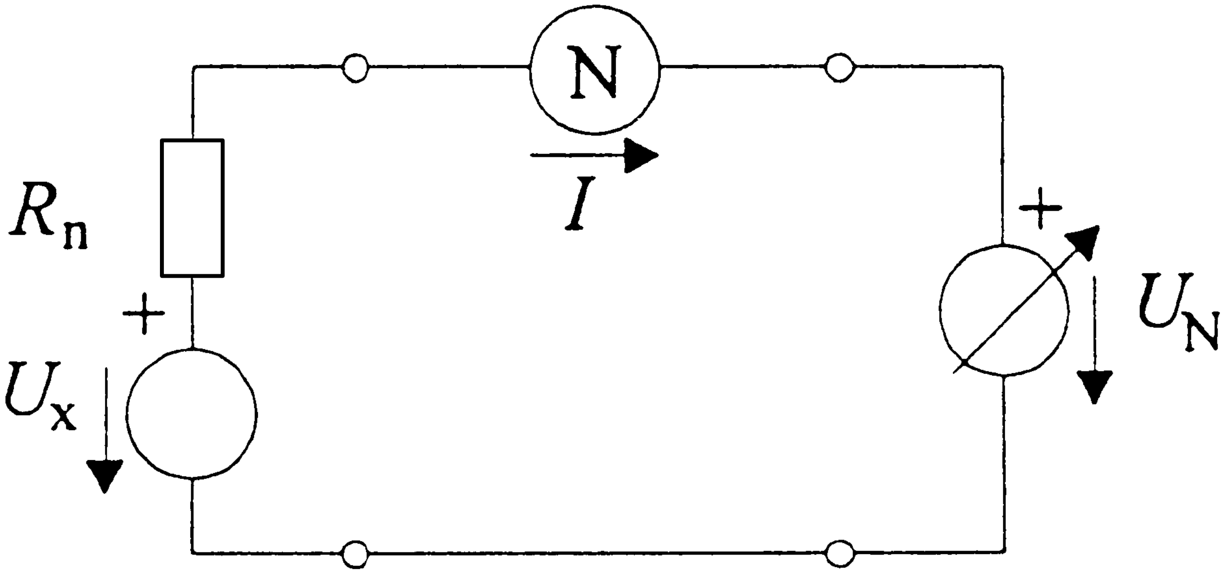
6.4 Enosmerni kompenzator

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

- **kompenziramo** neznano napetost.



Slika 6.20 Kompenzacijski princip merjenja napetosti

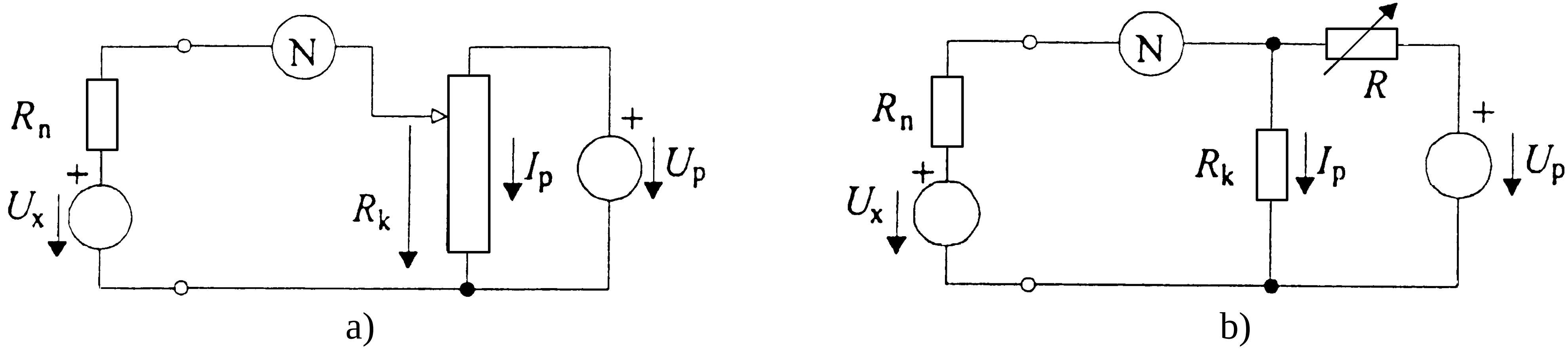
Pri izravnavi čez ničelni indikator ne teče noben tok $I \to 0$,

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

Spremenljivo napetost $U_{\mathrm{N}} = U_{\mathrm{k}}$ realiziramo kot padec napetosti, ki ga povzroči **električni tok** I_{p} na **znanem uporu** R_{k}.

$$U_{\mathrm{x}} - U_{\mathrm{k}} = 0\,,\ U_{\mathrm{k}} = I_{\mathrm{p}} R_{\mathrm{k}} \quad \Rightarrow \quad U_{\mathrm{x}} = I_{\mathrm{p}} R_{\mathrm{k}}$$

Ločimo dva principipa realizacije napetosti U_{k}:



Slika 6.21 Poggendorffov in Lindeck-Rothejev princip kompenzacije

Poggendorffov princip kompenzacije (a),

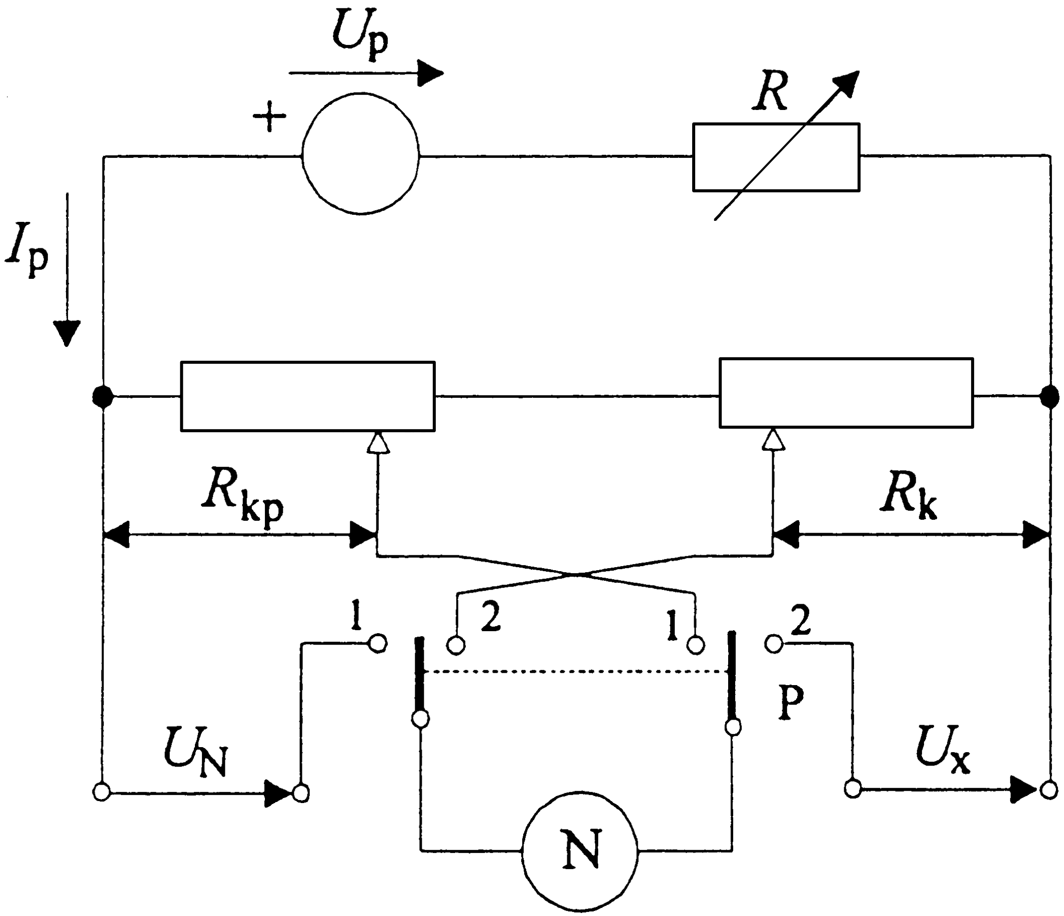
- **tok je stalen** in upornost spremenljiva.

Lindeck-Rothejev princip kompenzacije (b),

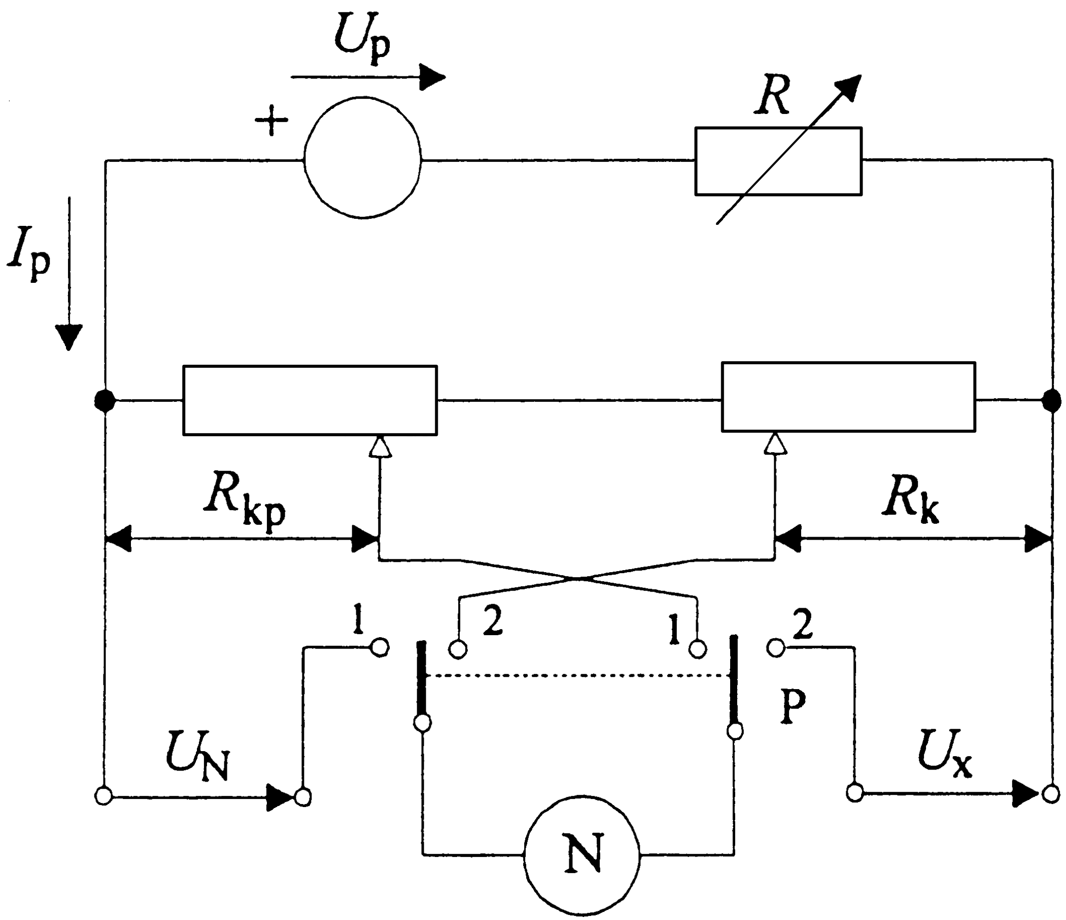
- **upor je stalen** in tok spremenljiv.

V preciznih napravah izkoriščamo Poggendorffov princip, kjer **pomožni tok nastavimo posredno** preko padca na znanem uporu.

- Postopek se poenostavi, če ima kompenzator še **pomožni kompenzacijski upor**.



Slika 6.23 Kompemzator s pomožnim kompenzacijskim uporom



V položaju **1 nastavimo** pomožni tok I_p,

- z R_{kp} in U_N :
  - ničelni indikator $I = 0$

$$\Rightarrow \quad I_p R_{kp} = U_N$$

V položaju **2 izmerimo** (**kompenziramo**) napetost,

- ničelni indikator $I = 0$

$$\Rightarrow \quad I_p R_k = U_x$$

Rezultat meritve: $I_p =$ konst. $\Rightarrow \quad U_x = U_N \dfrac{R_k}{R_{kp}}$

Če želimo v rezultatu okrogle vrednosti - **naravnavanje kompenzatorja**, mora imeti tok I_p **okroglo vrednost**.

- primer: $I_p = 100\,\mu\text{A}$, $R_k = 3456{,}7\,\Omega$

$$U_x = \frac{U_N}{R_{kp}} R_k = I_p R_k = 100\,\mu\text{A} \cdot 3456{,}7\,\Omega = 345{,}67\,\text{mV}$$

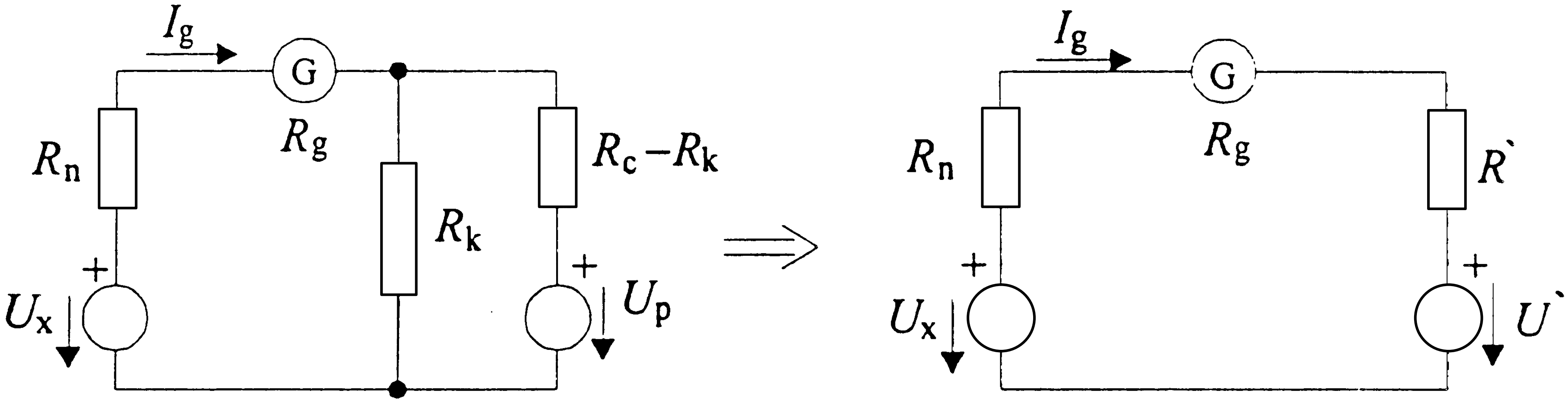
Tok nastavimo **z referenčno napetostjo** (npr.: Westonov mednarodni normalni člen: $U_N = 1{,}01845\,\text{V}$)

- pomožni upor R_{kp} je **nastavljiv**.

$$R_{kp} = \frac{U_N}{I_{pn}} = \frac{1{,}01845\,\text{V}}{100\,\mu\text{A}} = 10184{,}5\,\Omega$$

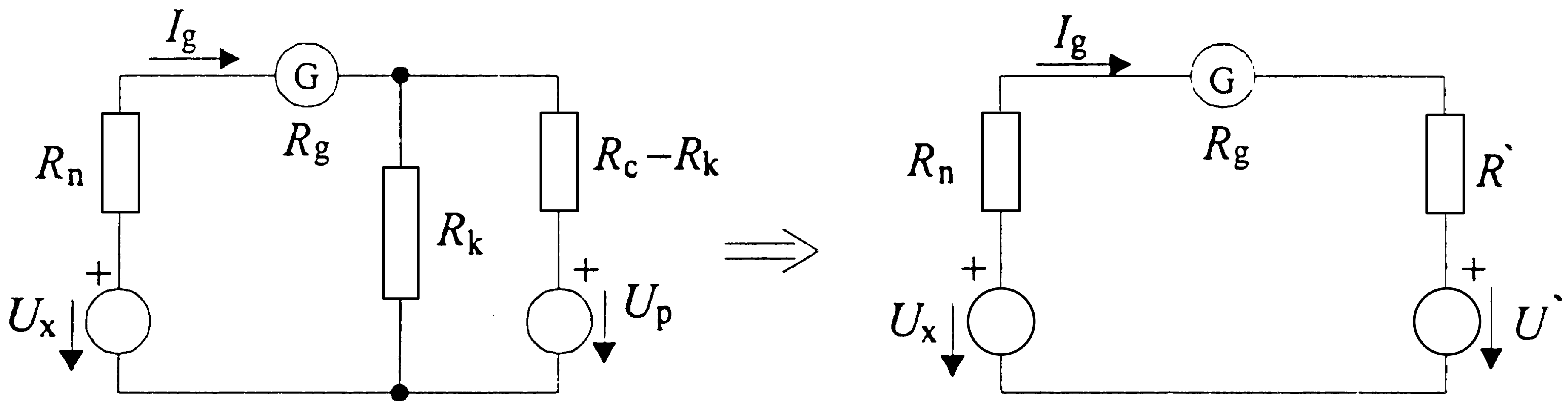
Ločljivost kompenzatorja

Poiskati moramo **povezavo** med izhodno veličino (**tok ničelnega indikatorja** I_g) in vhodno veličino (**sprememba napetosti** $\Delta U_x / U_x$).



Slika 6.24 Nadomestno vezje kompenzatorja

- nadomestni veličini: $U' = U_p \dfrac{R_k}{R_c}, \quad R' = \dfrac{R_k (R_c - R_k)}{R_c}$
  - R_g - **upornost galvanometra** kot ničelnega indikatorja,
  - R_c - **celotna upornost** v krogu pomožnega toka.



Ker je: $U_x - U' - I_g\left(R_n + R_g + R'\right) = 0,$ je **tok**:

$$I_g = \frac{U_x - U'}{R_n + R_g + R'} \quad \text{oz.} \quad I_g = \frac{U_x - U_p\, R_k / R_c}{R_n + R_g + R_k\left(1 - R_k / R_c\right)}$$

Odvod je:

$$\frac{\mathrm{d}I_g}{\mathrm{d}U_x} = \frac{1}{R_n + R_g + R_k\left(1 - R_k / R_c\right)}$$

in **občutljivost**:

$$S = \frac{\Delta I_g}{\Delta U_x / U_x} = \frac{U_x}{R_n + R_g + R_k\left(1 - R_k / R_c\right)}$$

Ločljivost

Kolikšna je relativna sprememba napetosti $\Delta U_{\mathrm{x}} / U_{\mathrm{x}}$, ki spremeni tok za ΔI_{g} in obratno?

$$\frac{\Delta U_{\mathrm{x}}}{U_{\mathrm{x}}} = \frac{\Delta I_{\mathrm{g}}}{U_{\mathrm{x}}} \left[R_{\mathrm{n}} + R_{\mathrm{g}} + R_{\mathrm{k}} \left(1 - R_{\mathrm{k}} / R_{\mathrm{c}} \right) \right]$$

Če vstavimo za ΔI_{g} ločljivost ničelnega indikatorja $\left(\Delta I_{\mathrm{g}} \right)_{\mathrm{q}}$, dobimo relativno **ločljivost kompenzatorja**:

$$\delta_{\mathrm{q}} = \frac{\left(\Delta U_{\mathrm{x}} \right)_{\mathrm{q}}}{U_{\mathrm{x}}} = \frac{\left(\Delta I_{\mathrm{g}} \right)_{\mathrm{q}}}{U_{\mathrm{x}}} \left[R_{\mathrm{n}} + R_{\mathrm{g}} + R_{\mathrm{k}} \left(1 - R_{\mathrm{k}} / R_{\mathrm{c}} \right) \right]$$

Standardna negotovost zaradi **ločljivosti** kompenzatorja je:

$$w\left(U_{\mathrm{x}} \right)_{\mathrm{q}} = \frac{u\left(U_{\mathrm{x}} \right)_{\mathrm{q}}}{U_{\mathrm{x}}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{\left(\Delta U_{\mathrm{x}} \right)_{\mathrm{q}}}{U_{\mathrm{x}}}$$

- v praksi bi naj bila zanemarljiva proti ostalim prispevkom.

6.5 Izmenični kompenzator

Ločimo dve izvedbi merjenja sinusne napetosti:

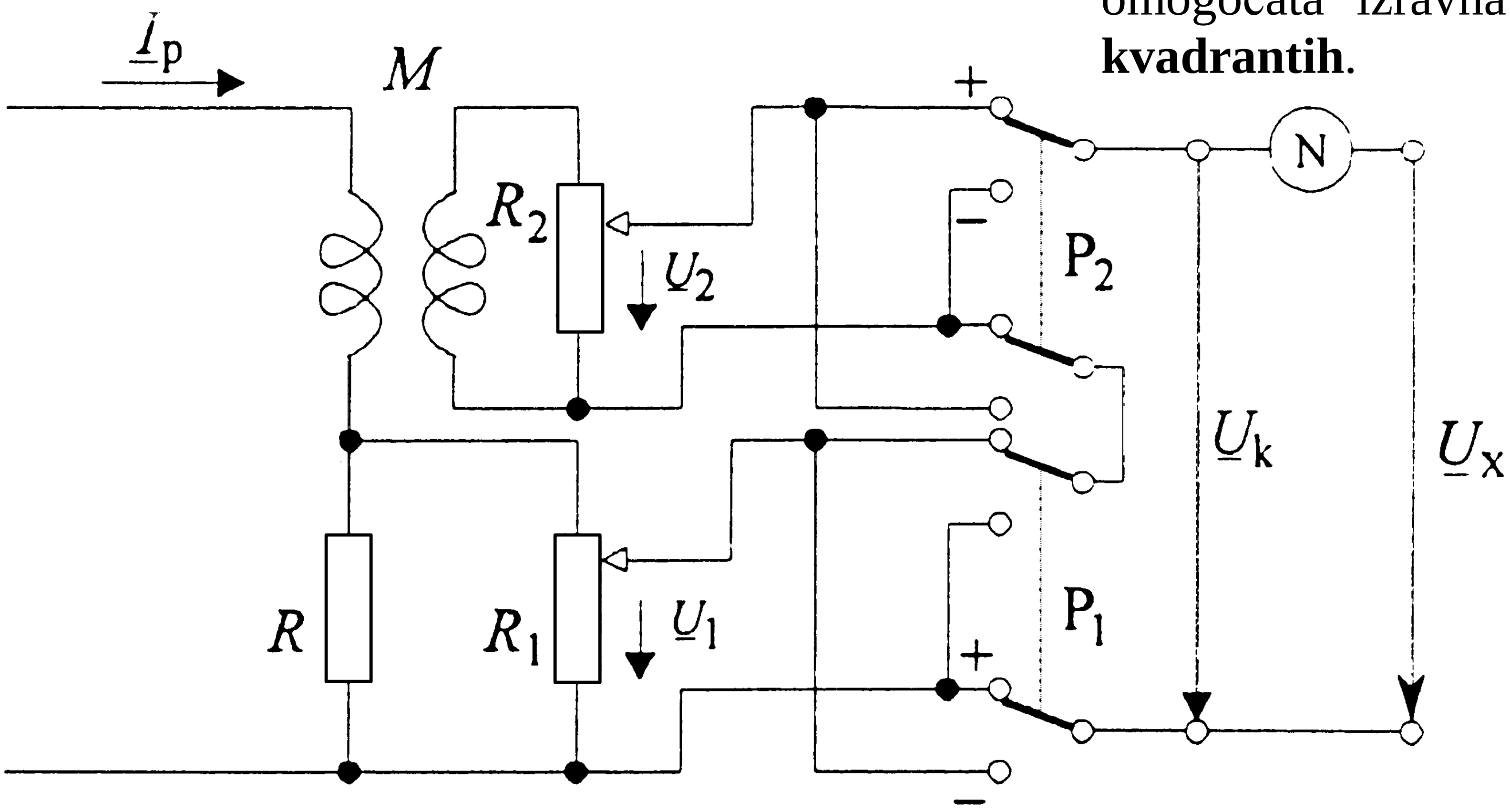
- z eno **merimo amplitudo** in **fazni kot** (**kompleksni kompenzator**),
    - enaka frekvenca,
- z drugo pa **efektivno vrednost**,
    - primerjamo z enosmerno napetostjo.

Kompleksni kompenzator

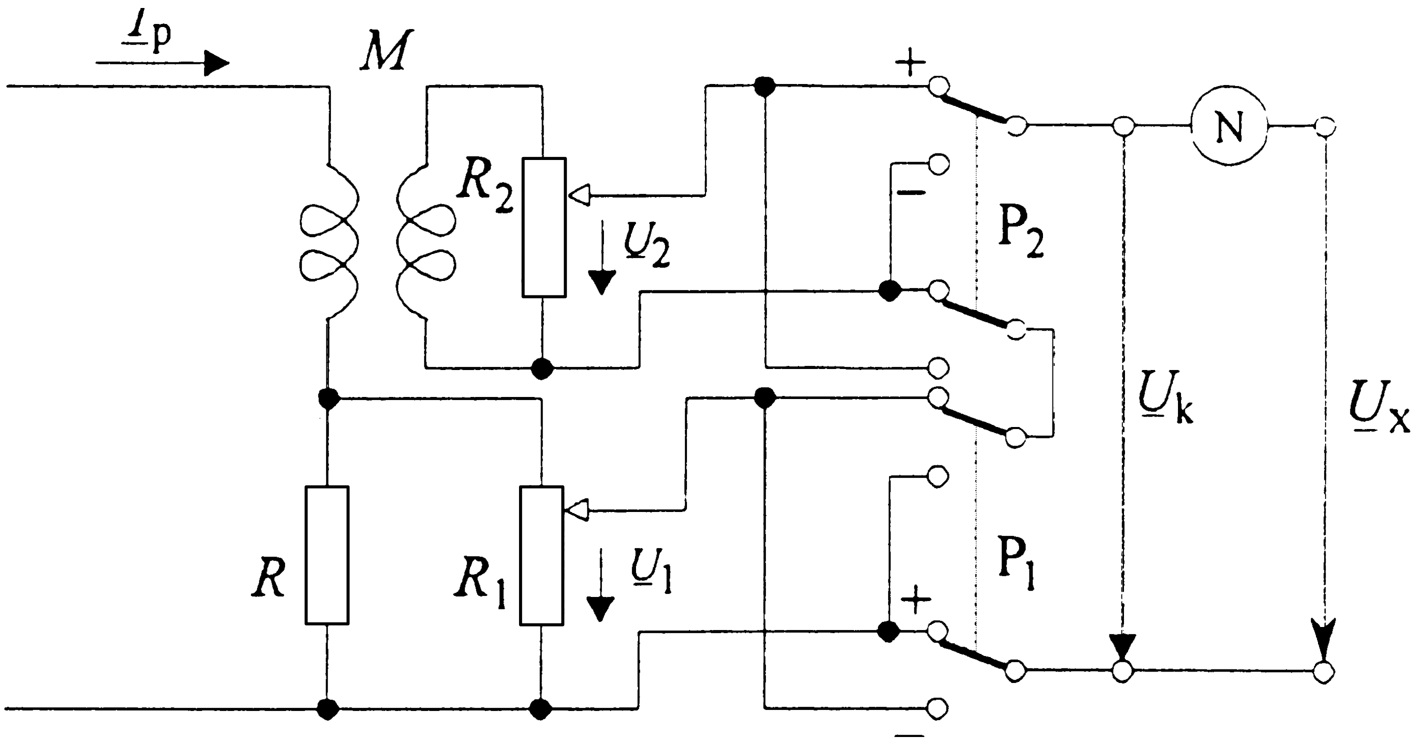
Kompenzacijska napetost je sestavljena iz napetosti dveh napetosti $\underline{U}_1$ in $\underline{U}_2$,

- ki sta **zamaknjeni za** 90°,

Preklopnika P_1 in P_2 za polariteto omogočata izravnavo v vseh **štirih kvadrantih**.



Slika 6.25 Kompleksni kompenzator



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

$$\underline{U}_1 = k_1 R_1 \underline{I}_p \frac{R}{R+R_1}$$

- $k_1 R_1$ del upora za kompenzacijo

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

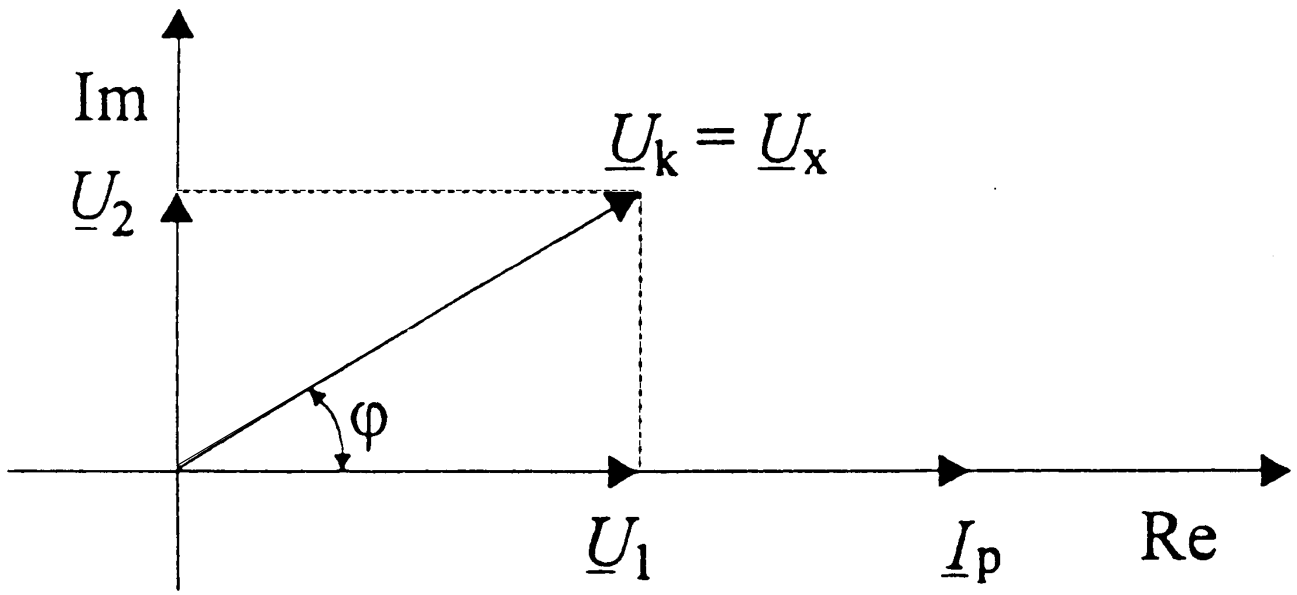
$$\underline{I}_p = \hat{i}_p e^{j\omega t} \Rightarrow \underline{U}_i = M \frac{d\underline{I}_p}{dt} = j\omega M \underline{I}_p$$

$$\underline{U}_2 = k_2 j\omega M \underline{I}_p$$

Izravnava:

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

Kazalčni (fazorski) diagram ob izravnavi



Slika 6.26 Fazorski diagram ob izravnavi

- amplituda: $U_x = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$,
- fazni kot: $\varphi = \operatorname{arc\,tg} \dfrac{U_2}{U_1}$.

- frekvenčna analiza za eno komponento!

Merilna negotovost je odvisna od negotovosti elementov vezja (R, M, R_1, R_2 in $\underline{I}_\mathrm{p}$).

Z uporabo preciznih uporov znižamo merilno negotovost na $\approx 10^{-4}$ pri frekvencah do nekaj 10 Hz.

Kadar nas zanima le **razmerje** $\underline{U}_\mathrm{x}$ in $\underline{I}_\mathrm{p}$ (npr. **merjenje impedance**):

$$\underline{Z}_\mathrm{x} = \frac{\underline{U}_\mathrm{x}}{\underline{I}_\mathrm{p}} = \frac{\underline{U}_1 + \underline{U}_2}{\underline{I}_\mathrm{p}}$$

- $\underline{U}_1 = k_1 R_1 \underline{I}_\mathrm{p} \dfrac{R}{R + R_1}$
- $\underline{U}_2 = k_2 \mathrm{j}\omega M \underline{I}_\mathrm{p}$

dobimo: $$\underline{Z}_\mathrm{x} = k_1 R_1 \frac{R}{R + R_1} + \mathrm{j} k_2 \omega M$$

Kompleksni kompenzator je uporaben pri **merjenju lastnosti merilnih transformatorjev**:

- zanima nas razmerje $\dfrac{\underline{U}_\mathrm{p}}{\underline{U}_\mathrm{s}}$
- oz. razmerje $\dfrac{\underline{I}_\mathrm{p}}{\underline{I}_\mathrm{s}}$