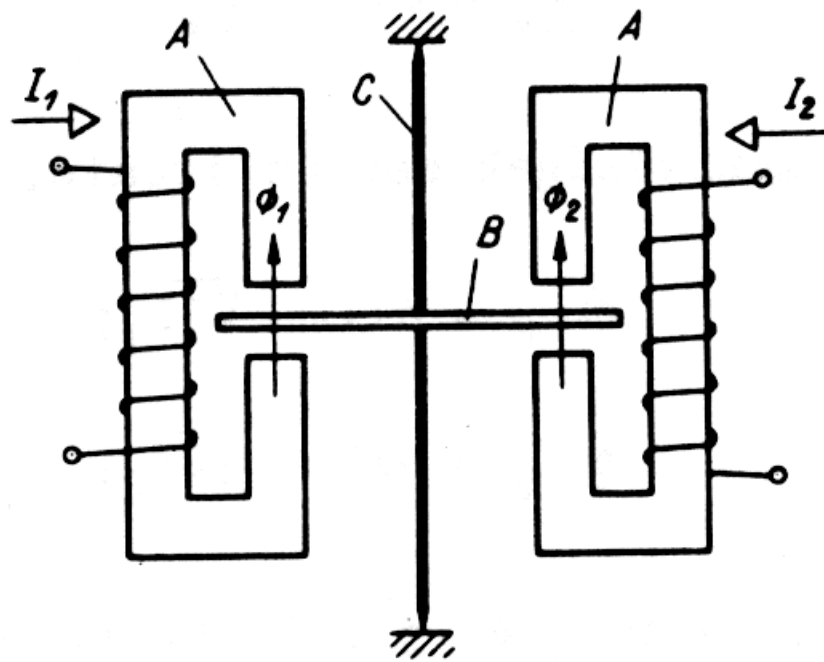


Slika 5.4. Indukciono brojilo

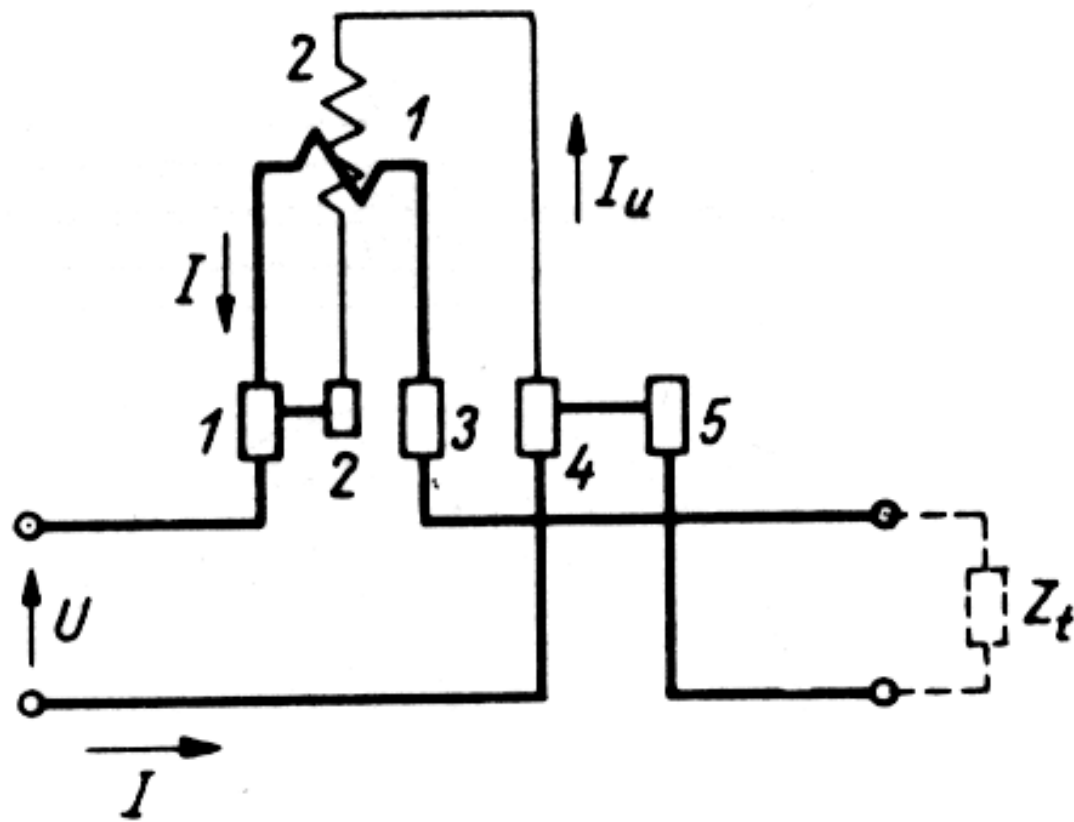
1 naponski elektromagnet; 2 strujni elektromagnet; 3 stremen za povrat magnetskog toka; 4 aluminijska ploča; 5 permanentni magnet; 6 petlja od otpornog materijala za ugađanje faznog pomaka; 7 zupčani prenos na brojač



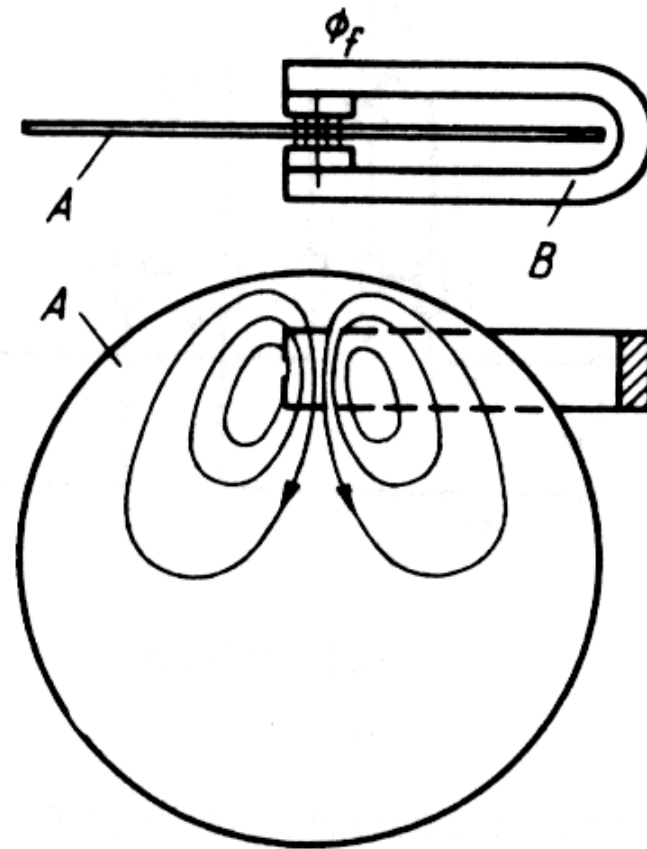
Slika 5.5. Vektorski dijagram indukcionog brojila djelatne snage



6.4 ábra



6.5 ábra



6.6 ábra

Az alumínium tárcsa forgása alkalmával az állandó mágnes hatására létrejövő örvényáramok láthatók a 6.6 ábrán.

# Impedanciamérés

Az impedanciamérés igen sok gyakorlati probléma megoldásához nyújt segítséget, elsősorba a gyártás, a minőségellenőrzés és a nemvillamos mennyiségek méréstechnikája területén.

A kábelek és villamos gépek szigetelésének rendszeres, üzem közben való ellenőrzése a katasztrofális hatású üzemzavarok megelőzésének hatékony eszköze.

Az ipari folyamatok méréstechnikája nem nélkülözheti a kapacitív, induktív és ohmos átalakítókat, melyek a távolság, a nyomás, a szögelfordulás, a szint mérésére szolgálnak. Különböző anyagok összetételének valamint nedvességtartalmának mérésére is alkalmasak a kapacitív mérési eljárások.

Nyúlásmérő bélyegek segítségével, erő, nyomaték, különböző szerkezeti anyagok nyúlása, lokális deformációja mérhető.

Az induktív és kapacitív érzékelők jól használhatók földben vagy épületek falazatában lévő fém tárgyak, vagy kábelek feltárásához.

Impedanciaméréssel meghatározható az ellenállás, a kapacitás, az induktivitás valamint a kölcsönös induktivitás is.

## **Ellenállás mérése**

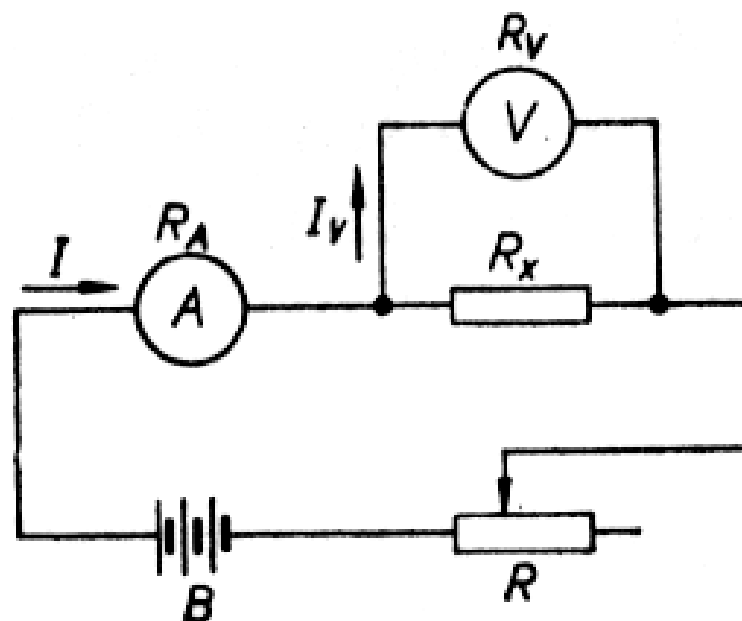
Az ellenállás mérését egyenáram segítségével több módon végezhetjük kezdve az ohmmétertől, az **U-I** módszeren keresztül a különböző összehasonlító és hidas módszerekig.

Az ohmméter működési elvét már átvettük az alapműszerek tanulmányozásakor.

# Ellenállásmérés U-I módszerrel

Ez a módszer Ohm törvényének alkalmazásán alapul. Ha egy ellenállást feszültségforrásra kötünk, azon  $I = U/R$  áram folyik. Az átfolyó áram és a feszültségesés mérésével meghatározható az ellenállás. Az amper- és voltméter két féleképpen köthető be. Mindkét módszer bizonyos hibát visz a mérésbe, így ezzel a módszerrel mindig rendszeres hibát követünk el.





Slika 9.56. Mjerenje djelatnog otpora mjerenjem napona i struje (naponski spoj)

Az első esetben az árammérő azon áramok összegét mutatja melyek az  $R_x$  ellenálláson és a voltmérőn folynak keresztül, bár csak az  $R_x$  ellenálláson folyó áram értékére van szükségünk. Innen következik, hogy az ellenállás pontos értéke ebben az esetben:

$$R = \frac{U}{I' - I_v}$$

A voltmérő az  $R_x$  ellenállás kapcsain lévő valódi feszültséget méri, míg az ampermérő nagyobb áramot mér mint ami az ellenálláson folyik és az egyenlő az ( $I$ ) az ellenálláson, és ( $I_v$ ) a voltméter tekercsén folyó áramok összegével

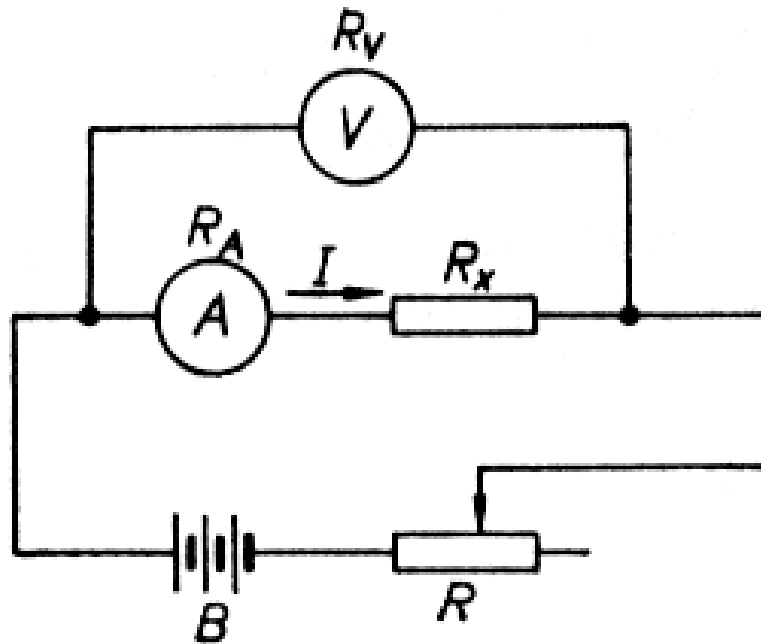
$$I' = I + I_v$$

Az ellenállás ezen mérések alapján kapott ( $R'$ ) számított értéke mindig kisebb lesz az ellenállás valódi értékénél:

$$R' = \frac{U}{I'} < R = \frac{U}{I} \quad \text{mivel} \quad I' > I$$

Az ilyen mérés alkalmával jelentkező abszolút hiba értékét a következő különbségből kapjuk meg:

$$\Delta R = R' - R = \frac{R_v R}{R_v + R} - R = \frac{R_v R - R_v R - R^2}{R_v + R} = -\frac{R^2}{R_v + R}$$



Slika 9.57. Mjerenje djelatnog otpora mjerenjem napona i struje (strujni spoj)

A másik esetben a voltmérő nem csak az  $R_x$  ellenálláson lévő feszültségesezt, hanem az  $R_x$  ellenálláson és az ampermérő belső ellenállásán lévő feszültséget méri. Így az ellenállás pontos értéke ebben az esetben:

$$R = \frac{U' - u_a}{I}$$

Ahol  $u_a$  a feszültségesezt az amperméteren.

Ha az ampermérő belső ellenállását  $R_a$  -val jelöljük,  $U'$  a voltméterrel mért feszültség,  $R_V$  a voltmérő belső ellenállása,  $U$  az  $R_x$  ellenállás kapcsain lévő feszültség, az abszolút hiba ebben az esetben:

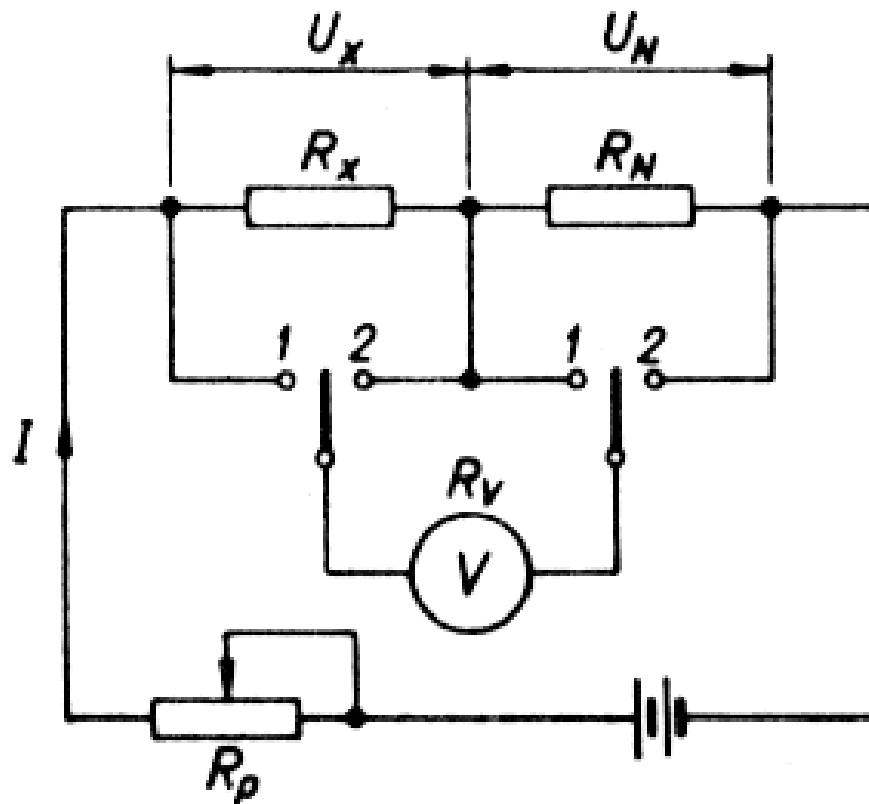
$$\Delta R = R' - R = \frac{U'}{I} - \frac{U}{I} = \frac{U' - U}{I} = \frac{R_a I}{I} = R_a$$

# A feszültség összehasonlítás módszere

Ezzel a módszerrel ismeretlen ellenállás mérhető ismert ellenállás és egy voltmérő segítségével. A voltmérő skálája lehet bejelölve fokokban is. A módszer lényege, hogy nagy belső ellenállású voltmérővel a feszültségesést egyszer az ismeretlen, majd az ismert ellenálláson mérjük. Ez a két ellenállás sorba van kötve a feszültségforrással.

Legyen az 1. kapcsolóállásban az ismeretlen ellenálláson lemért feszültségesés:

$$U_x = I \frac{R_x R_v}{R_x + R_v}$$



**A feszültség összehasonlítás módszere sorosan kötött ellenállások esetén**



ahol  $R_v$  a voltmérő belső ellenállása. A 2. kapcsolóállásban a voltmérő az ismert ellenállás feszültségességét méri:

$$U_N = I \frac{R_N R_v}{R_N + R_v}$$

A fenti egyenletekből, feltételezve hogy a mérés folyamán a kör árama nem változik a következő kifejezést kapjuk:

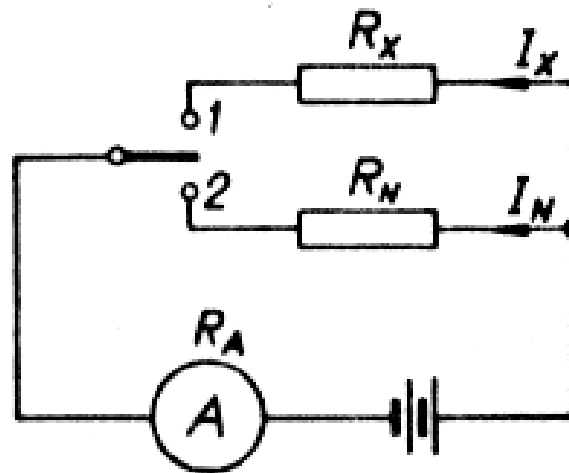
$$R_x = R_N \frac{U_x}{U_N} \cdot \frac{R_v}{R_v + R_N (1 - U_x / U_N)}$$

Ha az  $R_x$  és  $R_N$  ellenállások sokkal kisebbek a voltmérő  $R_v$  belső ellenállásánál,  $R_x$  meghatározható a következő egyszerű kifejezésből:

$$R_x = R_N \frac{U_x}{U_N}$$

Ezért ezt a kapcsolást általában kis ellenállások mérésénél használjuk.

Nagy ellenállások mérésére alkalmasabb a alábbi séma szerinti kötés



A feszültség összehasonlítás módszere párhuzamosan kötött ellenállások esetén

Itt a forrás állandó feszültsége mellett az ismeretlen és ismert ellenálláson keresztül folyó  $I_x$  és  $I_N$  áramokat mérjük :

$$I_x = \frac{U}{R_x + R_A}$$

$$I_N = \frac{U}{R_N + R_A}$$

vagyis:

$$R_x = (R_N + R_A) \frac{I_N}{I_x} - R_A$$

Nagy ellenállások mérésekor az ampermérő belső ellenállása  $R_A$  elhanyagolható, így egyszerűbb kifejezést kapunk:

$$R_x = R_N \frac{I_N}{I_x}$$

Az ampermérő pontatlanságának kiküszöbölésére ismert ellenállásként változtatható ellenállást veszünk, és addig változtatjuk míg a műszer kitérése megegyezik az ismeretlen ellenállás mérésekori kitéréssel.

Ekkor  $R_x = R_N$ . Ebben az eljárásban a műszer és a feszültség forrás belső ellenállása nincs kihatással a mérés eredményére.

# Ohmméter – a mutatókitérés módszere

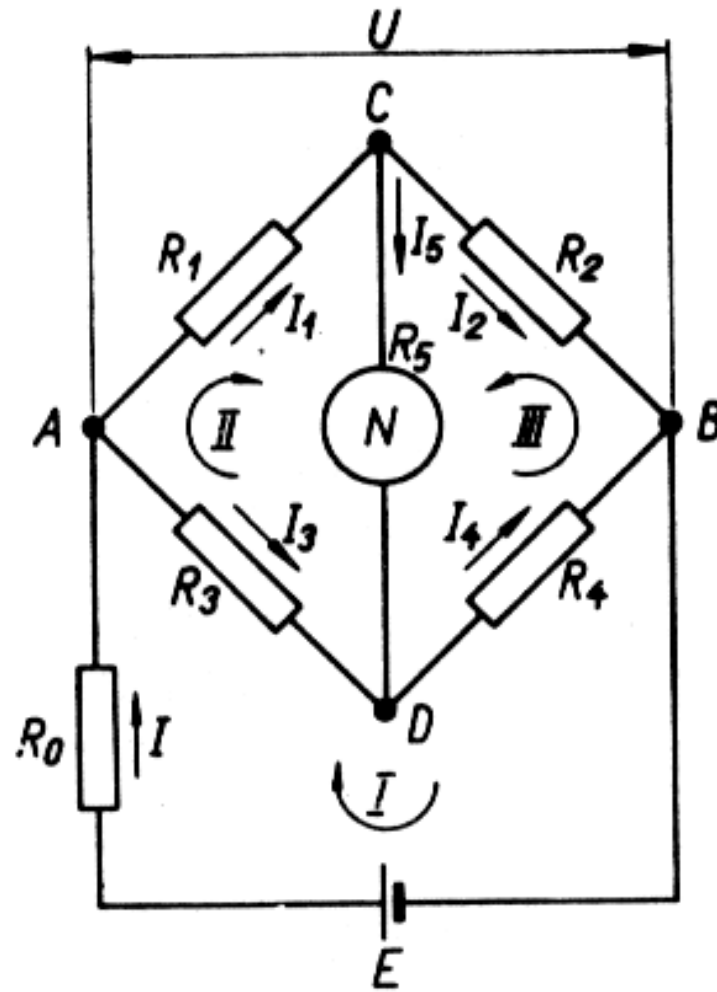
Ezt a módszert gyakran alkalmazzák. E célból ki van fejlesztve egy műszer amely elemet, potenciométert és voltmérőt tartalmaz. Az elem időbeni változásai miatt minden mérés előtt be kell állítani. Pontossága viszonylag alacsony.

# Wheatstone-híd

A Wheatstone-híd az impedancia, ellenállás mérését összehasonlító módszerrel végzi, így pontossága is nagy.

A Wheatstone-híd négy ágból áll, és az egyik ágában lévő ismeretlen ellenállás értékének mérésére szolgál, míg a maradék három ágot ismert ellenállások alkotják melyek közül legalább egy állítható.

Általában erre a célra dekadellenállásokat használunk. A híd egyik átlójában nullindikátor van, mely az átló áramát ellenőrzi, a másik átlóra pedig feszültségforrást kapcsolunk. A forrás ohmos ellenállásmérés esetén lehet galvánelem vagy akumulátor. Ha ohmos ellenállások helyett komplex impedanciákat veszünk reaktív ellenállások is mérhetőek. Ekkor a hidat váltakozóárammal kell betáplálni.



Slika 6.2. Cjelokupni spoj Wheatstoneova mosta



A Wheatstone-híd közép- és nagyértékű ellenállások üzemi és laboratóriumi mérésére használható. Az egyes ágakban folyó áramok az ágak impedanciájától függenek, és megfelelő kombinációkkal elérhető hogy a nullindikátoron ne folyon áram. Ekkor a nullindikátoron nem lép fel feszültségesés így az  $R_1$  és  $R_3$ , ellenállások feszültségesése megegyezik az  $R_2$  és  $R_4$  feszültségesésével:

$$I_1 R_1 = I_3 R_3 \qquad I_2 R_2 = I_4 R_4$$

$I_5 = 0$  miatt:  $I_1 = I_2$  és  $I_3 = I_4$ , így ezen egyenletek osztásával a következőt kapjuk:

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

Az ismeretlen ellenállás  $R_1$  meghatározható a következő kifejezéssel:

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

Látható hogy az ismeretlen ellenállás meghatározáshoz elég ismerni egyet ( $R_2$ ) a maradék három ellenállás közül és a megmaradt kettő arányát ( $R_3/ R_4$ ).

A híd egyensúlya nem változik, ha megcseréljük az áramforrás és a nullindikátor kapcsait. Ez könnyen belátható, mert az egyensúly feltétele átrendezhető a következő alakra:

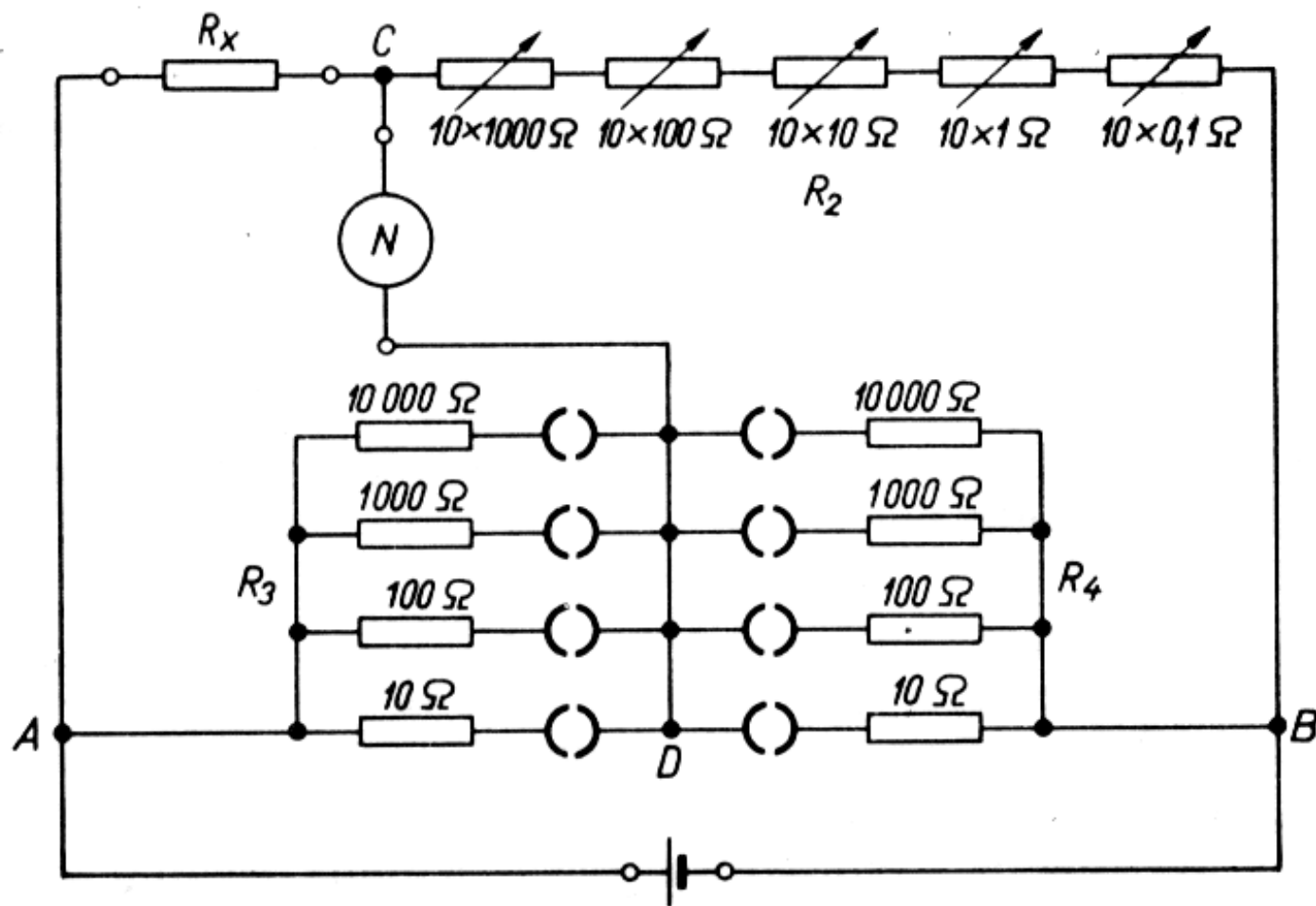
$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$$

A tápfeszültség változása nem hat ki a híd egyensúlyára, bár vigyázni kell nehogy túlterheljük a híd ellenállásait ami azok értékének megváltozásához vezethet.

# A Wheatstone-híd kivitelezése

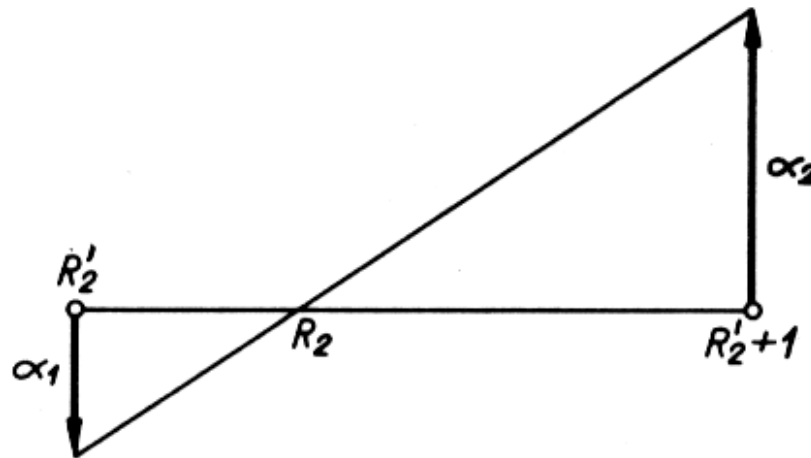
Két nagy csoportot különböztetünk meg a dekádellenállásos és a csúszóhuzalos kivitel.

A dekádellenállásos kivitel második ágában általában dekád ellenállás doboz van például:  $10 \times 0,1$ ,  $10 \times 1$ ,  $10 \times 10$ ,  $10 \times 100$ , és  $10 \times 1000 \Omega$  úgy hogy az  $R_2$  ellenállás  $0,1 \Omega$ -os ugrásokkal  $0,1$  től  $11111 \Omega$ -ig változtatható. Az  $R_3/R_4$  arányt az egyszerűség kedvéért  $1/100$ ,  $1/10$ ,  $1$ ,  $10$ ,  $100$  értékre választjuk.



Slika 6.3. Wheatstoneov most s dekadskim otpornicima

Mivel a második ág ellenállása csak  $1 \Omega$  vagy  $0,1 \Omega$ -os ugrásokkal változtatható, nem érhető el mindig az érzékeny nullindikátor nulla kitérése. Például a nullindikátor kitérése  $R_2'$  esetén  $\alpha_1$  lesz egyik irányba de a következő lehetséges értéknél  $R_2' + 1$  már  $\alpha_2$  a másik irányba. Az az  $R_2$  érték amelynél nulla kitérést érhetnénk el általában jól közelíthető lineáris interpolációval:



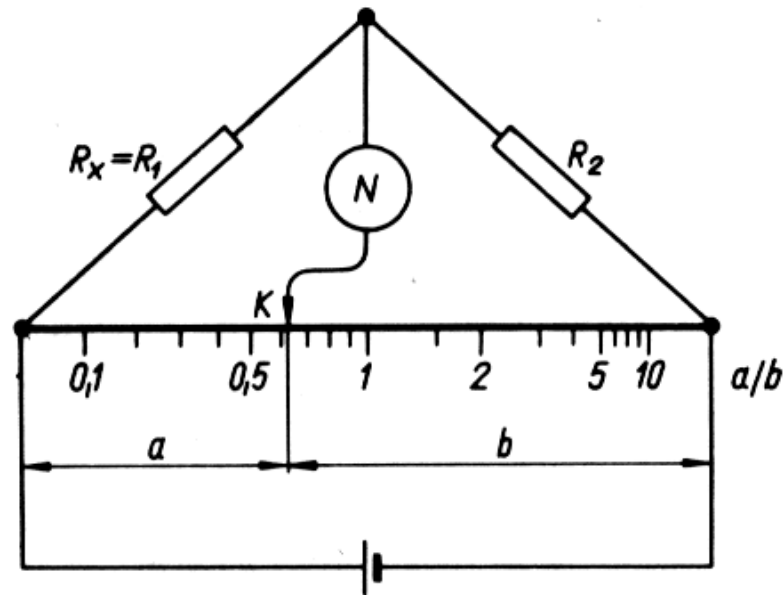
Slika 6.4. Određivanje mjerne vrijednosti interpolacijom odklona nulindikatora

$$R_2 = R_2' + \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

vagy, ha a második ág legkisebb lehetséges ellenállásváltozása  $0,1 \Omega$ :

$$R_2 = R_2' + 0,1 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

Gyakran használjuk a csúszóhuzalos Wheatstone-hidat, mely szerkezetileg egyszerűbb a dekadellenállásosnál mégis kielégítő pontosságot nyújt. Itt az  $R_3/R_4$  arányt állítjuk az  $a$  és  $b$  távolságok változtatásával a pontosan kalibrált csúszóhuzal  $K$  csúszóját mozgatva, míg az  $R_2$  ellenállás megfelelő, állandó értékű.



Slika 6.5. Wheatstoneov most s kliznom žicom



egyensúlyi állapotban:

$$R_1 = R_2 \frac{a}{b}$$

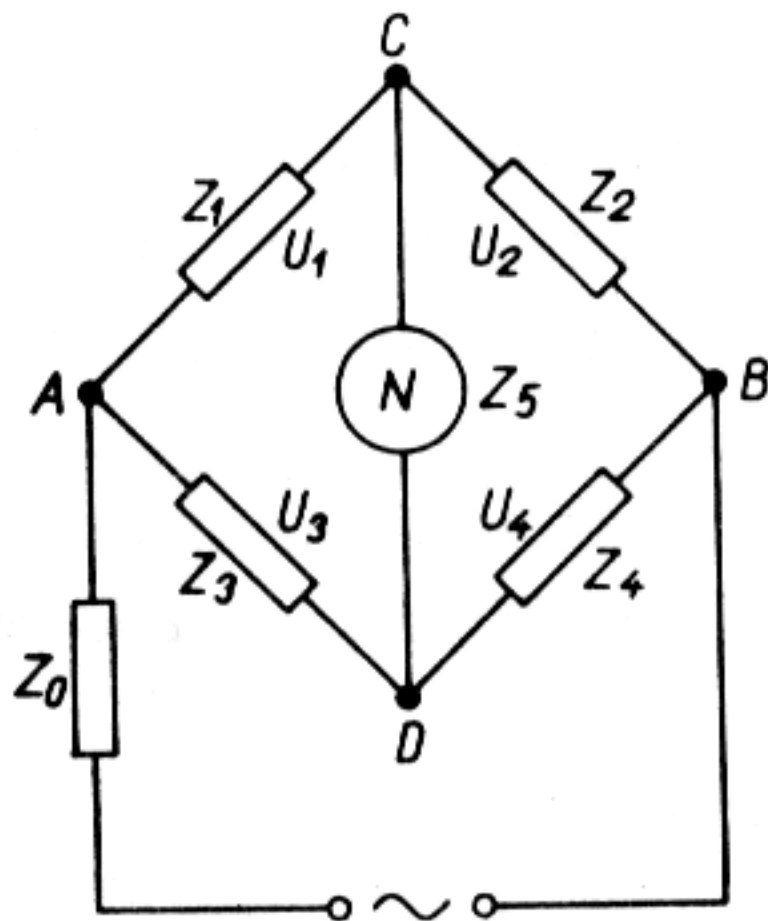
az  $a$  távolságot nem szükséges külön leolvasni mivel meghatározható a csúszóhuzal  $l$  hosszából és a leolvasott  $b$  távolságból, így a mért ellenállás meghatározható a következő kifejezésből:

$$R_1 = R_2 \frac{l - b}{b}$$

# Váltakozó áramú Wheatstone-híd

## Az egyensúly feltételei

A váltakozó áramú mérőhidak lehetővé teszik impedanciák összehasonlítását, ha az egyes ágakba megfelelő elemeket választunk mérhetünk: ohmos ellenállást, öninduktivitást, kölcsönös induktivitást, kapacitást, frekvenciát stb. A váltakozóáramú Wheatstone-híd alapkapcsolása négy impedanciából áll:



Slika 6.17. Osnovni spoj  
Wheatstoneova mosta za  
izmjenične struje

A híd egyik átlójára váltakozó áramú forrást (generátort) kapcsolunk, a másik átlóra pedig megfelelő nullindikátort. Ha a híd ágaiban  $Z_1, Z_2, Z_3$  és  $Z_4$ , impedanciák vannak az egyensúly feltétele hasonló mint az egyenáramú Wheatstone-hídnál:

$$\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_4 = \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_3$$

Az impedanciákat felírhatjuk  $Z = R + jX$ , alakban is ekkor:

$$(R_1 + jX_1)(R_4 + jX_4) = (R_2 + jX_2)(R_3 + jX_3)$$