



# METROLOGIA

**Dr inż. Eligiusz PAWŁOWSKI**  
**Politechnika Lubelska**  
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
*Prezentacja do wykładu dla EINS*

**Zjazd 9, wykład nr 16**

# Prawo autorskie

Niniejsze materiały podlegają ochronie zgodnie z **Ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych** (Dz.U. 1994 nr 24 poz. 83 z późniejszymi zmianami).

Materiał ten udostępniam **do celów dydaktycznych** jako materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu Metrologia prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Mogą z nich również korzystać inne osoby zainteresowane metrologią. Do tego celu materiały te można **bez ograniczeń przeglądać, drukować i kopiować wyłącznie w całości**.

Wykorzystywanie tych materiałów bez zgody autora w inny sposób i do innych celów niż te, do których zostały udostępnione, **jest zabronione**.

W szczególności **niedopuszczalne jest**: usuwanie nazwiska autora, edytowanie treści, kopiowanie fragmentów i wykorzystywanie w całości lub w części do własnych publikacji.

Eligiusz Pawłowski

## Uwagi dydaktyczne

Niniejsza prezentacja stanowi **tylko i wyłącznie materiały pomocnicze** do wykładu z przedmiotu Metrologia prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Udostępnienie studentom tej prezentacji nie zwalnia ich z konieczności sporządzania **własnych notatek z wykładów** ani też nie zastępuje **samodzielnego studiowania** obowiązujących podręczników.

Tym samym zawartość niniejszej prezentacji w szczególności **nie może być** traktowana jako zakres materiału obowiązujący na egzaminie.

Na egzaminie obowiązujący jest **zakres materiału faktycznie wyłożony podczas wykładu** oraz zawarty w odpowiadających mu fragmentach **podręczników** podanych w wykazie literatury do wykładu.

Eligiusz Pawłowski

# Tematyka wykładu

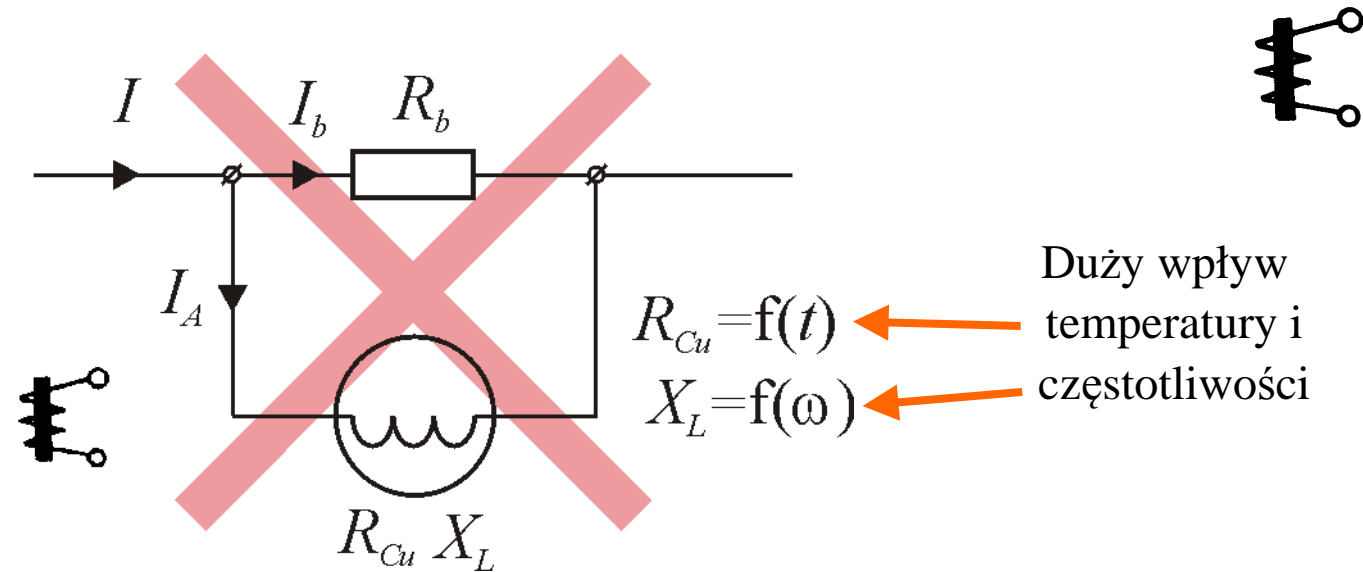
**Przekładnik prądowy**

**Przekładnik napięciowy**

**Ustrój elektrodynamiczny i ferrodynamiczny**

**Watomierz i pomiary mocy**

## Rozszerzanie zakresu amperomierza elektromagnetycznego



Przypomnienie z poprzedniego wykładu.

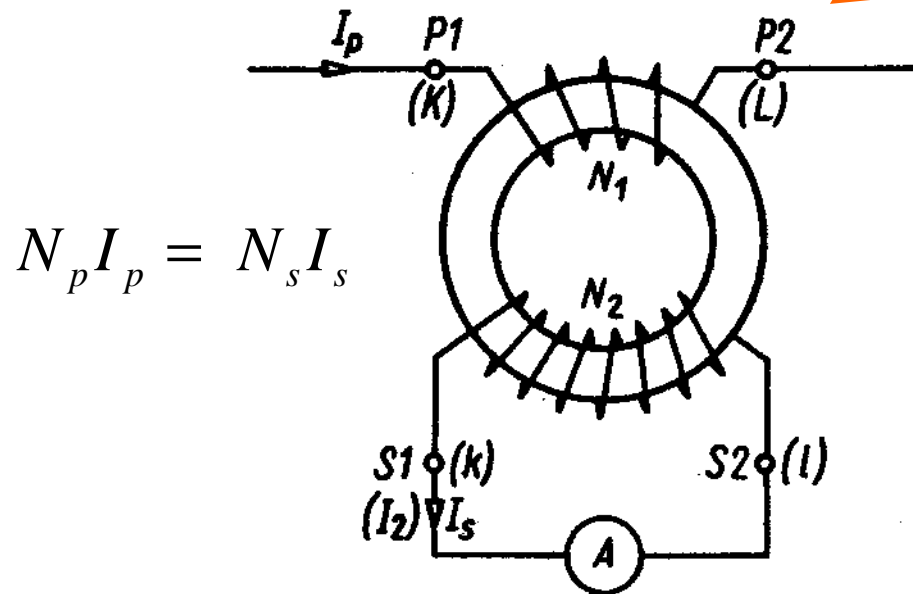
Do zwiększania zakresów amperomierzy elektromagnetycznych

**nie stosuje się boczników !**

Do tego celu stosuje się specjalne transformatory:

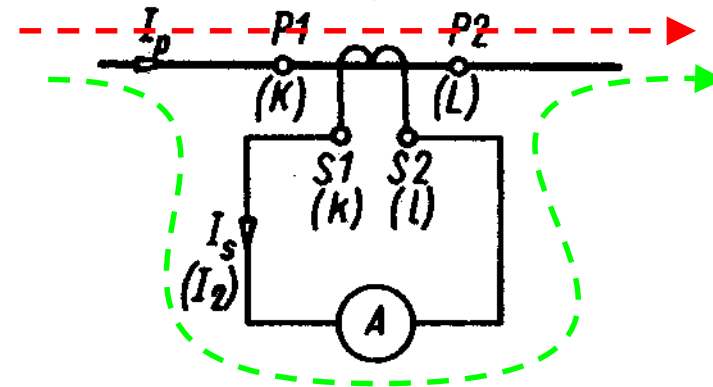
**przekładniki prądowe**

## Przekładnik prądowy, budowa i oznaczenia



$$N_p I_p = N_s I_s$$

K L, k l – stare oznakowania,  
P1 P2, S1 S2 – nowe oznakowania



Prawidłowo połączony  
przekładnik zachowuje  
taki sam kierunek prądu  
w amperomierzu, jak w  
obwodzie pierwotnym:  
na rysunku od P1 do P2  
oraz od S1 do S2

## Przekładnik prądowy, uwagi ogólne

1. Przekładnik prądowy konstrukcyjnie jest bardzo podobny do zwykłego transformatora energetycznego, ale pracuje w innym punkcie charakterystyki magnesowania rdzenia i różni się zasadniczo właściwościami.
2. Podczas normalnej pracy przekładnik prądowy jest obciążony bardzo małą impedancją, a nawet może być zwarty.
3. Przekładnik prądowy stosuje się w dwóch celach:
  - **rozszerzenie zakresu** pomiaru prądu przemiennego,
  - uzyskanie **izolacji galwanicznej** podczas pomiarów w układach wysokonapięciowych.

## Przekładnik prądowy, przekładnia

Dla idealnego  
przekładnika

$$N_p I_p = N_s I_s, I_o \approx 0$$

Do pracy przekładnika  
niezbędne jest wytworzenie  
pola magnetycznego w jego  
rdzeniu, czyli musi wystąpić  
prąd magnesujący  $I_0$

$$I_p = \frac{N_s}{N_p} I_s = K_z I_s$$

Przekładnia zwojowa

$$K_z = \frac{N_s}{N_p}$$

Nie uwzględnia  $I_0$

Przekładnia prądowa

$$K_I = \frac{I_p}{I_s}$$

Nie jest stała

Przekładnia znamionowa

$$K_{IN} = \frac{I_{pN}}{I_{sN}}$$

Nie jest dokładna

Błąd prądowy

$$\delta_I = \frac{K_{IN} I_s - I_p}{I_p} = \frac{K_{IN} - K_I}{K_I}$$



## Przekładnik prądowy, błędy

### Błąd prądowy

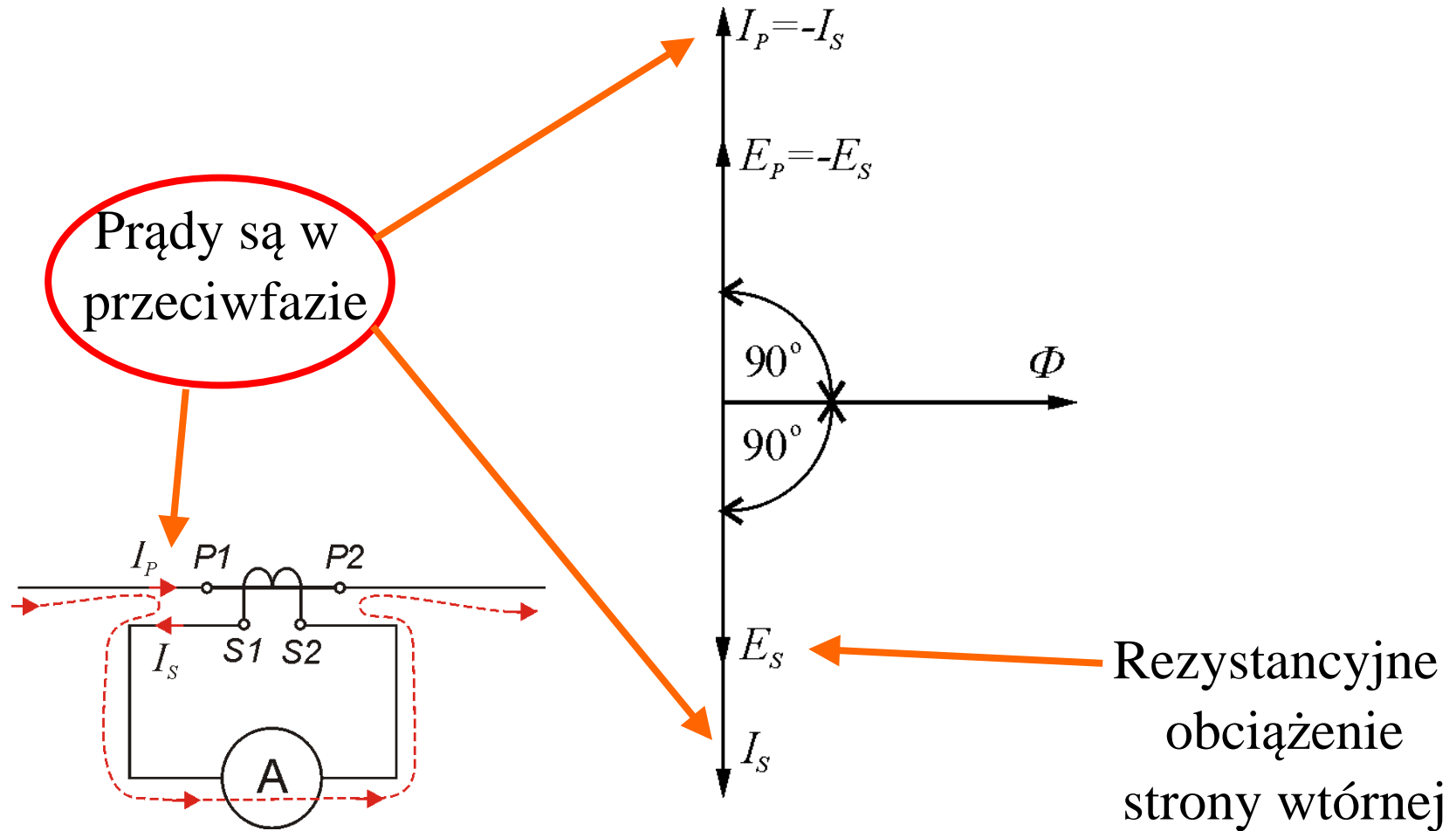
$$\delta_I = \frac{\Delta I}{I_P} = \frac{K_{IN} I_S - I_P}{I_P} = \frac{K_{IN} - K_I}{K_I}$$

Źródłem błędu prądowego jest prąd jałowy  $I_0$  przekładnika .

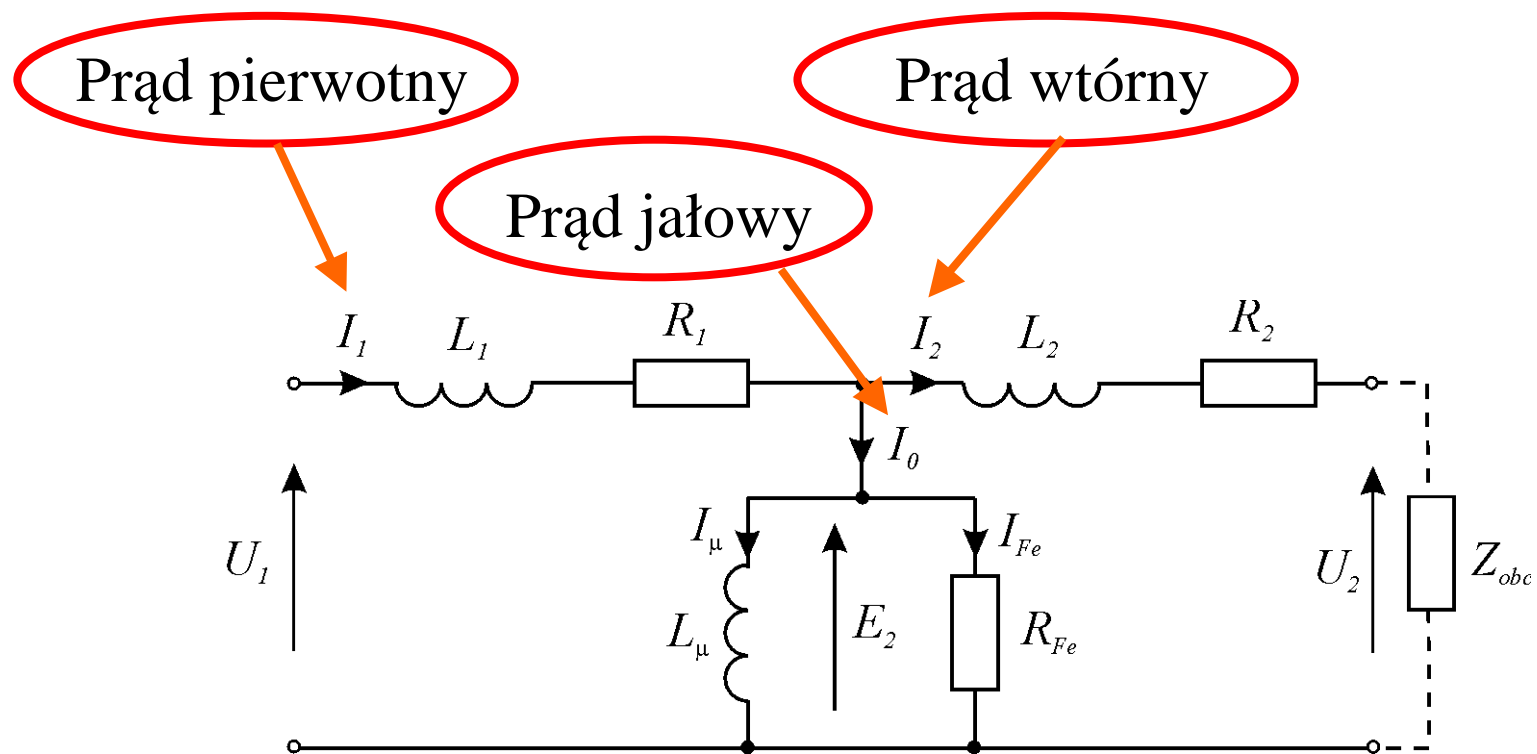
### Błąd kątowy

Błąd kątowy przekładnika prądowego jest to przesunięcie fazowe  $\gamma$  pomiędzy wektorem prądu pierwotnego  $I_P$  i odwróconym wektorem prądu wtórnego  $I_S$ .

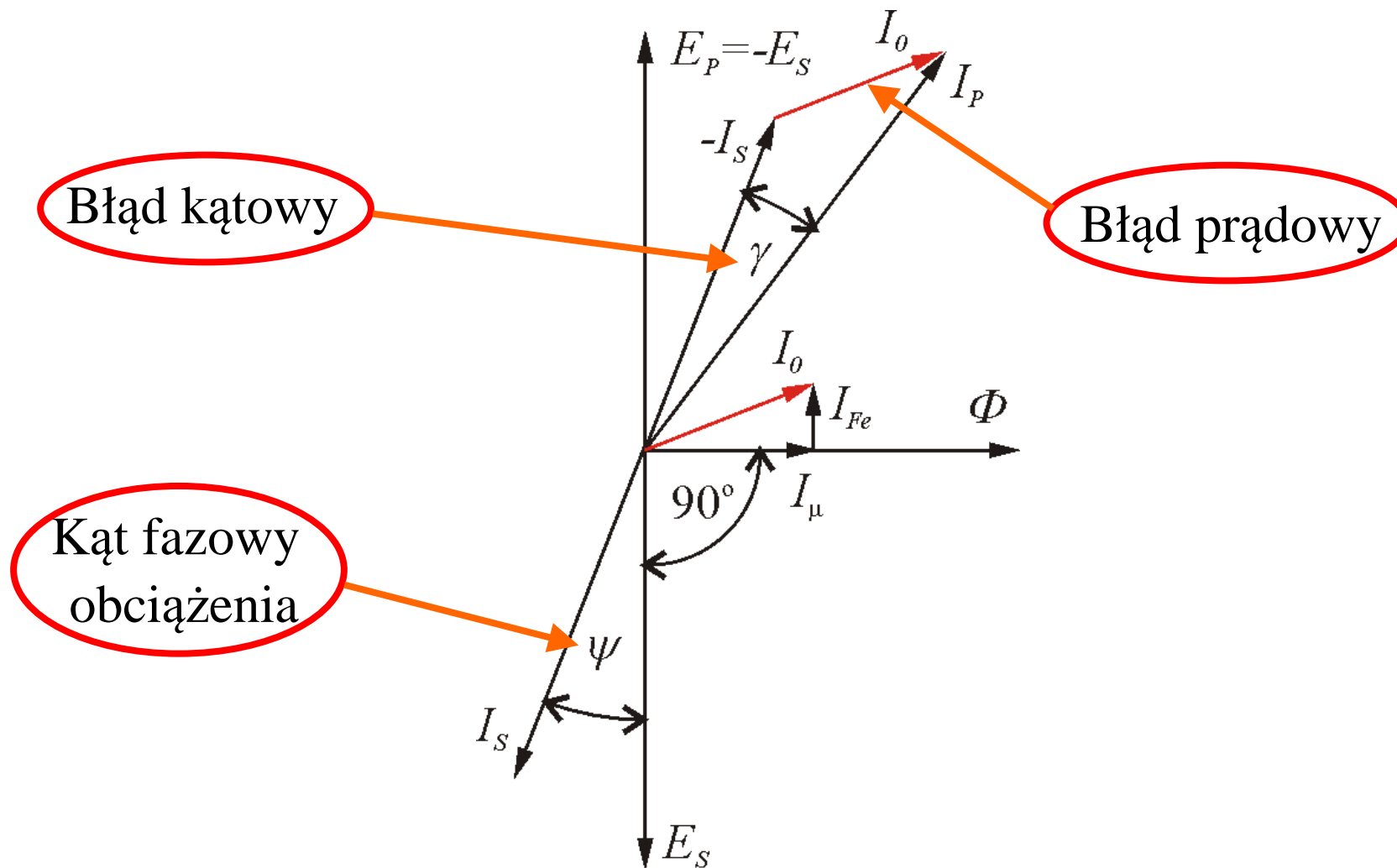
# Przekładnik prądowy idealny, wykres wskazowy



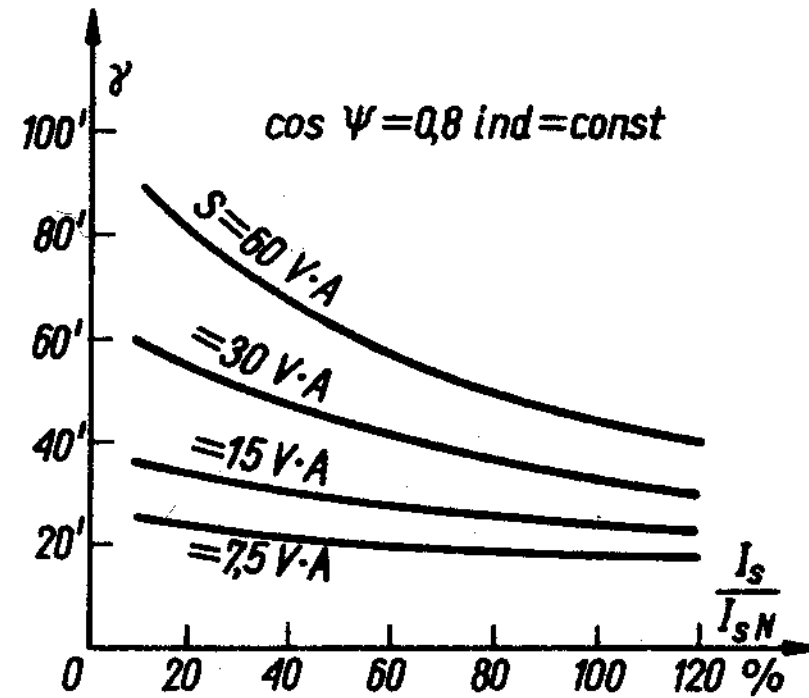
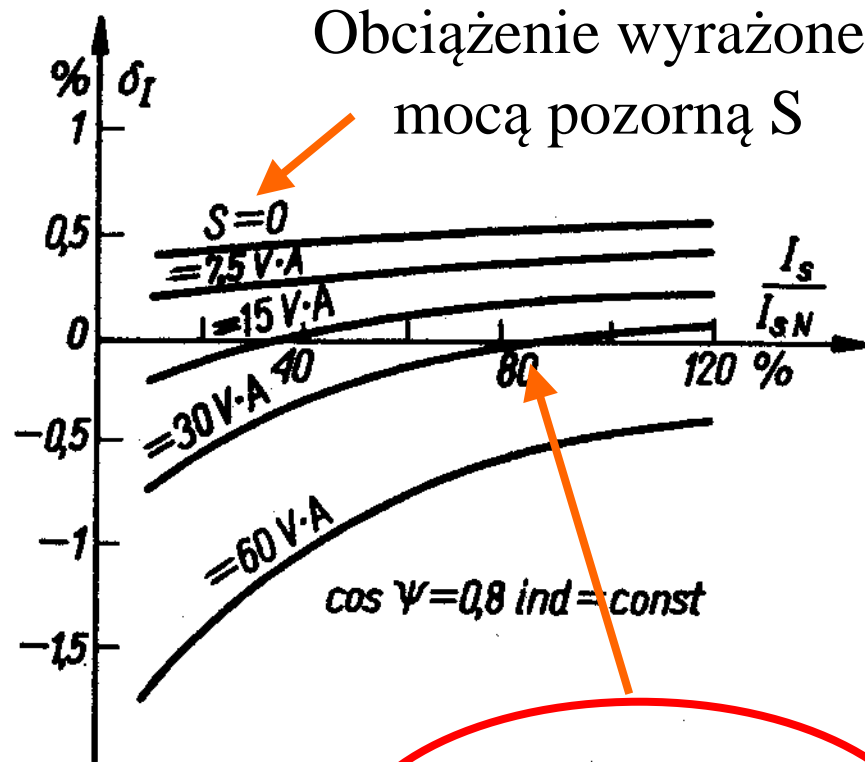
# Przekładnik prądowy rzeczywisty, schemat zastępczy



# Przekładnik prądowy rzeczywisty, wykres wskazowy

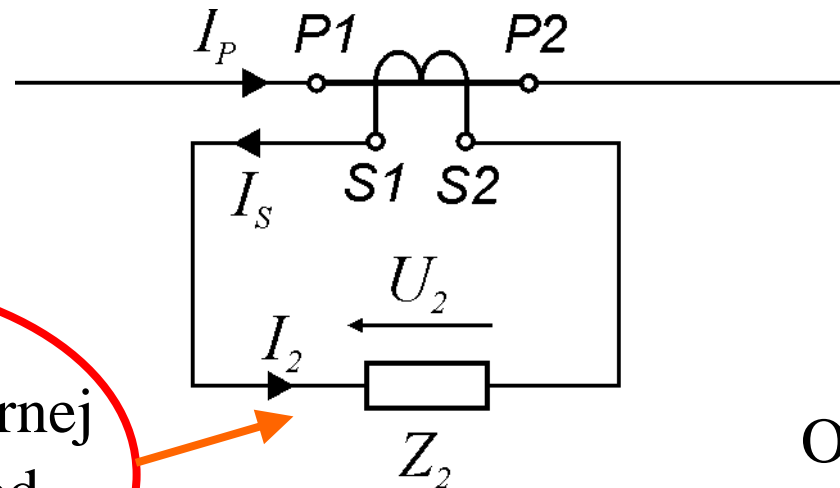


# Przekładnik prądowy, błędy



Najmniejsze błędy dla znamionowego obciążenia

## Przekładnik prądowy, obciążenie strony wtórnej $S_2$



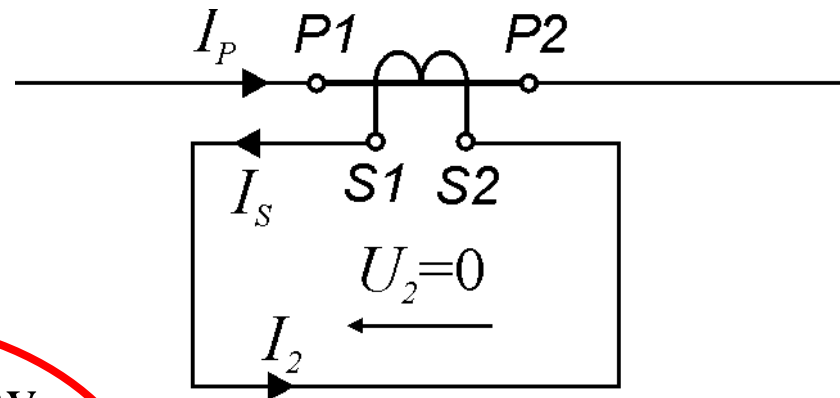
Prąd strony wtórnej  $I_2$  nie zależy od obciążenia  $Z_2$

Obciążenie  $Z_2$  wpływa na spadek napięcia  $U_2$  i moc pozorną  $S_2$

$$U_2 = Z_2 I_2$$

$$S_2 = U_2 I_2 \text{ [VA]}$$

# Przekładnik prądowy, zwarcie: $Z_2=0$



Zwarcie strony wtórnej wprowadza przekładnik w stan **jałowy** ( $S_2=0$ )

$$Z_2=0$$

$$S_2 = U_2 I_2 = 0 \cdot I_2 = 0$$

Przekładnik prądowy, zwarcie:  $S_2=0$

**Zwarcie** strony wtórnej przekładnika prądowego powoduje że:

- spadek napięcia po stronie wtórnej wynosi zero:  $U_2=0$ ,
- moc pozorna strony wtórnej spada do zera:  $S_2=0$ ,
- przekładnik znajduje się w **stanie jałowym**.

Dla przekładnika prądowego należy rozróżnić sformułowanie:

**zwarcie strony wtórnej**

od

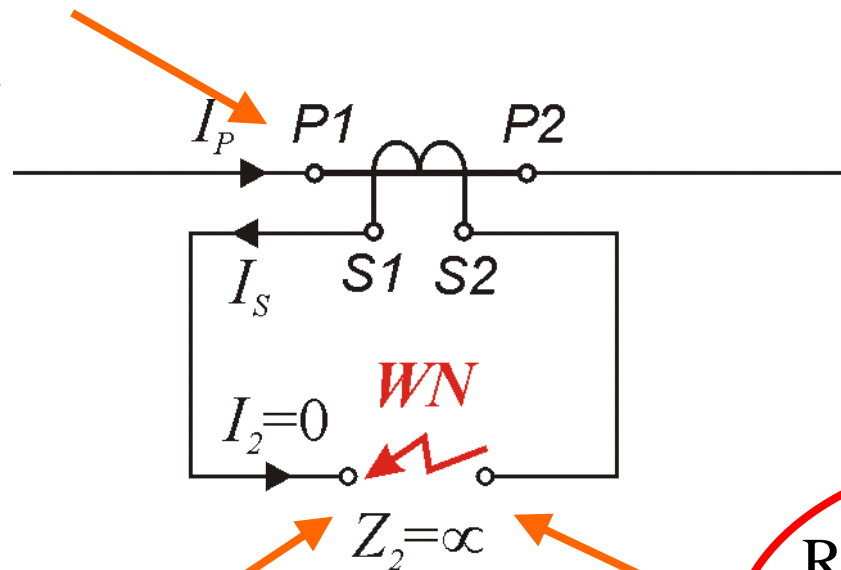
**stanu zwarcia.**

To nie jest to samo, tu jest inaczej niż w zwykłym transformatorze !!!



# Przekładnik prądowy, rozwarcie

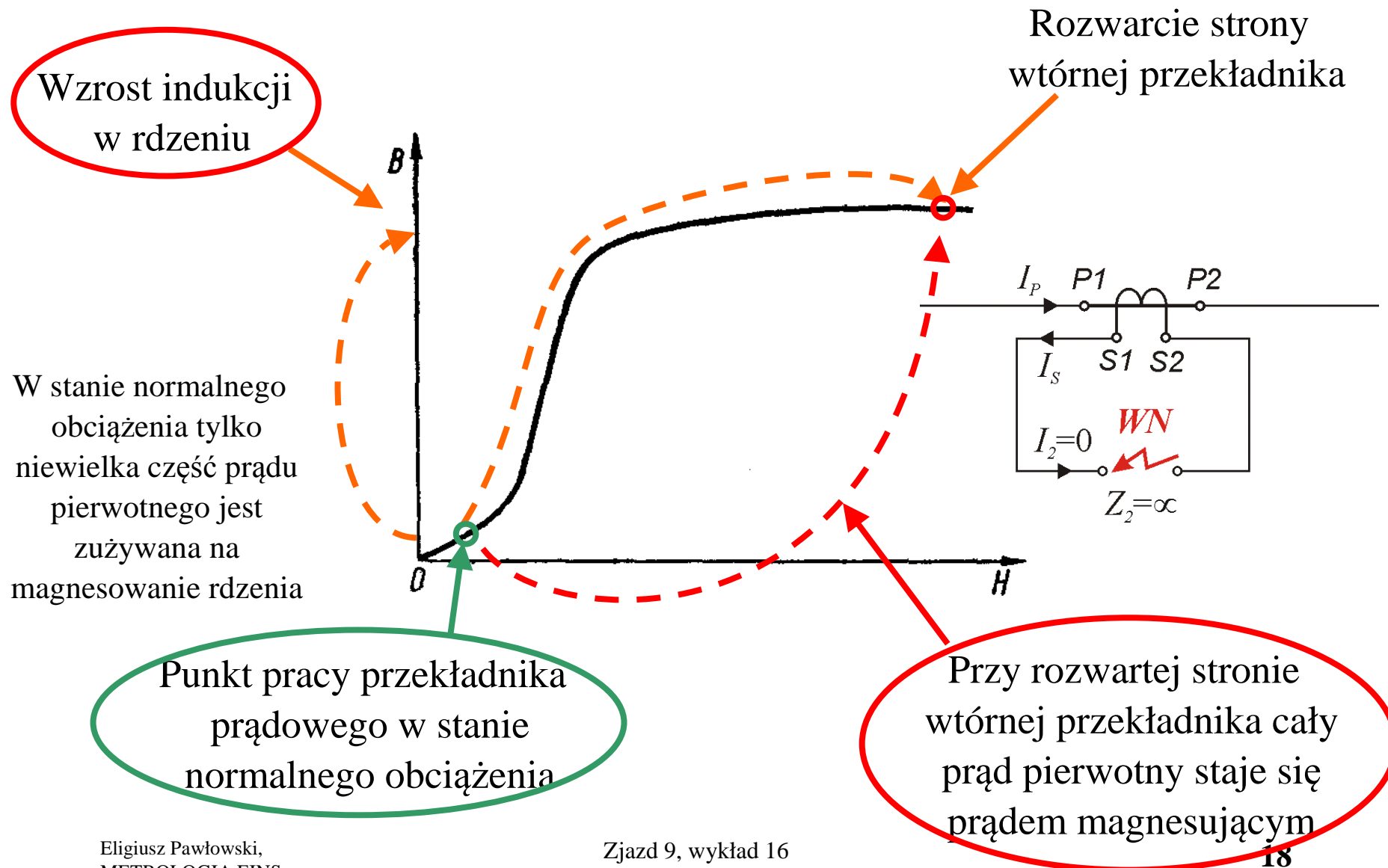
Silne grzanie się rdzenia



Indukowanie się wysokiego napięcia

Rozwarcie strony wtórnej przekładnika jest niebezpieczne!

# Rozwarcie przekładnika prądowego, charakterystyka magnesowania



## Przekładnik prądowy, **rozwarcie strony wtórnej**

- Prąd wtórny jest  $I_s$  równy zero, prąd pierwotny  $I_p$  staje się w całości prądem magnesującym  $I_\mu$ .
- Wielokrotnie wzrasta natężenie pola  $H$  i rdzeń się nasycy, indukcja  $B$  osiąga duże wartości, rosną straty w żelazie, rdzeń się nagrzewa, izolacja **ulega przegrzaniu i zniszczeniu.**
- Duże wartości indukcji  $B$  powodują indukowanie się wysokiego napięcia w uzwojeniu wtórnym, izolacja ulega **przebiciu**, występuje ryzyko porażenia obsługi.

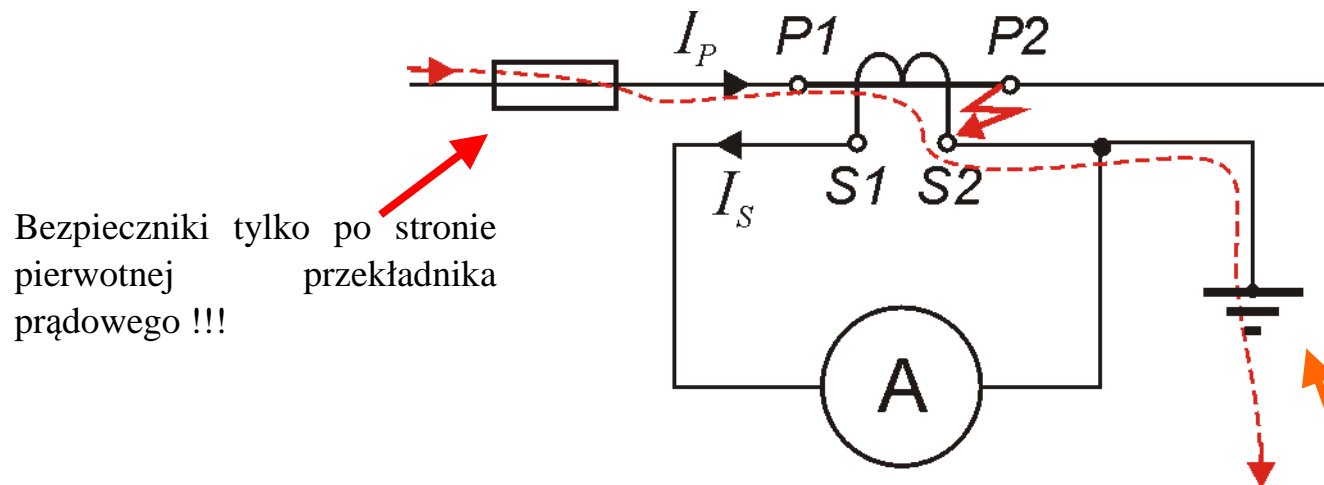
**-Przekładnik prądowy nigdy nie może pracować z rozwartym obwodem wtórnym !**

## Zabezpieczanie przekładnika prądowego

W obwodzie wtórnym przekładnika prądowego

**nie wolno stosować bezpieczników**

ponieważ nie wolno dopuścić do rozwarcia strony wtórnej!



Bezpieczniki tylko po stronie pierwotnej przekładnika prądowego !!!

Dla zapewnienia bezpieczeństwa w przypadku uszkodzenia izolacji przekładnika prądowego, **uziemia się stronę wtórną.**

## Przekładnik prądowy, **odporność na prądy zwarciove**

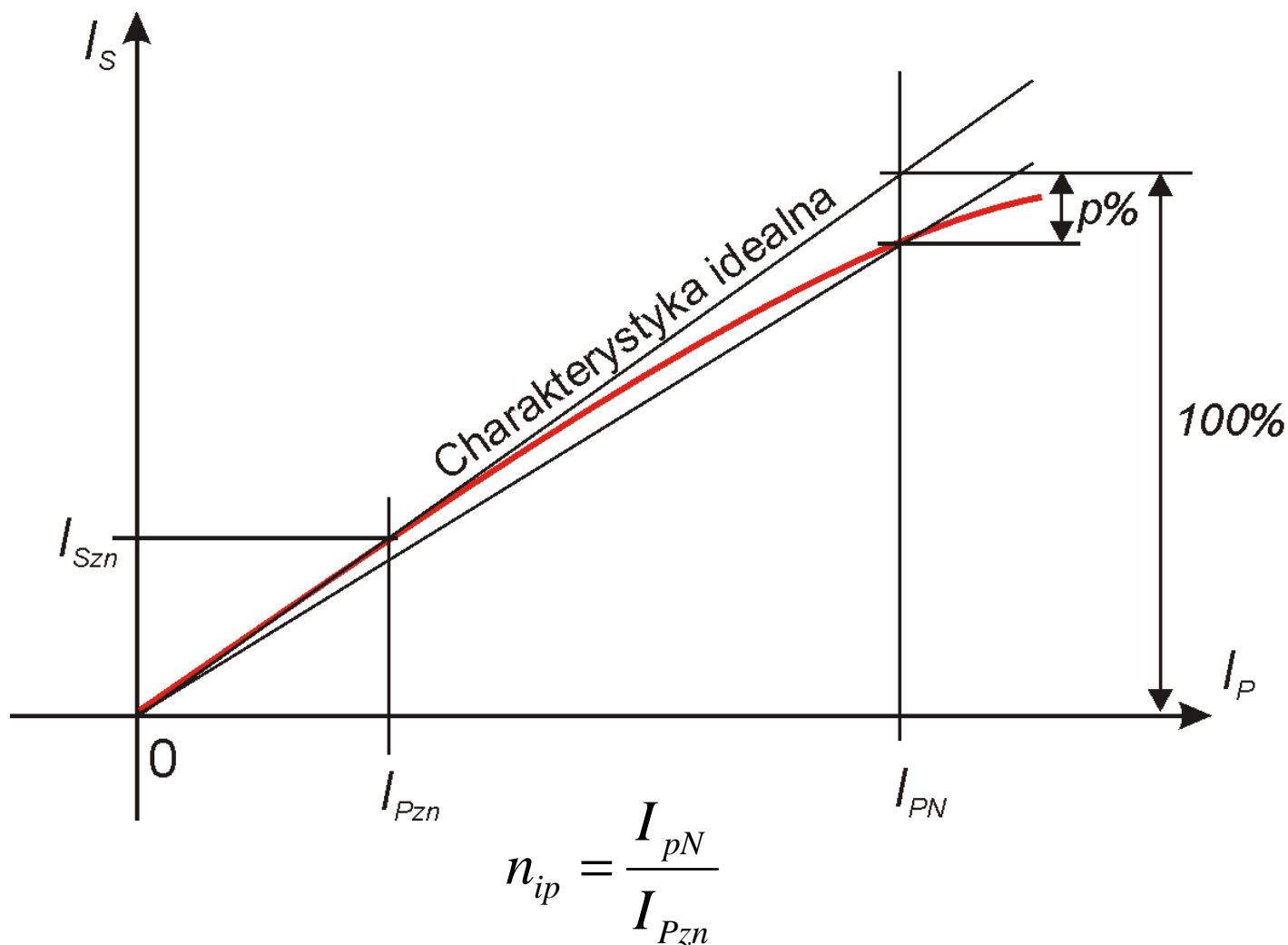
Dla scharakteryzowania właściwości przekładnika prądowego podczas zwarć definiuje się parametry:

-znamionowy prąd jednosekundowy  $I_{t1}$  - jest to największa wartość **skuteczna** prądu w uzwojeniu pierwotnym, który przepływając w ciągu 1 sekundy nie wywoła uszkodzenia **ciepłego** przekładnika,

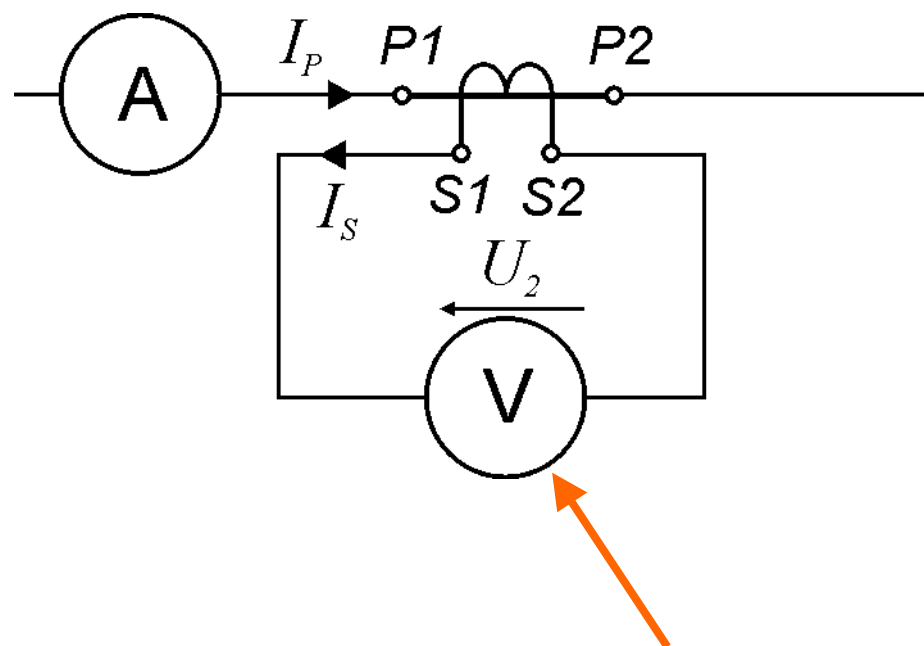
-znamionowy prąd szczytowy  $I_{dyn}$  - jest to największa wartość **chwilowa** prądu w uzwojeniu pierwotnym, który nie wywoła uszkodzenia **mechanicznego** przekładnika,

-liczbę przetężeńiowa – jest to krotność znamionowego prądu pierwotnego, przy której błąd przekładnika mieści się w określonych granicach 5% lub 10% (obecnie jest to współczynnik bezpieczeństwa przyrządu  $FS$ )

# Przekładnik prądowy, liczba przeteżeniowa

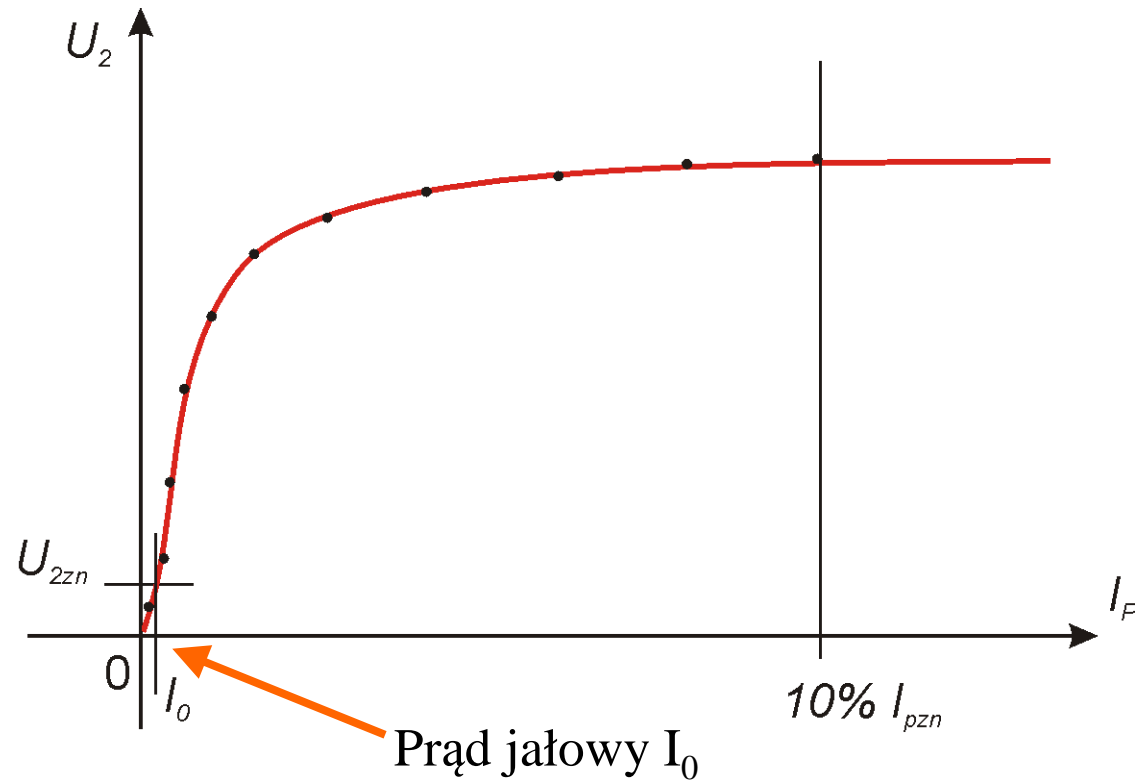


## Przekładnik prądowy, pomiar charakterystyki magnesowania



Strona wtórna obciążona tylko woltomierzem jest praktycznie rozwarta. Istnieje niebezpieczeństwo przeciążenia przekładnika. Prąd pierwotny podczas tych pomiarów nie powinien przekraczać 10% wartości znamionowej.

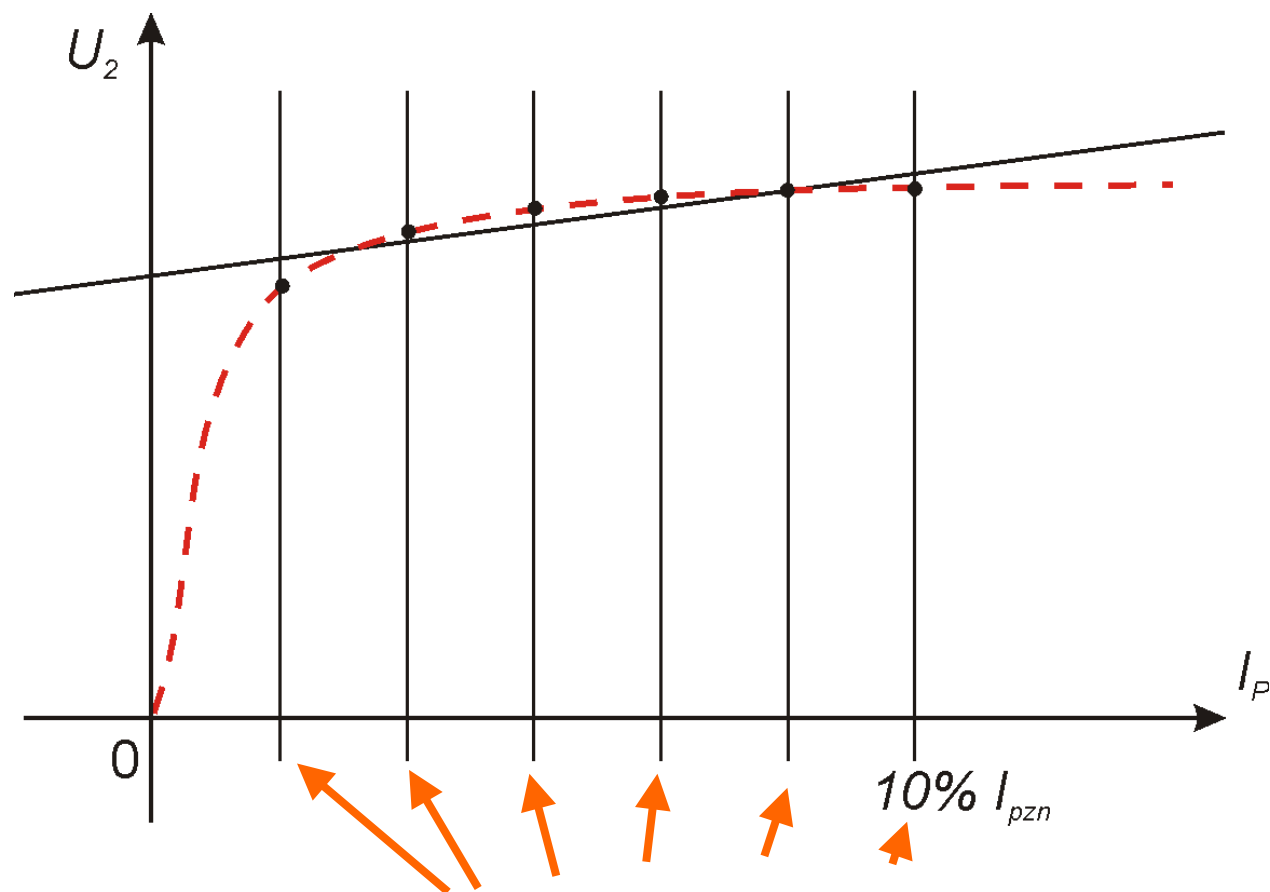
## Przekładnik prądowy, charakterystyki magnesowania



Należy równomiernie rozmieścić punkty pomiarowe wzdłuż charakterystyki magnesowania.

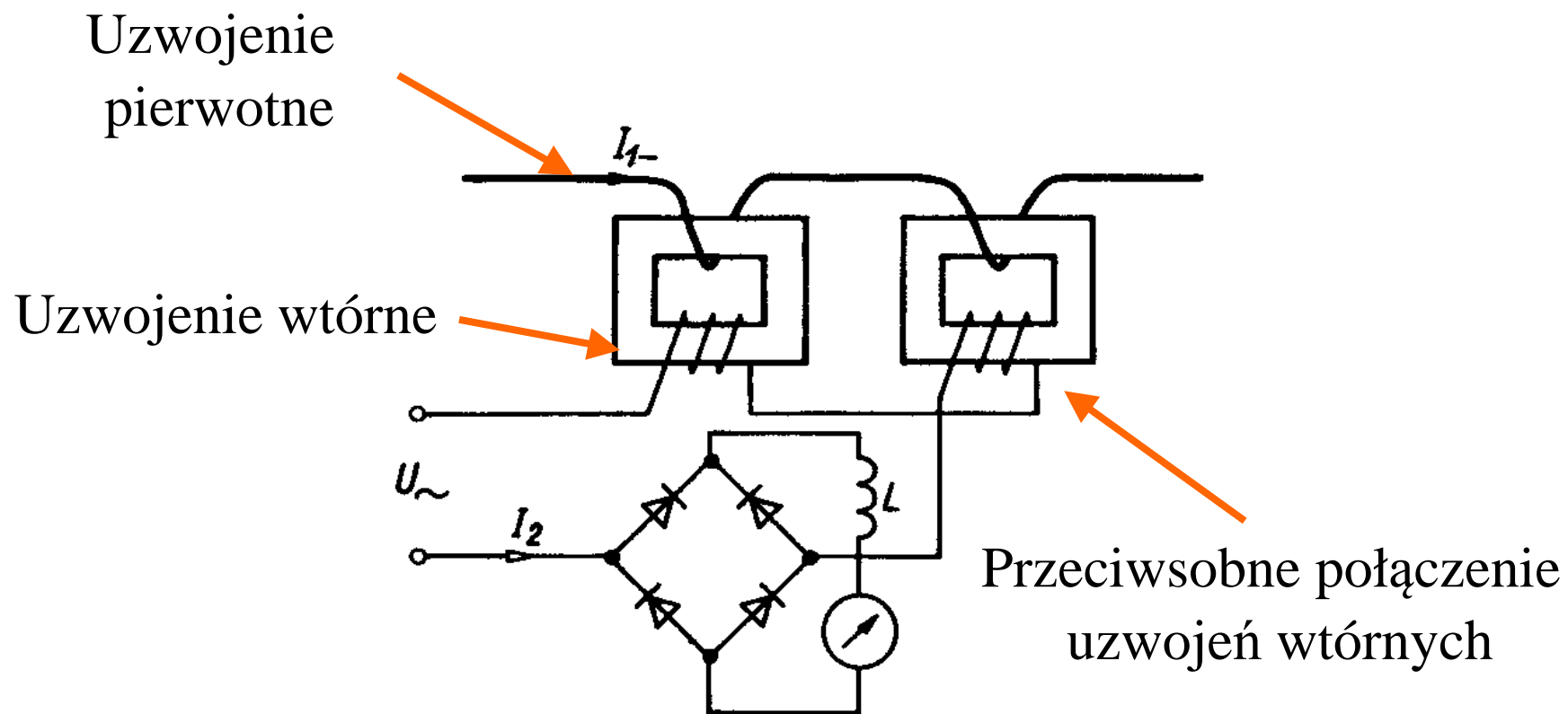


## Charakterystyka magnesowania, błędy wyznaczania

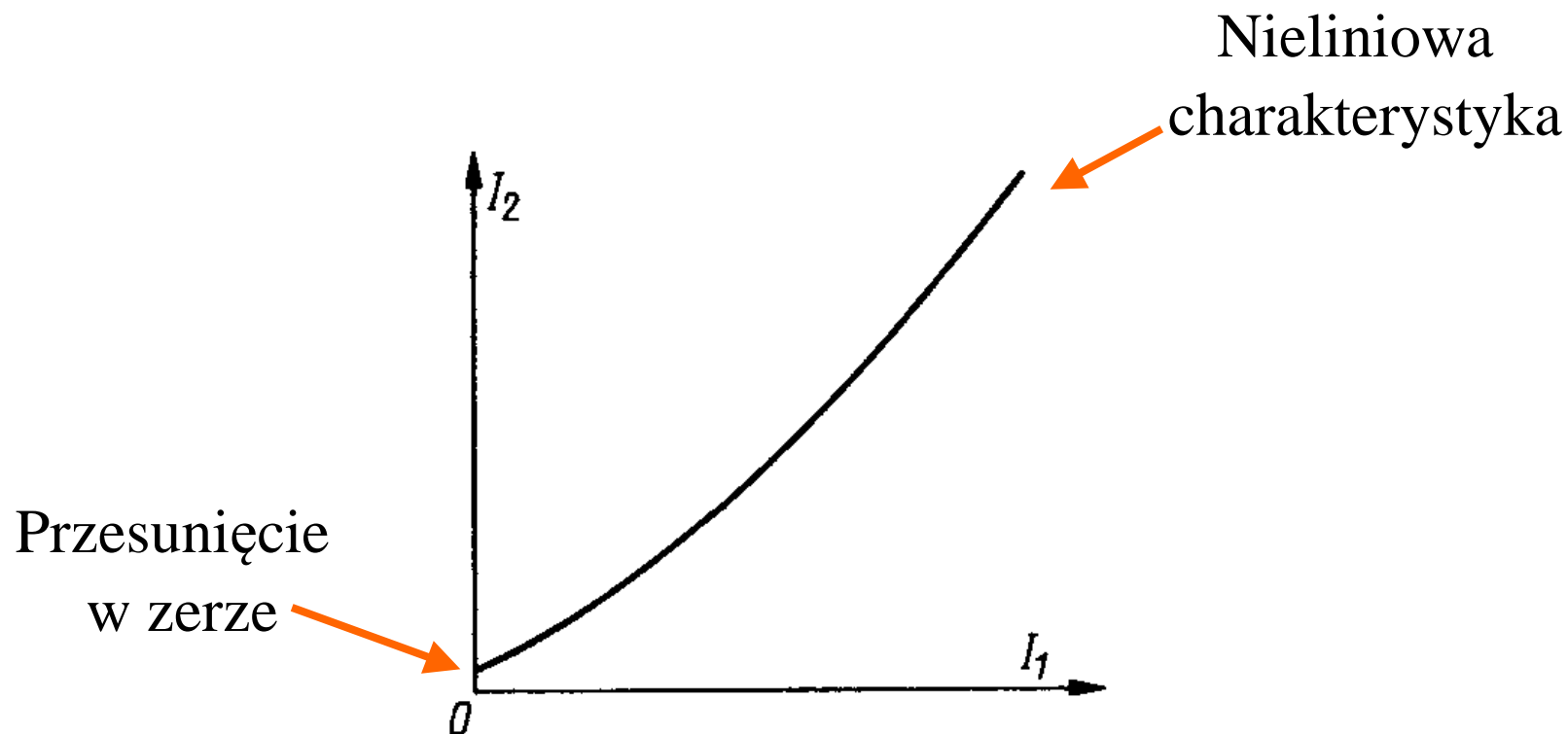


Nie można się ograniczyć tylko do punktów równomiernie rozłożonych wzdłuż osi X. Takie pomiary prowadzą do błędnej postaci wykresu! Pominięta zostaje stroma część charakterystyki.

# Przekładnik prądu stałego, transduktor

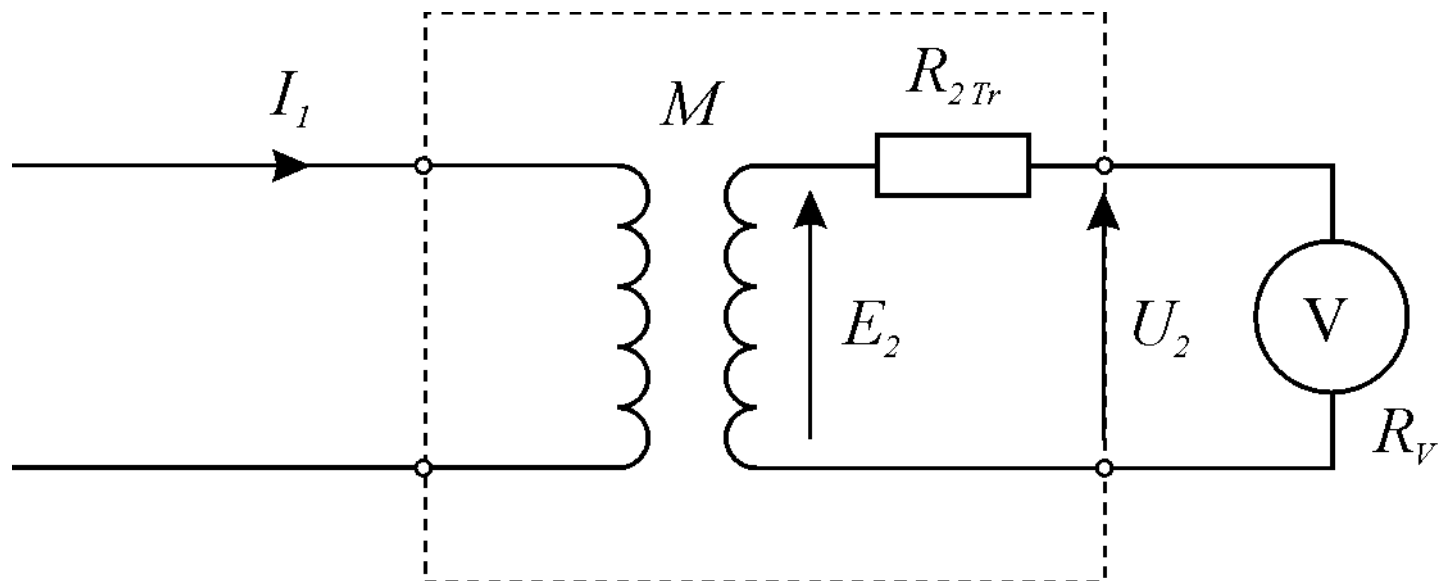


## Transduktor, charakterystyka



Transduktor nie rozróżnia kierunku prądu w uzwojeniu pierwotnym !

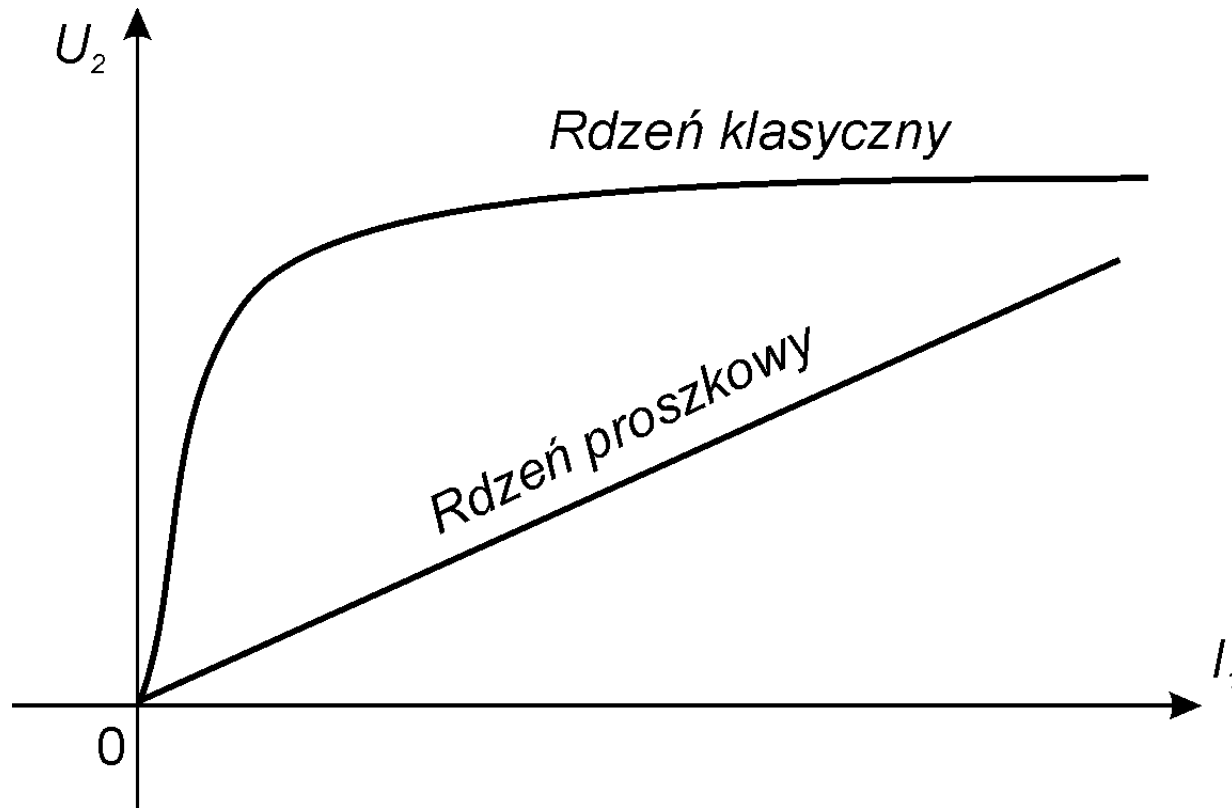
## Przekładnik prądowo – napięciowy, transreaktor



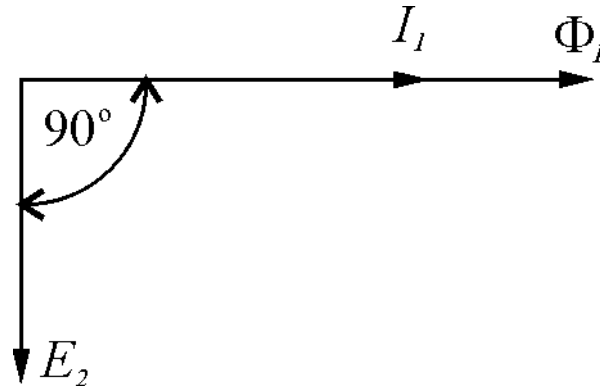
$$E_{2sr} = \omega M I_{1max} = 2\pi f M I_{1max}$$

$$U_2 = E_2 \frac{R_V}{R_V + R_{2Tr}}$$

# Transreaktor, rdzeń proszkowy



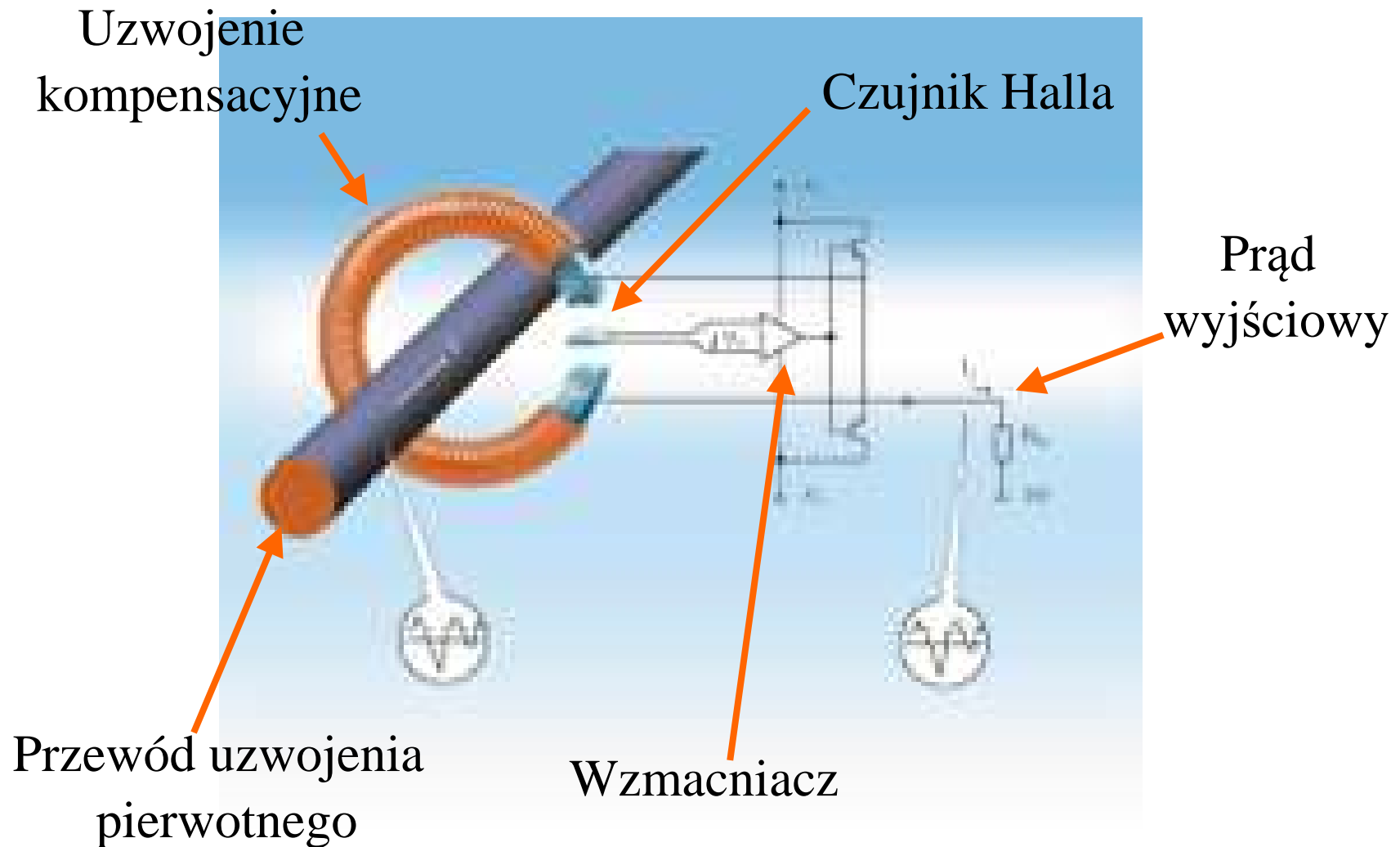
## Transreaktor, wykres wskazowy



Wady:

- Zależność  $E_2$  od częstotliwości,
- Przesunięcie fazowe  $90^\circ$ ,
- Reagowanie na amplitudę prądu, czuły na zniekształcenia.

## Aktywne przekładniki prądowe LEM




[Print](#)   [Send to](#)

**Product Search**

  
[+ Advanced search](#)

- [/ Home](#)
- [/ Markets](#)
- [/ Products](#)
  - [Browse Products](#)
    - **For Industry**
    - For Energy & Automation
    - For Traction & Trackside
    - For Automotive
    - Battery Monitoring
    - Wi-LEM
    - Energy Meter EM4T
  - [Advanced Search](#)
  - [Applications](#)
  - [Technologies](#)
  - [Product Documentation](#)
  - [Feature products](#)
  - [Advanced Search](#)
- [/ Technical Support](#)
- [/ Quality & Environment](#)
- [/ News & Events](#)
- [/ Press](#)
- [/ Investor Relations](#)
- [/ About LEM](#)
- [/ Contact](#)

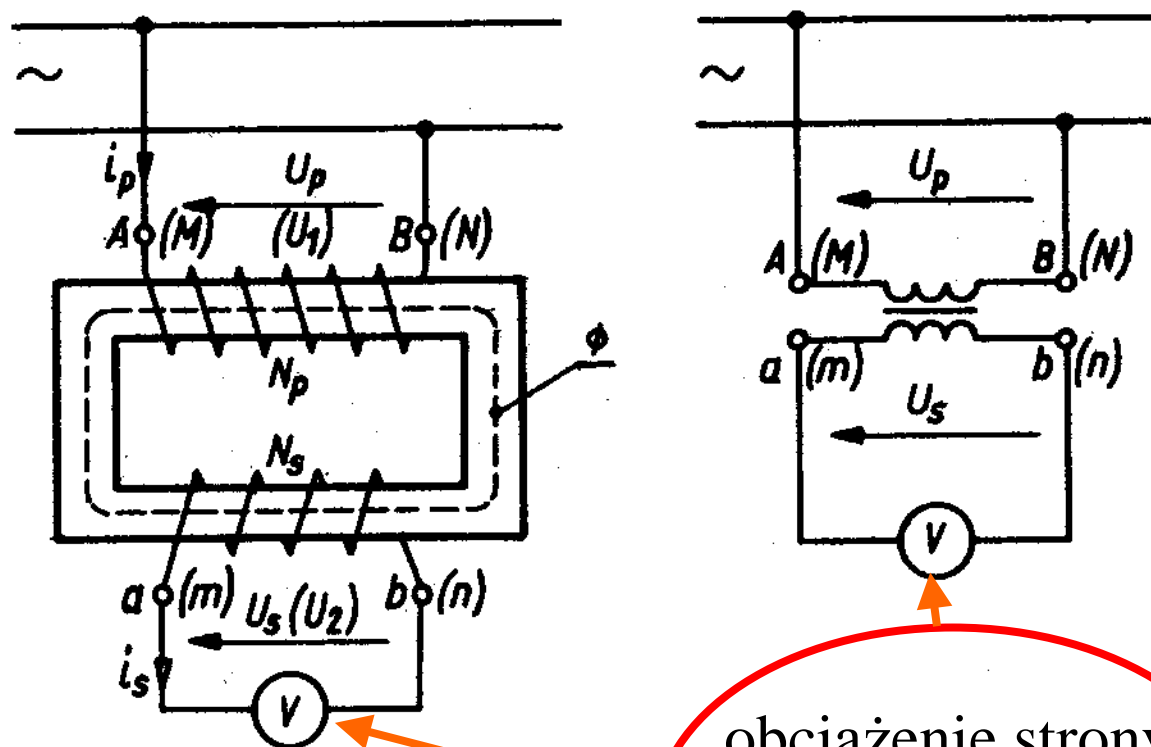
[Home](#) > [Products](#) > [Browse Products](#) > **For Industry**

## For Industry

| Nominal Current Range IPN (A) | Power Supply Range (V)      | Typical Accuracy @ 25°C % of IPN | Bandwidth (kHz) | Mounting | Technology | Series                            |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------|----------|------------|-----------------------------------|
| 0.1 - 0.4                     | +/-15                       | 2%                               | DC - 18         | PCB      | Fluxgate   | <a href="#">CT xxx -P</a>         |
| 1.5 - 50                      | +5                          | 0.8%                             | DC - 200        | PCB      | Fluxgate   | <a href="#">CAS - CASR - CKSR</a> |
| 0.25 - 200                    | +/- 12...15                 | 0.41 - 0.85%                     | DC - 200        | PCB      | C/L        | <a href="#">LA 25-200 -P</a>      |
| 2 - 100                       | +5                          | 3 - 8%                           | DC - 105        | PCB      | O/L        | <a href="#">FHS 40-P/SP600</a>    |
| 2x3 - 25                      | +/- 12...15                 | 3%                               | DC-50           | PCB      | O/L        | <a href="#">HXD</a>               |
| 3 - 50                        | +/-12...15<br>SP2 + 12...15 | 1 - 2%                           | DC - 50         | PCB      | O/L        | <a href="#">HX &amp; HX/SP2</a>   |
| 5 - 20                        | + 5                         | 1%                               | DC-50           | SMD      | O/L        | <a href="#">HMS</a>               |
| 5 - 50                        | + 5                         | 1%                               | DC - 50         | PCB      | O/L        | <a href="#">HXS</a>               |
| 5 - 50                        | +/-15<br>SP1 +5             | 1 - 4%                           | DC - 50         | PCB      | O/L        | <a href="#">HY &amp; HY/SP1</a>   |
| 6 - 25                        | + 5                         | 0.7%                             | DC - 200        | PCB      | C/L        | <a href="#">LTS - LTSR-LTSP</a>   |
| 16 - 100                      | +/- 12...15                 | 0.9%                             | DC - 300        | PCB      | C/L        | <a href="#">LAX 100-NP</a>        |
| 25 - 125                      | +/- 12...15                 | 0.25 - 0.4%                      | DC - 200        | PCB      | C/L        | <a href="#">LAH</a>               |
| 3 x 25 - 150                  | +/-12 ...15                 | 2 - 3.5%                         | DC-10           | PCB      | O/L        | <a href="#">HTT-P</a>             |
| 50 - 100                      | + 5                         | 1 - 1.7%                         | DC - 100        | PCB      | Eta        | <a href="#">LAS</a>               |
| 50 - 100                      | +/- 15                      | 1 -2.2%                          | DC - 50         | PCB      | O/L        | <a href="#">HTY</a>               |
| 50 - 400                      | + 5                         | 1%                               | DC - 50         | PCB      | O/L        | <a href="#">HAIS</a>              |
| 50 - 400                      | +/- 12...15                 | 1%                               | DC - 50         | PCB      | O/L        | <a href="#">HTB</a>               |
| 50 - 400                      | +/-12...+15                 | 1.75%                            | DC - 50         | PCB      | O/L        | <a href="#">HTB/SP5</a>           |
| 50 - 600                      | +/- 15                      | 1 -1.75%                         | DC - 50         | Panel    | O/L        | <a href="#">HAL</a>               |



## Przekładnik napięciowy, budowa i oznaczenia



M N, m n – stare oznakowania,  
A B, a b – nowe oznakowania

obciążenie strony  
wtórnej przekładnika  
dużą rezystancją!

## Przekładnik napięciowy, przekładnie

$$\frac{U_p}{U_s} \approx \frac{N_p}{N_s}$$

Przekładnia zwojowa

$$K_{Uz} = \frac{N_p}{N_s}$$

Nie uwzględnia strat

Przekładnia napięciowa

$$K_U = \frac{U_p}{U_s}$$

Nie jest stała

Przekładnia znamionowa

$$K_{UN} = \frac{U_{pN}}{U_{sN}}$$

Nie jest dokładna

Zastosowanie

$$U_p = K_{UN} U_s$$

## Przekładnik napięciowy, błędy

### **Błąd napięciowy**

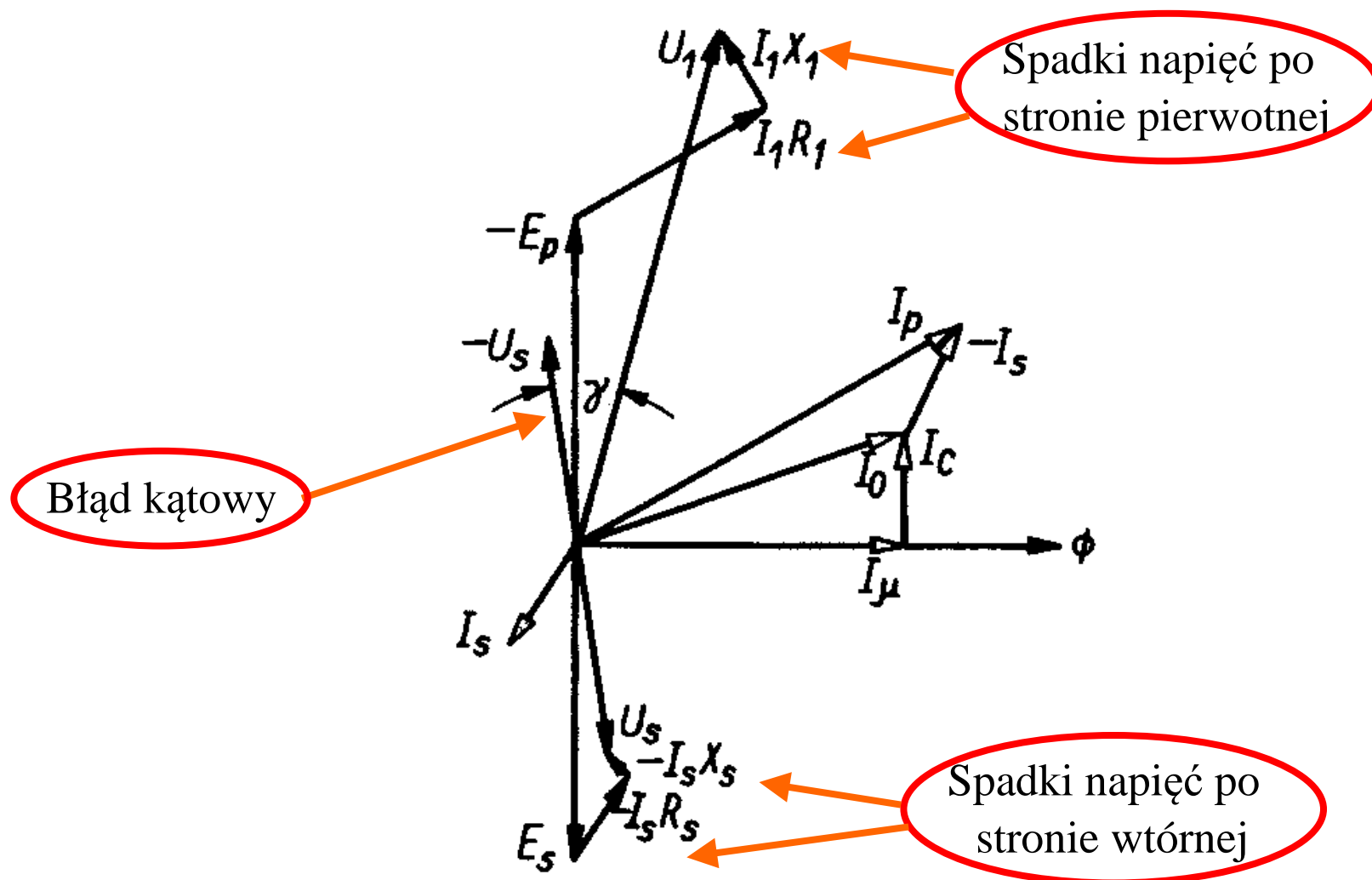
$$\delta_U = \frac{\Delta U}{U_P} = \frac{K_{UN}U_S - U_P}{U_P} = \frac{K_{UN} - K_U}{K_U}$$

Źródłem błędu napięciowego są spadki napięć na uzwojeniach pierwotnym i wtórnym.

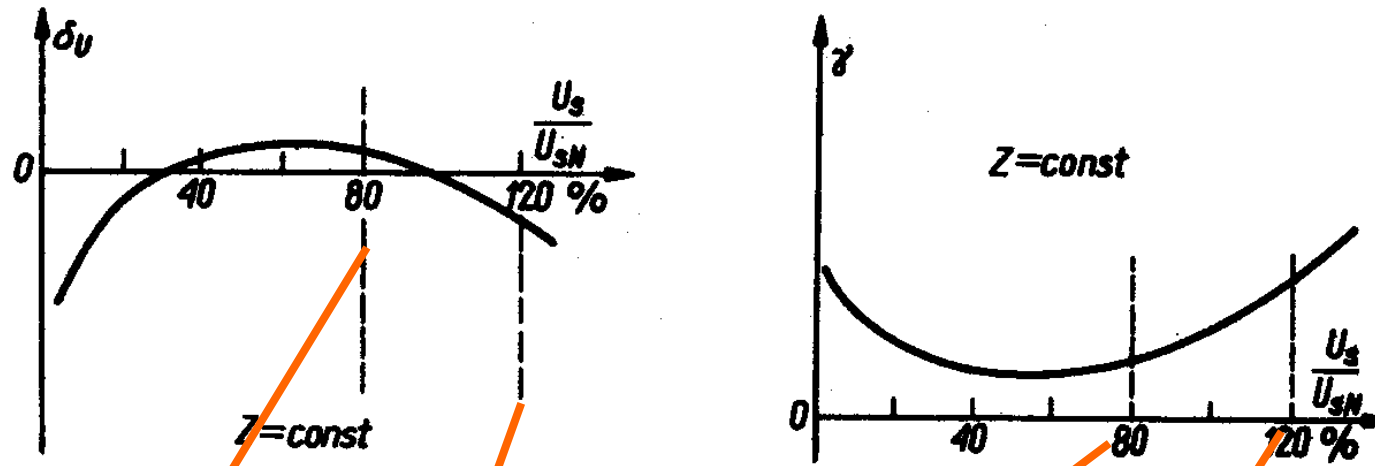
### **Błąd kątowy**

Błąd kątowy przekładnika napięciowego jest to przesunięcie fazowe  $\gamma$  pomiędzy wektorem napięcia pierwotnego  $U_P$  i odwróconym wektorem napięcia wtórnego  $U_S$ .

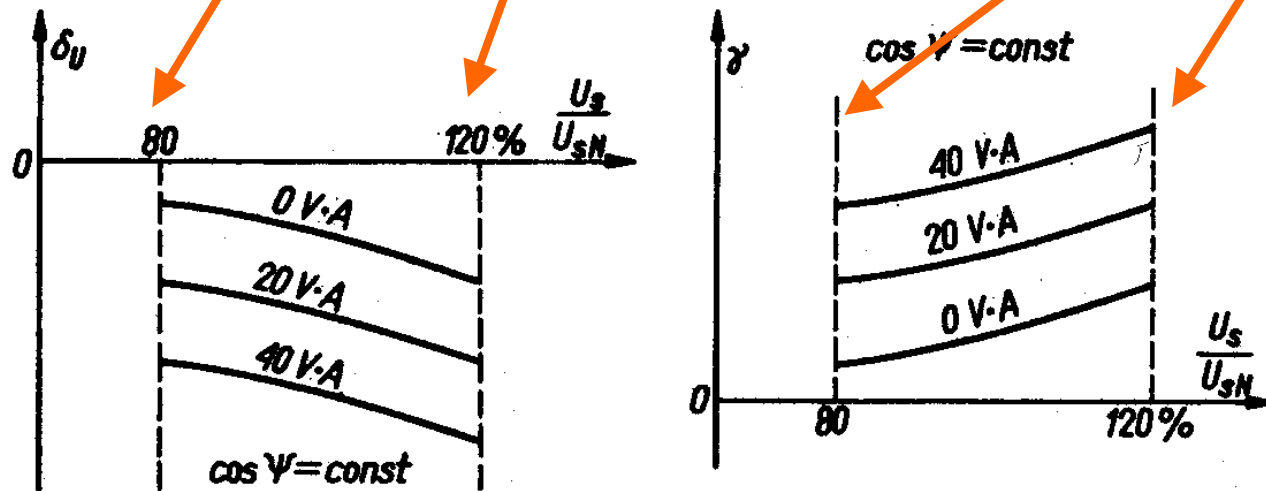
# Przekładnik napięciowy, wykres wskazowy



# Przekładnik napięciowy, wykresy błędów

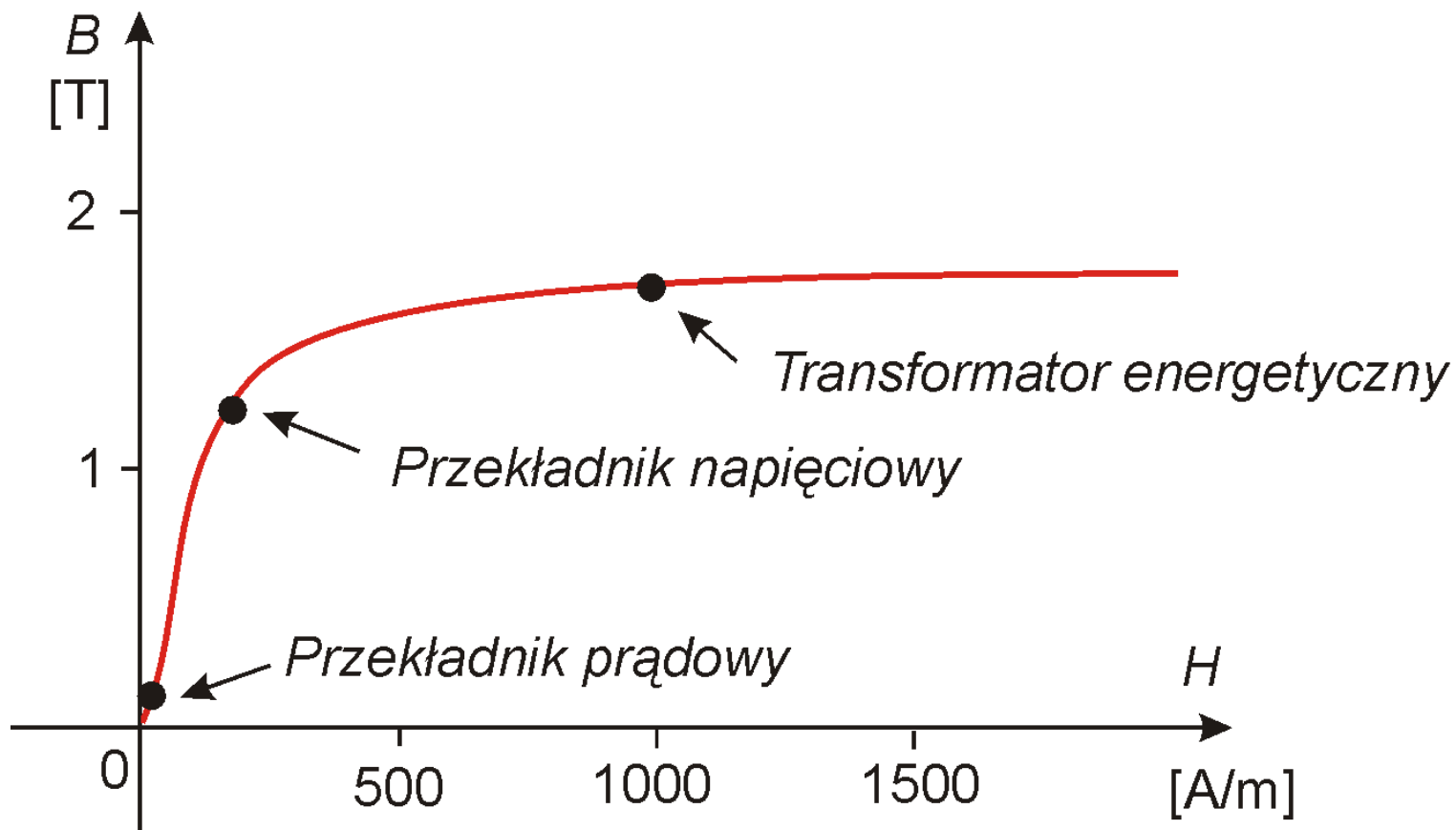


Zależność błędów przekładnika od napięcia przy stałym obciążeniu

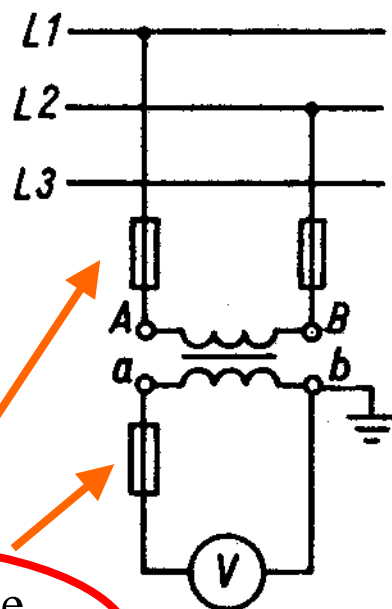


Zależność błędów przekładnika od napięcia przy różnych mocach

## Przekładniki, punkty pracy na ch-ce magnesowania

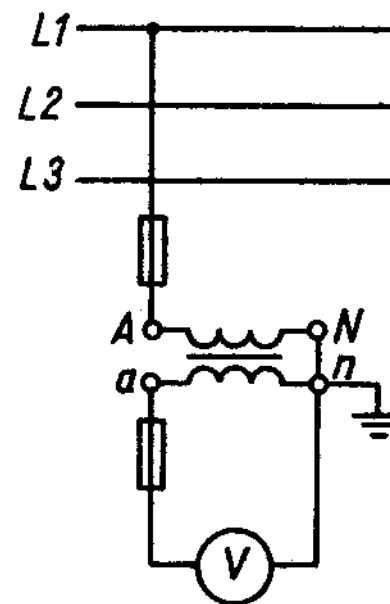


## Przekładnik napięciowy, pomiary 1F



Zabezpieczenie przeciwzwarcione!

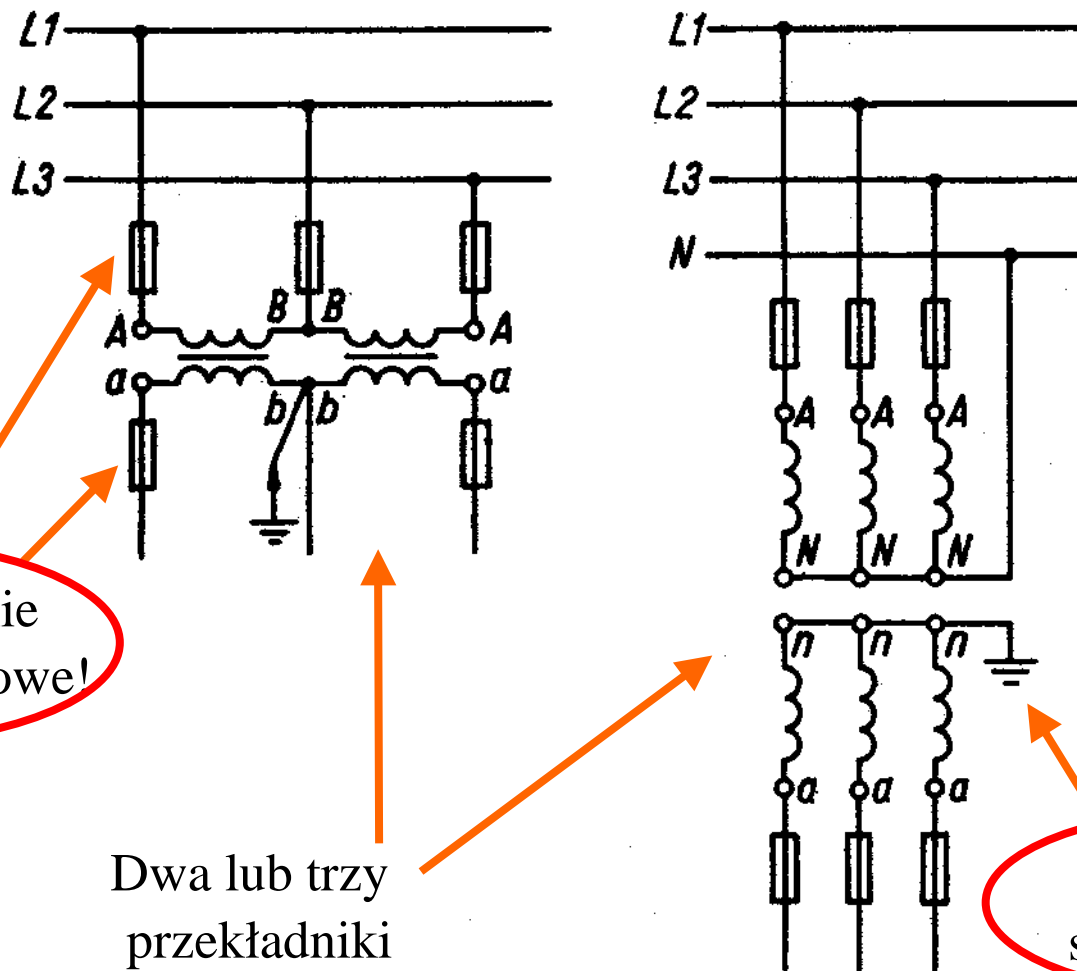
Pomiar napięcia międzyfazowego



Uziemienie strony wtórnej!

Pomiar napięcia fazowego

# Przekładnik napięciowy, pomiary 3F



Zabezpieczenie przeciwzwarcowe!

Dwa lub trzy przekładniki napięciowe

Uziemienie strony wtórnej!



## Pomiary mocy

Należy rozróżnić pomiary mocy dla:

- Prądów i napięć stałych
- Prądów i napięć przemiennych sinusoidalnych
- Prądów i napięć przemiennych odkształconych

Dla prądów i napięć przemiennych mierzymy:

- moc czynną  $P$
- moc bierną  $Q$
- moc pozorną  $S$

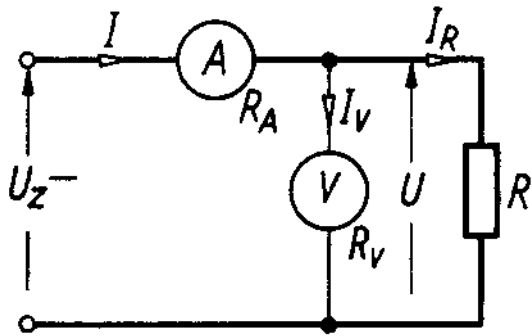
Dodatkowo dla prądów i napięć odkształconych mierzymy:

- moc odkształconą  $D$

## Pomiary mocy przy prądach stałych

Przy **prądach stałych** moc  $P$  jest równa iloczynowi prądu  $I$  i napięcia  $U$ :

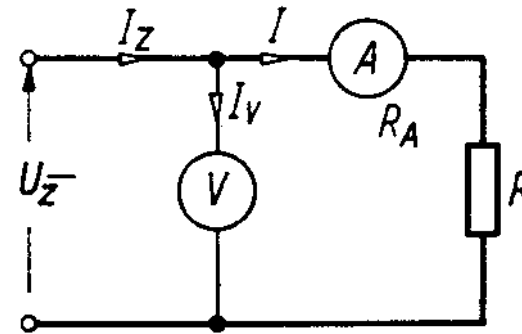
$$P = U I$$



$$P_R = U(I - I_V)$$

$$\delta_P = \frac{I_V}{I_R} = \frac{R}{R_V}$$

Układ dla małych  $R$



$$P_R = (U - IR_A)I$$

$$\delta_P = \frac{R_A}{R}$$

Układ dla dużych  $R$

## Moc chwilowa dla prądów i napięć przemiennych

Przy **prądach i napięciach przemiennych** definiuje się moc chwilową  $p(t)$ , która jest również zmienna w czasie:

$$p(t) = u(t) i(t)$$

Dla przebiegów sinusoidalnych:

$$u(t) = U_{\max} \sin(\omega t)$$

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$$

$$p(t) = u(t) i(t) = U_{\max} \sin(\omega t) I_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$$

Stosujemy tożsamość trygonometryczną:

$$\sin(\alpha) \sin(\beta) = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

# Moc chwilowa dla prądów i napięć sinusoidalnych

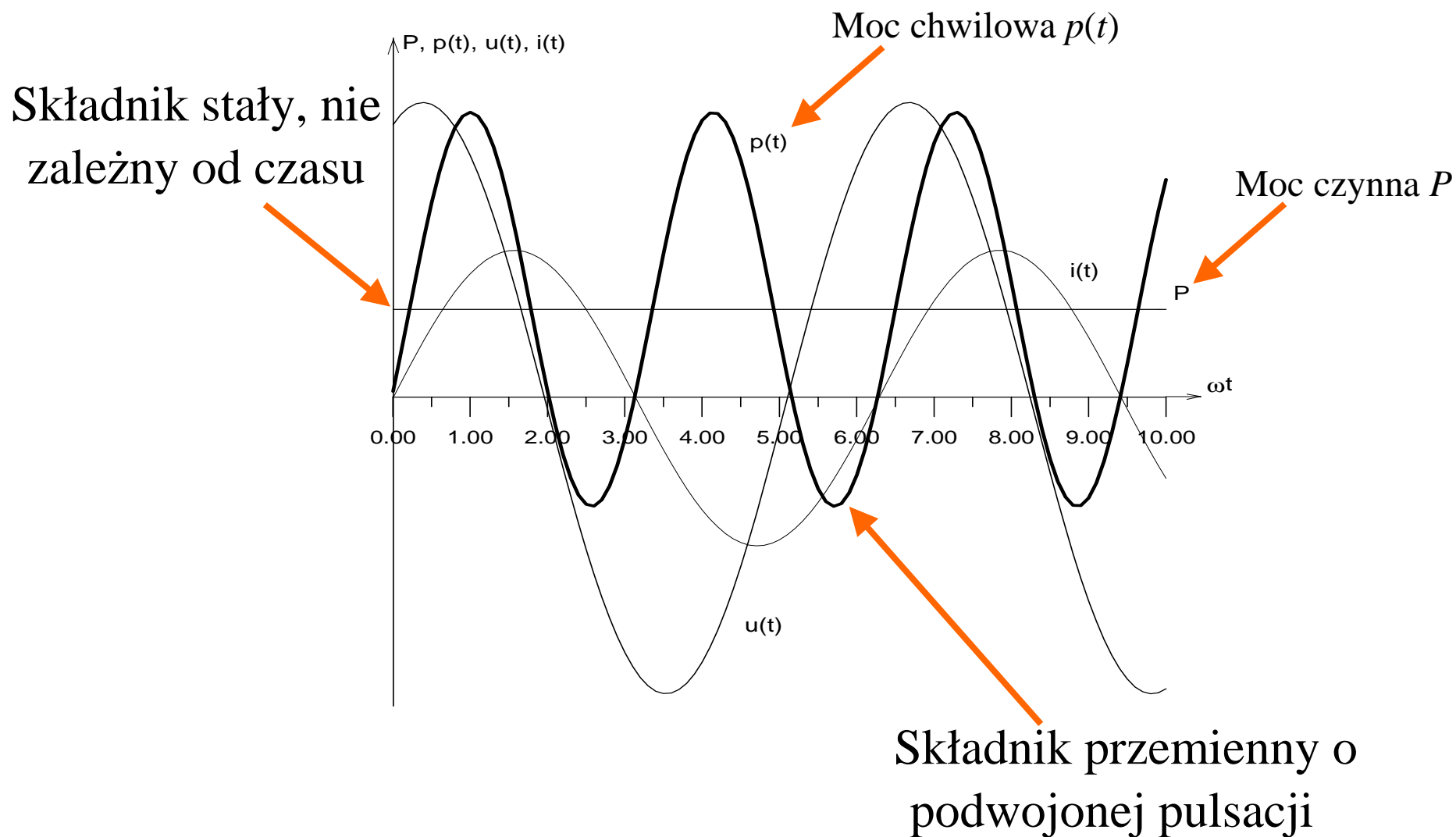
Po podstawieniu otrzymamy:

$$p(t) = \frac{1}{2} U_{\max} I_{\max} (\cos(\varphi) - \cos(2\omega t + \varphi))$$

Składnik stały, nie  
zależny od czasu

Składnik przemienny o  
podwojonej pulsacji

# Moc dla prądów i napięć sinusoidalnych - przebiegi czasowe



## Moc czynna, podstawowa definicja

Moc czynna  $P$  jest to uśredniona za okres  $T$  moc chwilowa  $p(t)$ :

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

**Jest to podstawowy wzór definiujący moc czynną  $P$  !!!**

Jest on słuszny i prawdziwy w każdym przypadku.

Dla przebiegów **sinusoidalnych** postać tego wzoru **ulega uproszczeniu**

## Moc czynna dla prądów i napięć sinusoidalnych

Podstawiamy do wzoru sinusoidalne napięcie i prąd

$$u(t) = U_{\max} \sin(\omega t)$$

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$$

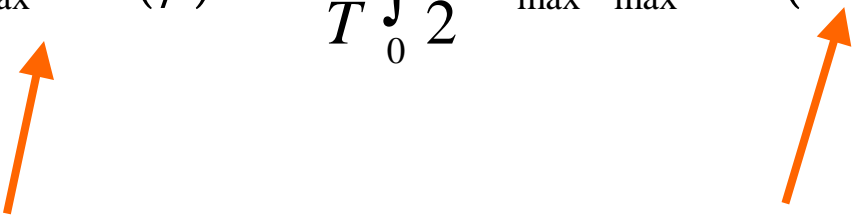
$$P = \overline{p(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt$$

Moc czynna wynosi więc:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} U_{\max} I_{\max} (\cos(\varphi) - \cos(2\omega t + \varphi)) dt$$

## Moc czynna dla prądów i napięć sinusoidalnych

Rozdzielamy na dwie całki:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} U_{\max} I_{\max} \cos(\varphi) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} U_{\max} I_{\max} \cos(2\omega t + \varphi) dt$$


Składnik stały, nie  
zależny od czasu

Składnik przemienny o podwojonej  
pulsacji, wartość średnia równa 0

$$P = \frac{1}{2} U_{\max} I_{\max} \cos(\varphi) = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \cos(\varphi)$$

$$P = U_{sk} I_{sk} \cos(\varphi)$$



## Moc czynna, definicja - podsumowanie

$$P = U_{sk} I_{sk} \cos(\varphi)$$

1. Ten wzór jest słuszny **tylko dla przebiegów sinusoidalnych**
2. Dla przebiegów odkształconych obowiązuje podstawowy wzór definicyjny (uśredniona za okres moc chwilowa)
3. Pomiar mocy wymaga wymnożenia wartości chwilowych prądu i napięcia, a następnie uśrednieniu wyniku mnożenia
4. Uśrednianie można zastąpić odfiltrowaniem składnika o podwojonej częstotliwości  $2\omega$

# Moc czynna, bierna i pozorna dla sygnałów sinusoidalnych

Moc czynna  $P$

$$P = U_{sk} I_{sk} \cos(\varphi) \quad [\text{W}]$$

Moc bierna  $Q$

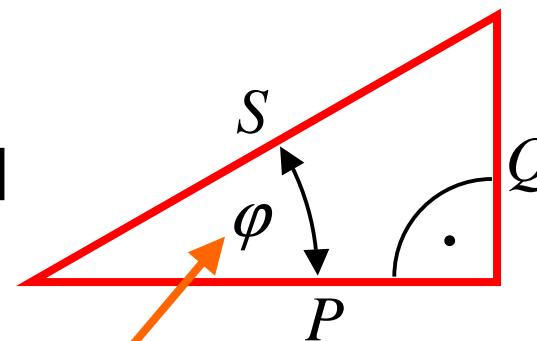
$$Q = U_{sk} I_{sk} \sin(\varphi) \quad [\text{Var}]$$

Moc pozorna  $S$

$$S = U_{sk} I_{sk} \quad [\text{VA}]$$

Trójkąt mocy

$$S^2 = P^2 + Q^2$$



$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Ale pamiętajmy: tylko dla sinusoidalnych przebiegów!!!

## Przebiegi odkształcone napięcia i prądu

Odkształcone napięcie

$$u(t) = \sum_{n=0}^{\infty} U_{mn} \sin(n\omega t + \varphi_{un})$$

Odkształcony prąd

$$i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t + \varphi_{in})$$

## Moc czynna, bierna i pozorna dla przebiegów odkształconych

Moc czynna  $P$

$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos(\varphi_k)$$

Moc bierna  $Q$

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin(\varphi_k)$$

Moc pozorna  $S$

$$S = I_{sk} U_{sk} = \sqrt{\left( \sum_{k=0}^{\infty} I_k^2 \sum_{k=0}^{\infty} U_k^2 \right)}$$

Trójkąt mocy nie  
obowiązuje !

$$S^2 \neq P^2 + Q^2$$

## Trójkąt mocy dla przebiegów odkształconych

Dla przebiegów odkształconych trójkąt mocy nie obowiązuje !

$$S^2 \neq P^2 + Q^2$$

Problematyka definiowania i pomiaru mocy dla przebiegów odkształconych nie posiada obecnie jeszcze jednej powszechnie uznanej i stosowanej teorii. Zagadnienia te są cały czas przedmiotem badań naukowych.

## Moc odkształcona $D$ dla przebiegów odkształconych

Jednym z prostszych rozwiązań problemu trójkąta mocy dla przebiegów odkształconych jest przyjęcie definicji na

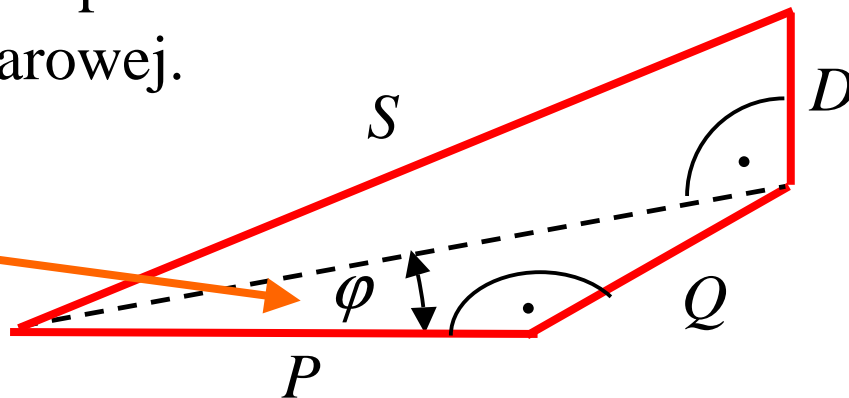
**moc odkształconą  $D$ :**

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

$P, Q, S, D$  w przestrzeni trójwymiarowej.

$$\cos \varphi \neq \frac{P}{S}$$

Równość jest tylko dla sinusoidalnych przebiegów!!!



Moc bierna według definicji Budeanu (1927 r.)

## Współczynnik mocy dla przebiegów odkształconych

W praktyce zawsze moc czynna  $P$  jest mniejsza od mocy pozornej  $S$  (teoretycznie może być równa) :

$$P \leq S$$

Dla przebiegów **sinusoidalnych** występuje związek z kątem przesunięcia fazowego  $\varphi$  :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Dla przebiegów **odkształconych** **nie można** określić przesunięcia fazowego  $\varphi$ , wprowadza się współczynnik mocy **PF (Power Factor)**:

$$PF = \frac{P}{S}$$

$$\cos \varphi \neq PF$$

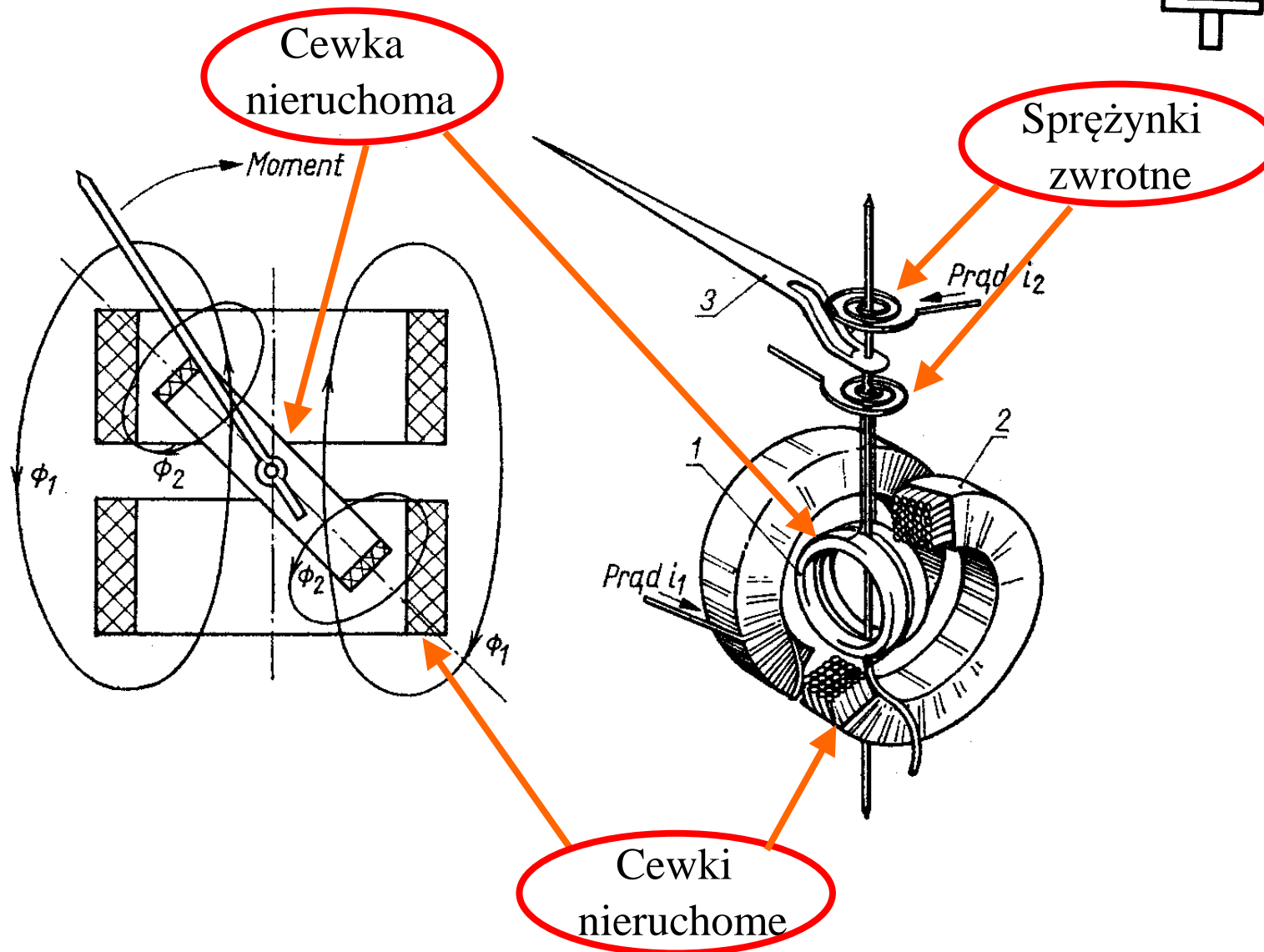
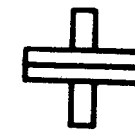
**To nie jest to samo !!!**

# Koncepcje mocy biernej dla przebiegów odkształconych

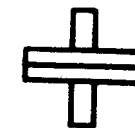
1. P.Ch. Steinmetz, (1892) Is a phase-shift in the current of an electric arc? Elektrotechnische Zeitschrift, Heft 42, s. 567-568.
2. M.A. Illović, (1925), Definition et mesure de la puissance et de l'énergie réactives, Bull. Soc. Franc. Electriciens.
3. C.I. Budeanu, (1927) Reactive and apparent powers, Institut Romain de l'Energie, Bucharest.
4. S. Fryze, (1931) Moc rzeczywista, urojona i pozorna w obwodach elektrycznych o przebiegach odkształconych prądu i napięcia, Przegląd Elektrotechniczny, z. 7, 193-203, z. 8, 225-234, 1931, (1932): z. 22, 673-676.
5. S. Fryze, (1985), Teoretyczne i fizyczne podstawy definicji mocy czynnej, biernej i pozornej w niesymetrycznych układach wielofazowych o odkształconych przebiegach napięć i prądów, Zeszyty Naukowe Pol. Śl. Elektryka, No. 100, 29-46.
6. L.S. Czarnecki, (1987), What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned, IEEE Trans. on Inst. Meas., Vol. IM-36, No. 3, s. 834-837.
7. L.S. Czarnecki, (1997) Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents, Archiv für Elektrot., (81), N. 2, s. 5-15.
8. A. Skopec, C. Stec, (2008) Możliwość przedstawienia jednolitej nowej koncepcji mocy biernej prądu niesinusoidalnego w dziedzinie czasu, Przegląd Elektrotechniczny, R84, No. 6, s. 69-74.
9. L.S. Czarnecki, (2008), Currents' Physical Components (CPC) concept: a fundamental for power theory, Przegląd Elektrotechniczny, R84, No. 6, s. 28-37.



# Pomiary mocy czynnej - ustrój elektrodynamiczny



## Ustrój elektrodynamiczny, zasada działania



Energia pola  
magnetycznego cewek

$$W_m = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + M_{12} I_1 I_2$$

Dla prądów stałych

Moment napędowy

$$M_n = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2$$

Moment zwrotny

$$M_z = k\alpha$$

Równowaga momentów

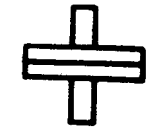
$$M_n = \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2 = k\alpha = M_z$$

Wychylenie wskazówki

dla prądów stałych

$$\alpha = \frac{1}{k} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2$$

## Ustrój elektrodynamiczny, prądy przemiennie



Dla prądów  
przemiennych

$$M_n = \frac{dM_{12}}{d\alpha} i_1 i_2 = I_{1\max} \sin \omega t I_{2\max} \sin(\omega t + \varphi) \frac{dM_{12}}{d\alpha}$$

Zastosujemy znaną  
już tożsamość

$$\sin(\alpha) \sin(\beta) = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

Średni moment  
napędowy

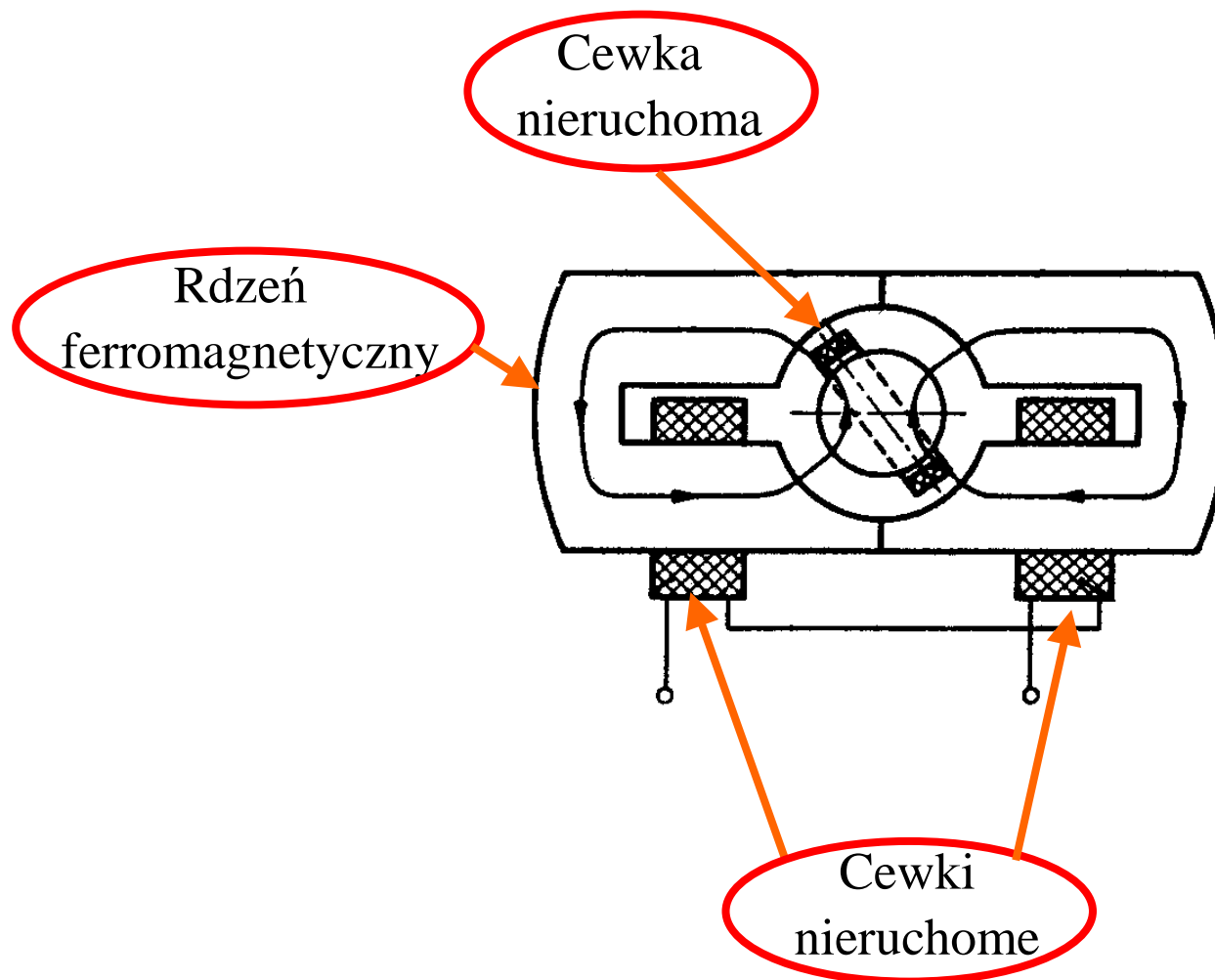
$$M_{\text{sr}} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = \frac{1}{T} \int_0^T I_{1\max} I_{2\max} \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) \frac{dM_{12}}{d\alpha} dt$$

Wchylenie wskazówki dla  
prądów przemiennych

$$\alpha = \frac{1}{k} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2 \cos(\angle I_1 I_2)$$

Wchylenie zależne  
od kąta fazowego

# Pomiary mocy czynnej - ustrój ferrodynamiczny



## Ustrój ferrodynamiczny, zasada działania



Energia pola  
magnetycznego cewki

$$W_m = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + M_{12} I_1 I_2$$

Moment napędowy

$$M_n = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2$$

$\frac{dM_{12}}{d\alpha} = \text{const.}$

Moment zwrotny

$$M_z = k\alpha$$

Równowaga momentów

$$M_n = c I_1 I_2 = k\alpha = M_z$$

Wychylenie wskazówki

dla prądów stałych

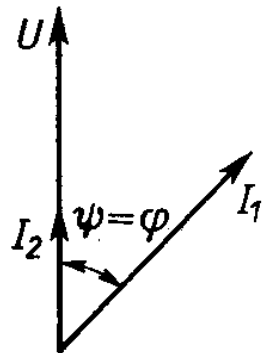
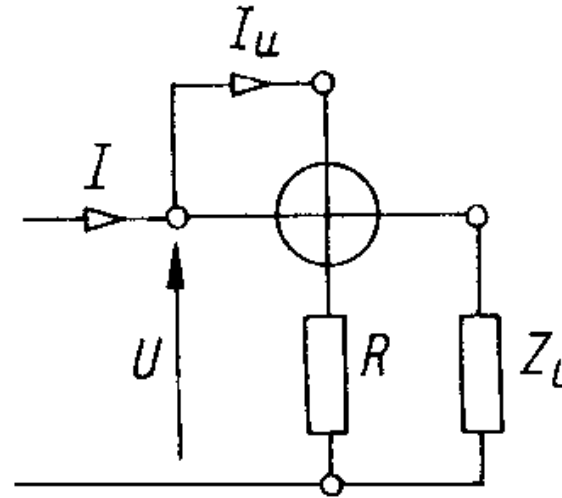
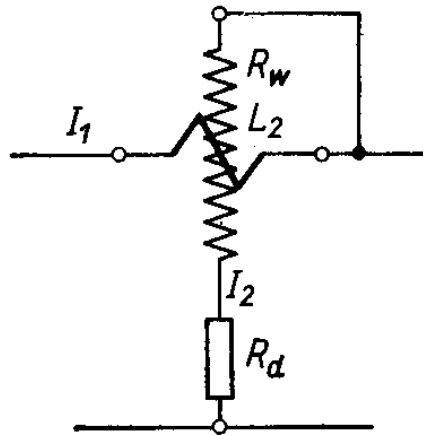
$$\alpha = \frac{c}{k} I_1 I_2$$

Wychylenie wskazówki dla

prądów przemiennych

$$\alpha = \frac{c}{k} I_1 I_2 \cos(\angle I_1 I_2)$$

## Watomierz połączenia, wykres wskazowy



$$I_U = \frac{U}{R}$$

$$\alpha = \frac{c}{k} I_1 \frac{U}{R} \cos(\angle I_1 U)$$

$$\alpha = c_1 UI \cos(\varphi) = c_1 P$$

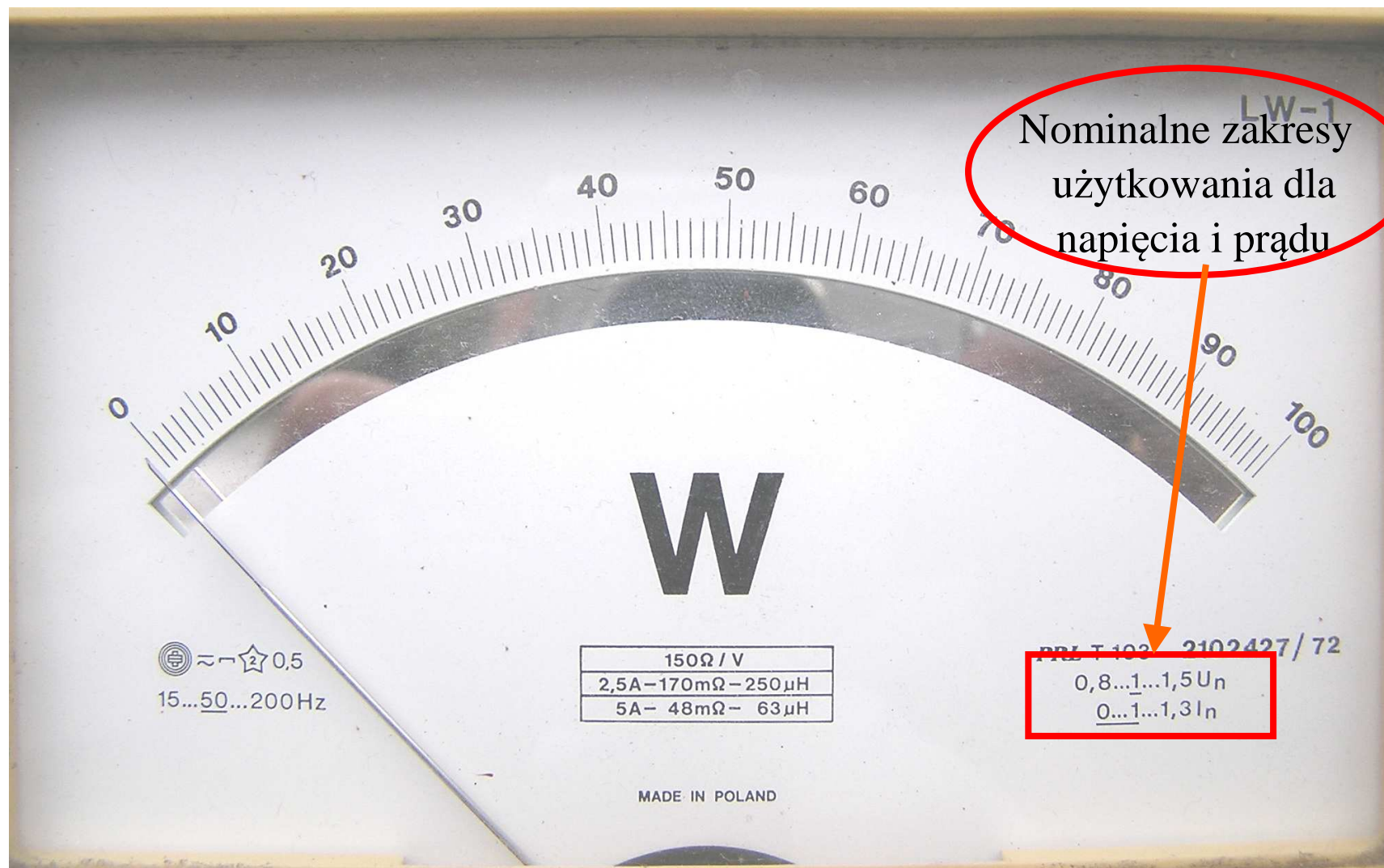
## Watomierz, stała watomierza

$$k_w = \frac{U_{zn} I_{zn} \cos \varphi_{zn}}{\alpha_{zn}} \left[ \frac{\text{W}}{\text{dz.}} \right]$$

$$P = \alpha k_w$$

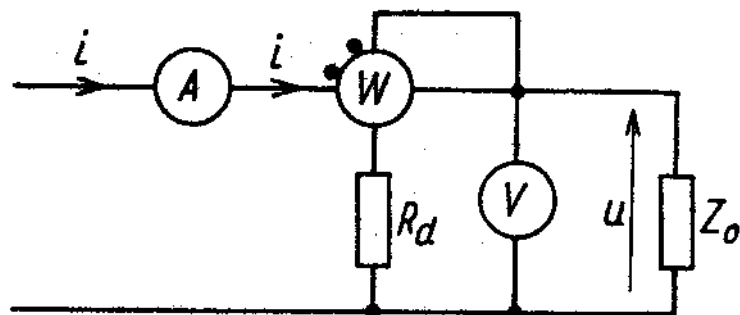
1. Znamionowy  $\cos \varphi_{zn}$  jest oznaczany na watomierzu tylko wtedy, jeśli jest różny od 1
2. Znamionowe napięcie i znamionowy prąd należy dobrać odpowiednio do mierzonych wartości napięcia i prądu
3. Wychylenie  $\alpha$  należy odczytywać z rozdzielczością 1/5 działki

# Watomierz, oznaczenia na podzielni





## Pomiar mocy czynnej, jedna faza, układ bezpośredni

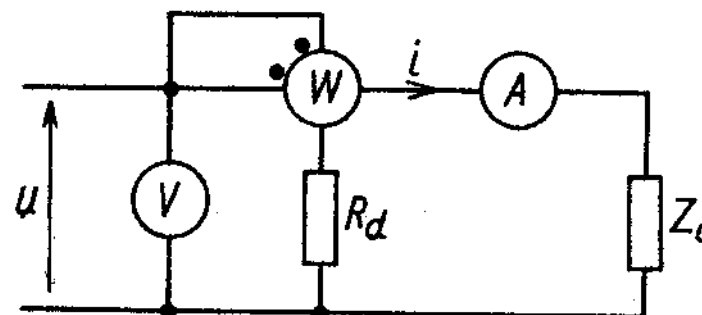


Pomiar przy zadanym napięciu

Układ dla dużych mocy

$$P_o \approx P_W$$

$$\delta P_o = \frac{P_W - P_o}{P_o} = \frac{P_V + P_{WN}}{P_o}$$



Pomiar przy zadanym prądzie

Układ dla małych mocy

$$P_o \approx P_W$$

$$\delta P_o = \frac{P_W - P_o}{P_o} = \frac{P_A + P_{WI}}{P_o}$$

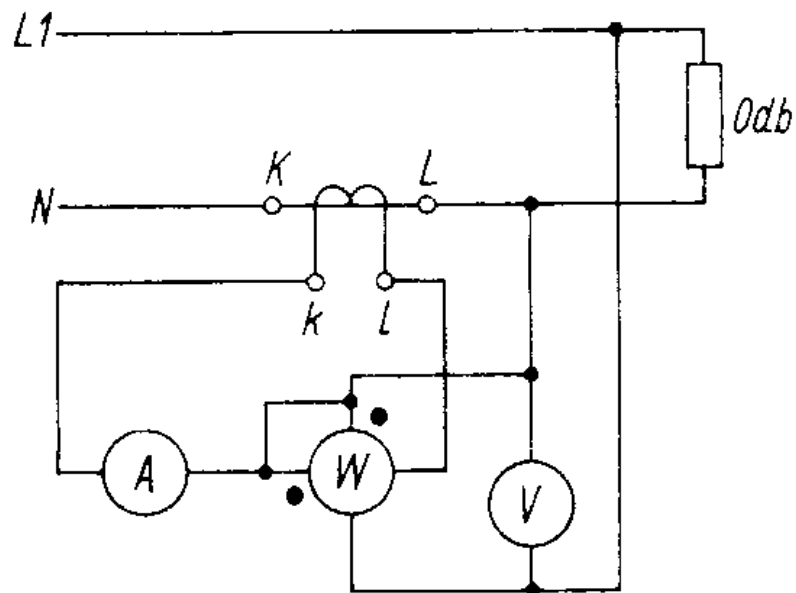
## Pomiar mocy czynnej, zastosowanie przekładników

**Układ półpośredni** z przekładnikiem prądowym stosujemy gdy prąd przekracza zakres prądowy watomierza.

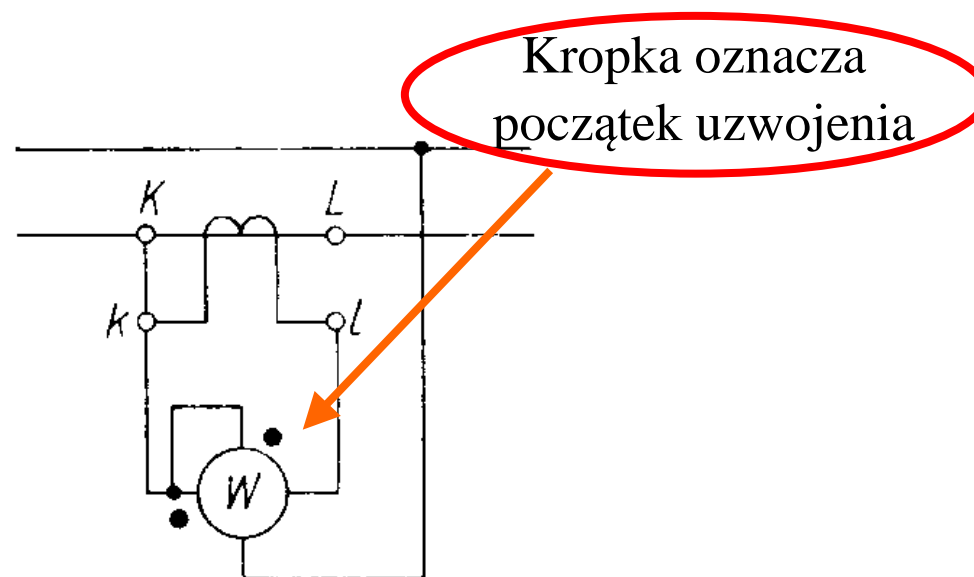
**Układ pośredni** z przekładnikami: napięciowym i prądowym stosujemy gdy napięcie i prąd przekraczają zakresy napięciowy i prądowy watomierza. Jeśli tylko napięcie przekracza zakres napięciowy watomierza, to ze względów bezpieczeństwa również stosujemy zawsze przekładnik prądowy.

**Układ półpośredni** tylko z przekładnikiem napięciowym nigdy w praktyce **nie jest stosowany!** W układzie z wysokim napięciem zawsze stosujemy oba rodzaje przekładników !

## Pomiar mocy czynnej, jedna faza, układ półpośredni



Przykład układu połączeń do pomiaru mocy za pośrednictwem przekładnika prądowego

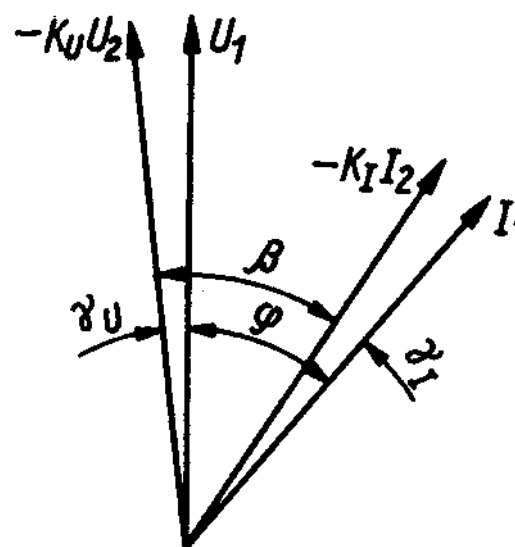
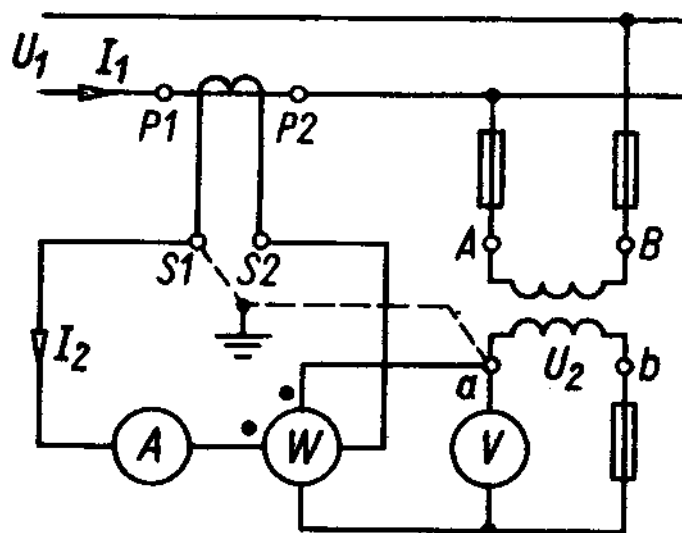


Jeden ze sposobów włączenia watomierza tablicowego za pośrednictwem przekładnika prądowego w obwód niskiego napięcia

$$P = P_W K_{IN}$$

$$\delta = \delta_I + \delta_\varphi$$

## Pomiar mocy czynnej, jedna faza, układ pośredni



$$P = P_W K_{IN} K_{UN}$$

$$\delta = \delta_I + \delta_U + \delta_\varphi$$

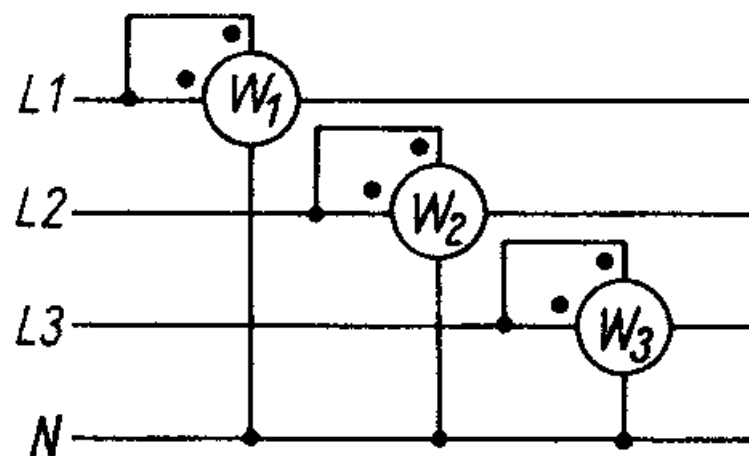
## Układy trójfazowe - problemy

**Punkt zerowy** – układy z dostępnym punktem zerowym (4 – przewodowe) lub z niedostępnym punktem zerowym (3 – przewodowe).

**Symetria odbiornika** – odbiornik symetryczny (możliwy pomiar jednym watomierzem) lub niesymetryczny (konieczny pomiar trzema watomierzami).

**Liczba przewodów** – w sieci 3 – przewodowej można zastosować oszczędny układ z dwoma watomierzami (układ Arona).

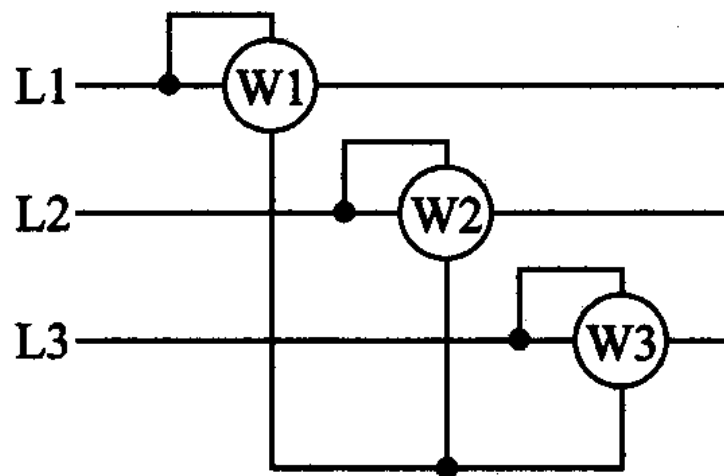
## Pomiar mocy czynnej, trójfazowy, bezpośredni, 3 watomierze



$$P = P_1 + P_2 + P_3 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + U_3 I_3 \cos \varphi_3$$

Pomiar mocy odbiornika **niesymetrycznego** z dostępnym przewodem zerowym

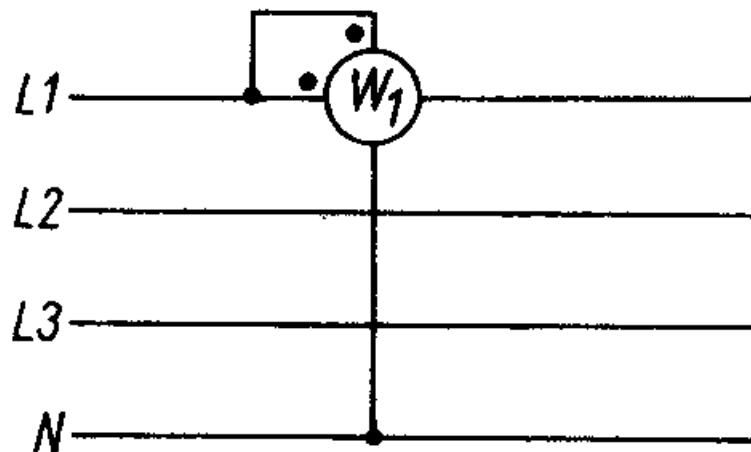
## Pomiar mocy czynnej, trójfazowy, bezpośredni, 3 watomierze



$$P = P_1 + P_2 + P_3 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + U_3 I_3 \cos \varphi_3$$

Pomiar mocy odbiornika **niesymetrycznego** z nie dostępnym przewodem zerowym

## Pomiar mocy czynnej, trójfazowy, bezpośredni, 1 watomierz

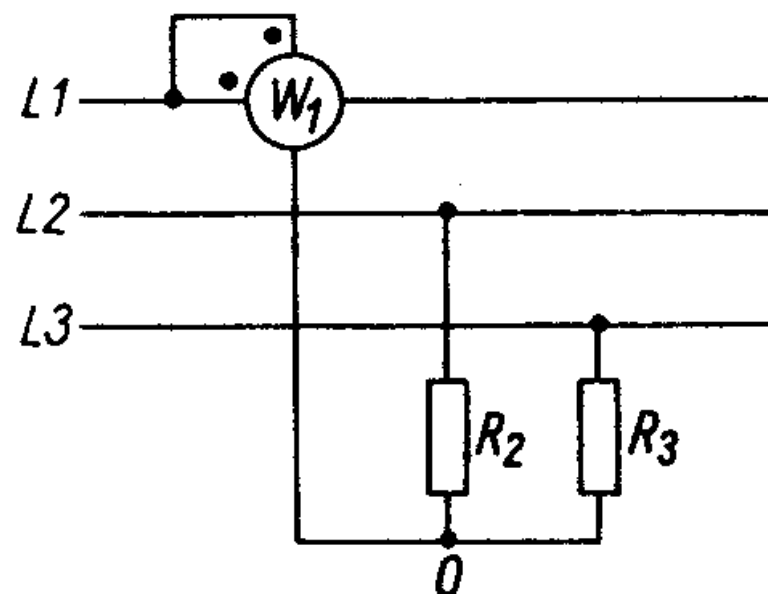


$$P = 3P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

Pomiar mocy odbiornika **symetrycznego** z dostępnym przewodem zerowym



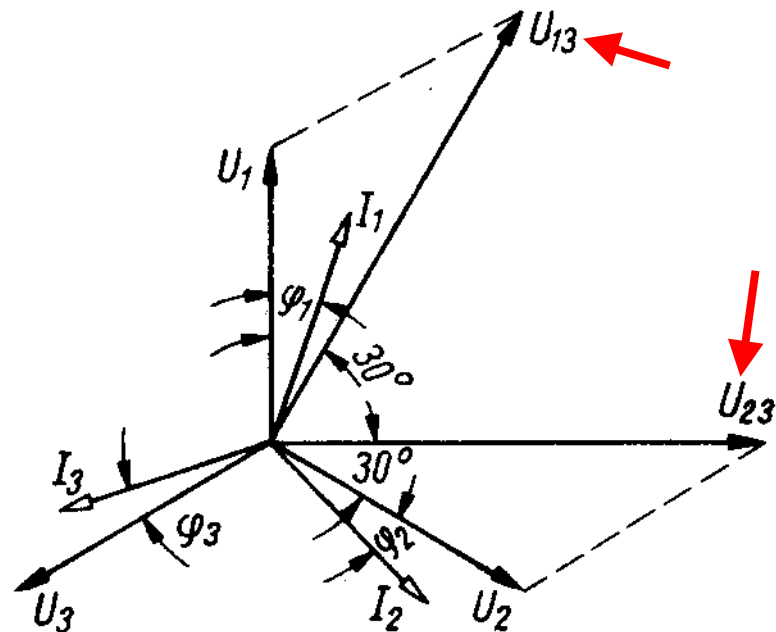
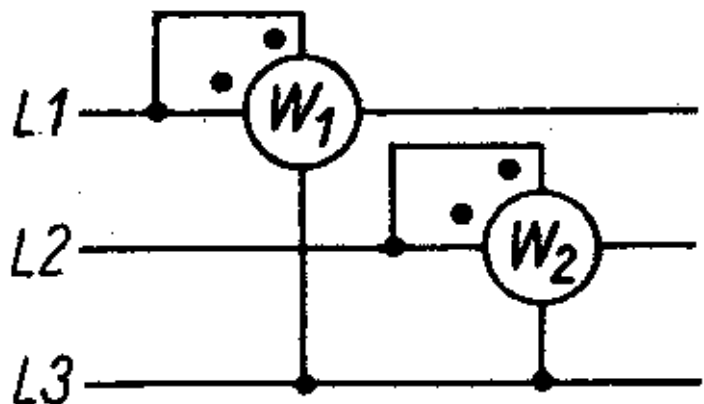
## Pomiar mocy czynnej, trójfazowy, 1 watomierz, sztuczne zero



$$P = 3P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

Pomiar mocy odbiornika **symetrycznego** z niedostępnym przewodem zerowym, układ ze sztucznym zerem

## Pomiar mocy czynnej, trójfazowy, układ Arona

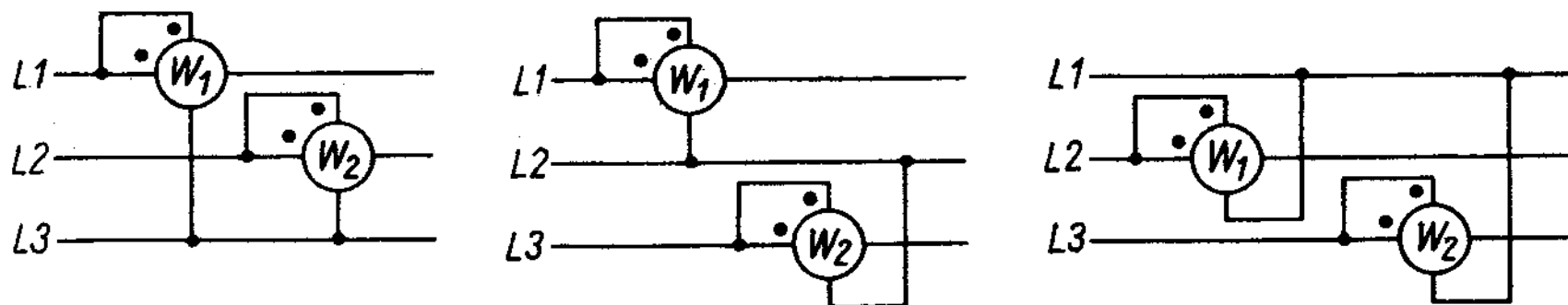


$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \Rightarrow I_3 = -(I_1 + I_2)$$

$$P = P_1 + P_2 = U_{13} I_1 \cos(30^\circ - \varphi_1) + U_{23} I_2 \cos(30^\circ + \varphi_2)$$

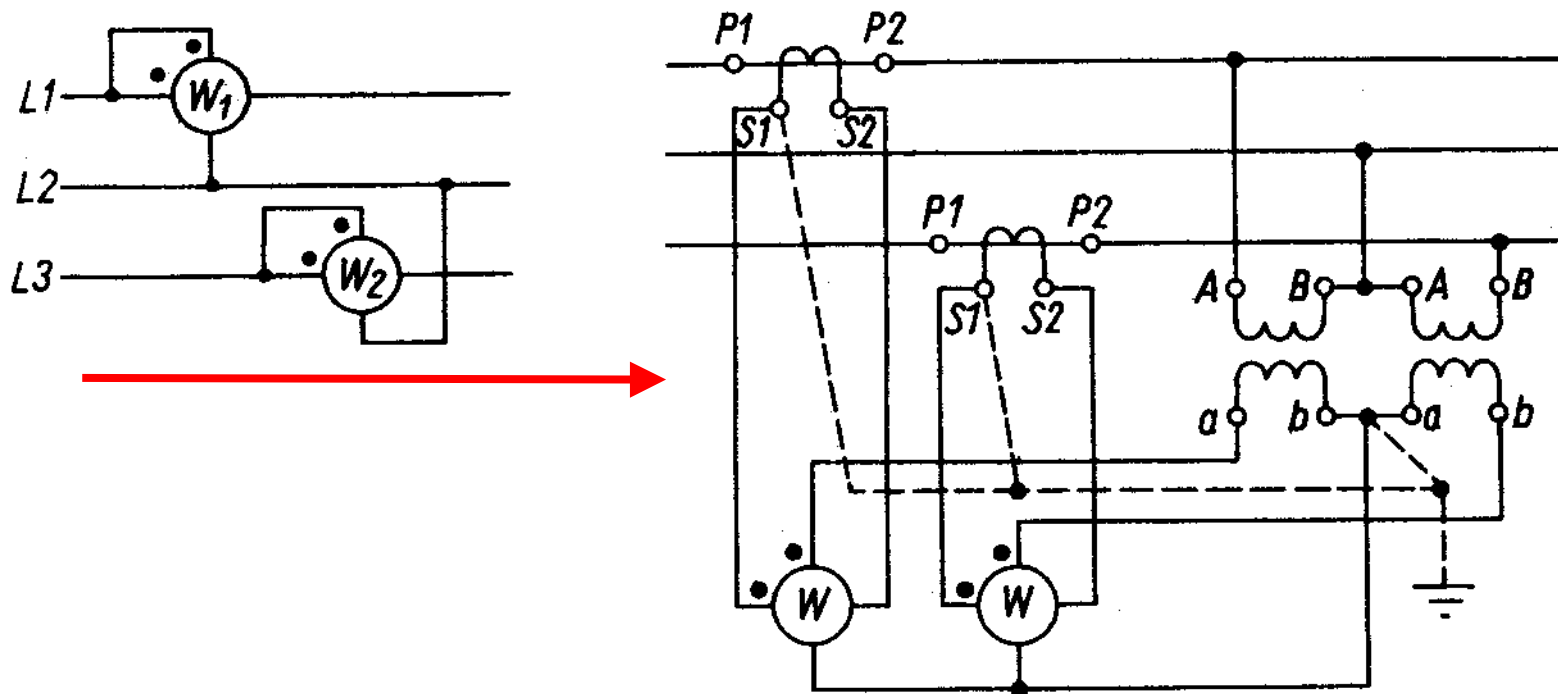
Układ Arona, tylko dla sieci **trójprzewodowych**

## Pomiar mocy czynnej, trójfazowy, układ Arona



3 możliwe konfiguracje układu Arona

# Pomiar mocy czynnej, trójfazowy, układ Arona pośredni



$$P = K_{IN} K_{UN} (P_1 + P_2)$$

# Pomiary mocy czynnej – podsumowanie

## 1. OBWODY NAPIĘCIA STAŁEGO

1.1. Pomiar woltomierzem i amperomierzem (metoda techniczna)

1.2. Pomiar watomierzem elektrodynamicznym (nie ferrodynamicznym !)

## 2. OBWODY NAPIĘCIA PRZEMIENNEGO

2.1. Układy jednofazowe (jeden watomierz elektro- lub ferrodynamiczny)

2.1.1. Układy bezpośrednie (bez przekładników)

2.1.2. Układy półpośrednie (z przekładnikiem prądowym)

2.1.3. Układy pośrednie (z przekładnikiem prądowym i napięciowym)

2.2. Układy trójfazowe

2.2.1. Układy bezpośrednie

2.2.1.1. Z odbiornikiem symetrycznym (jeden watomierz)

2.2.1.1.1. W sieci 4-przewodowej

2.2.1.1.2. W sieci 3-przewodowej

2.2.1.1.2.1. Z dostępnym punktem zerowym odbiornika

2.2.1.1.2.2. Z niedostępnym punktem zerowym odbiornika (sztuczne zero)

2.2.1.2. Z odbiornikiem niesymetrycznym

2.2.1.2.1. W sieci 4-przewodowej (3 watomierze)

2.2.1.2.2. W sieci 3-przewodowej (2 watomierze w układzie Arona)

2.2.2. Układy półpośrednie (wszystkie podpunkty 2.2.1. )

2.2.3. Układy pośrednie (wszystkie podpunkty 2.2.1. )

## Pomiary mocy czynnej – dodatkowe uwagi

1. Układy pośrednie stosowane są w sieciach wysokiego napięcia, w których zazwyczaj nie stosuje się przewodu zerowego, a odbiorniki często są symetryczne. Nie wszystkie możliwości układowe są więc w praktyce jednakowo często wykorzystywane.
2. Układy przeznaczone dla odbiorników niesymetrycznych mogą być stosowane również do pomiarów mocy odbiorników symetrycznych.
3. Przekładniki rozszerzają zakresy mierników oraz zapewniają **izolację galwaniczną** w obwodach wysokiego napięcia.
4. **Nie stosuje się układów** tylko z samym przekładnikiem napięciowym !!! Przy układach wysokiego napięcia ze względów bezpieczeństwa oraz ograniczonej wytrzymałości izolacji przyrządów **zawsze stosuje się również przekładniki prądowe**, nawet jeśli wartość prądu jest mała i możliwa do bezpośredniego pomiaru.

# Pomiary mocy czynnej – zestawienie wzorów

## Pomiar woltomierzem i amperomierzem (metoda techniczna)

Obwody napięcia stałego  $P_o = U \cdot I$

Obwody napięcia przemiennego (pomiar mocy pozornej)  $S_o = U \cdot I$

## Układy jednofazowe (jeden watomierz elektro- lub ferrodynamiczny)

Układy bezpośrednie (bez przekładników)  $P_o = P_w$

Układy półpośrednie (z przekładnikiem prądowym)  $P_o = k_{In} P_w$

Układy pośrednie (z przekładnikiem prądowym i napięciowym)  $P_o = k_{In} k_{Un} P_w$

## Układy trójfazowe – moc czynna odbiornika $P_o$

Układy bezpośrednie, odbiornik symetryczny, jeden watomierz  $P_o = 3 P_w$

Układy bezpośrednie, odbiornik niesymetryczny, 3 watomierze  $P_o = P_{w1} + P_{w2} + P_{w3}$

Układy bezpośrednie, odbiornik niesymetryczny, 2 watomierze  $P_o = P_{w1} + P_{w2}$

Układy półpośrednie (z przekładnikiem prądowym)  $P_o = k_{In} \sum P_w$

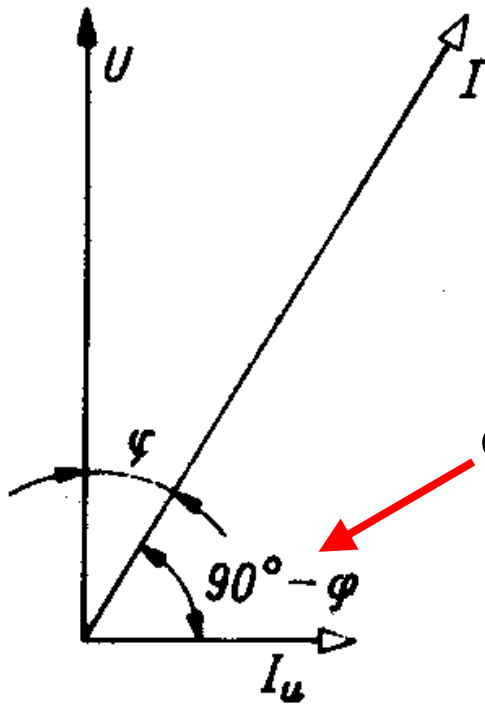
Układy pośrednie (z przekładnikiem prądowym i napięciowym)  $P_o = k_{In} k_{Un} \sum P_w$

## Pomiar mocy biernej – uwagi wstępne

- 1. Do pomiaru mocy biernej stosuje się ustroje elektrodynamicznego lub ferrodynamiczne włączone w układ pomiarowy tak, aby faza prądu w cewce napięciowej była przesunięta o kąt  $90^\circ$  względem napięcia wykorzystywanego przy pomiarze mocy czynnej.**
- 2. Do pomiaru mocy biernej w układach 1-fazowych stosuje się waromierze zbudowane na bazie ustroju elektrodynamicznego i układu LC przesuwanego fazę prądu w obwodzie napięciowym (układ Hummla).**
- 3. Do pomiaru mocy biernej w układach 3-fazowych stosuje się układy watomierzy z odpowiednio przełączonymi obwodami napięciowymi. Dla uzyskania wymaganego przesunięcia fazowego wykorzystuje się przesunięcie  $90^\circ$  pomiędzy odpowiednimi napięciami fazowymi i przewodowymi. Wynik pomiaru należy skorygować odpowiednio o stosunek wartości skutecznych napięć przewodowych i fazowych, tzn. o  $\sqrt{3}$**



# Pomiar mocy biernej – podstawowe zasady



$$P = UI \cos \varphi$$

$$Q = UI \sin \varphi$$

$$\cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha$$

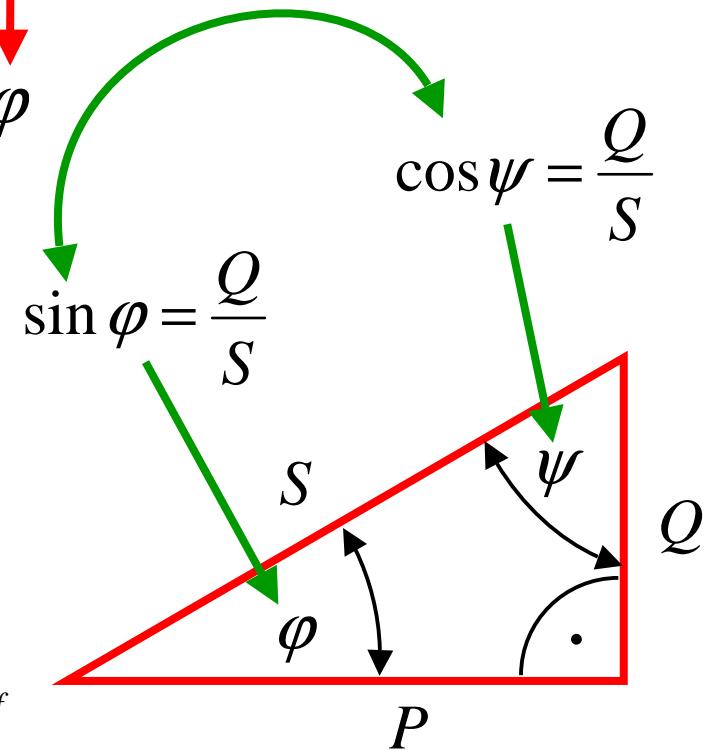
$$\cos \psi = \cos(90^\circ - \varphi) = \sin \varphi$$

$$\psi = 90^\circ - \varphi$$

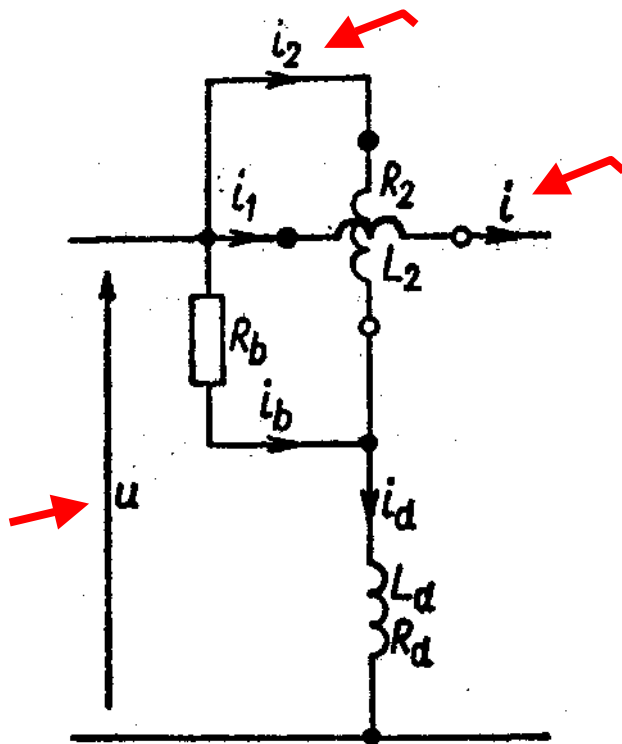
$$P_w = UI \cos \psi = UI \sin \varphi$$

$$Q_o = P_w$$

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = \sqrt{3} U_f$$

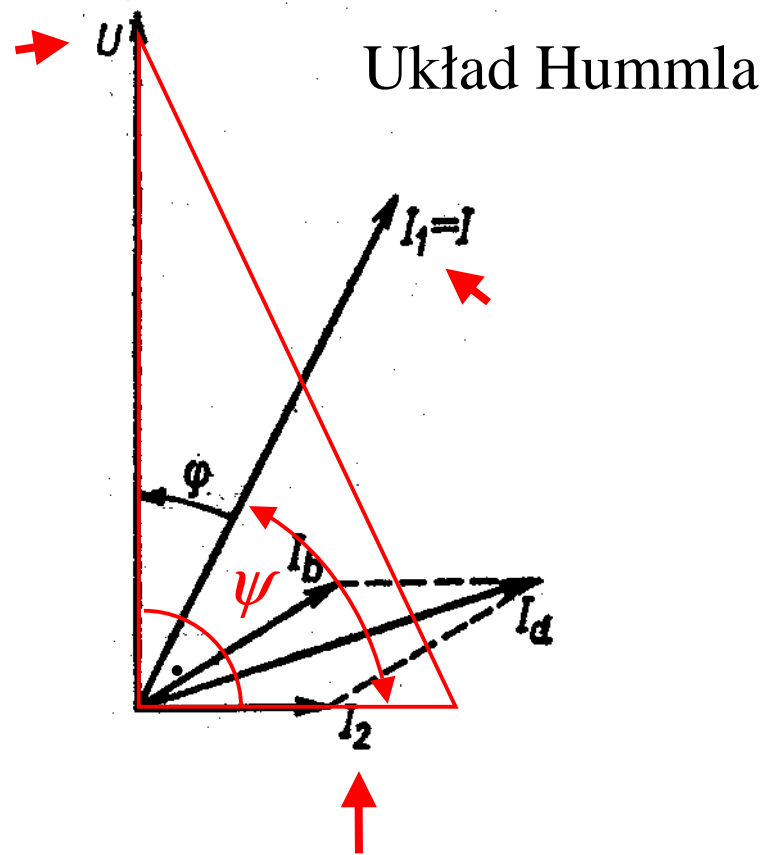


# Pomiar mocy biernej w układzie jednofazowym



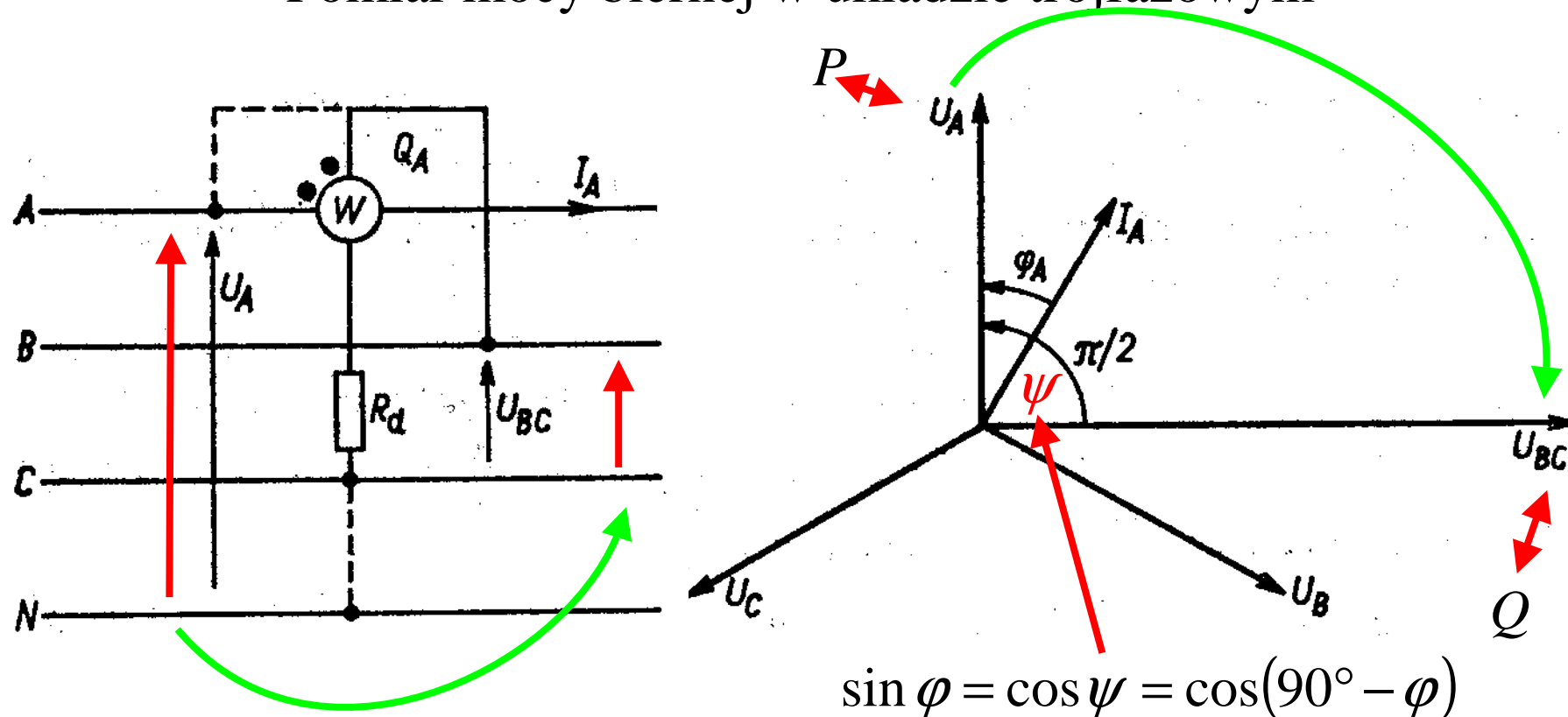
$$P = UI \cos \varphi$$

$$Q = UI \sin \varphi$$



$$\sin \varphi = \cos(90^\circ - \varphi)$$

## Pomiar mocy biernej w układzie trójfazowym



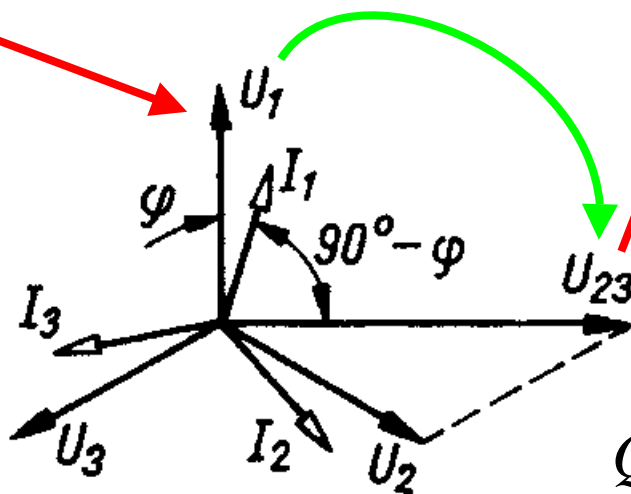
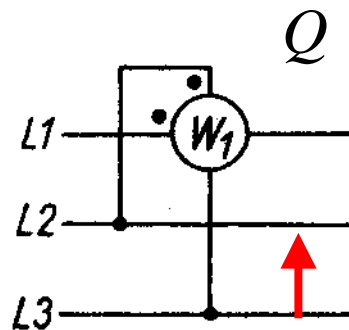
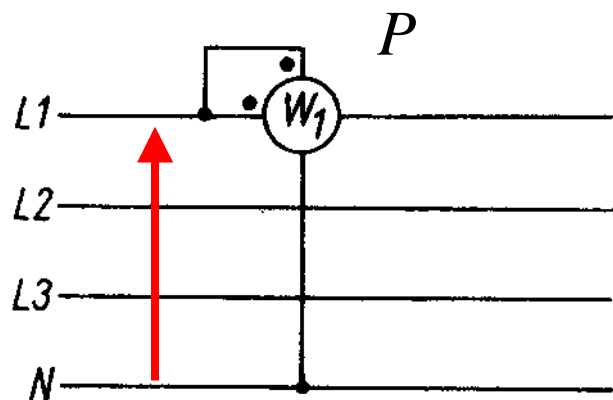
$$Q = 3Q_1 = \frac{3P_W}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}P_W$$

$$\sin \varphi = \cos \psi = \cos(90^\circ - \varphi)$$

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = \sqrt{3} U_f$$

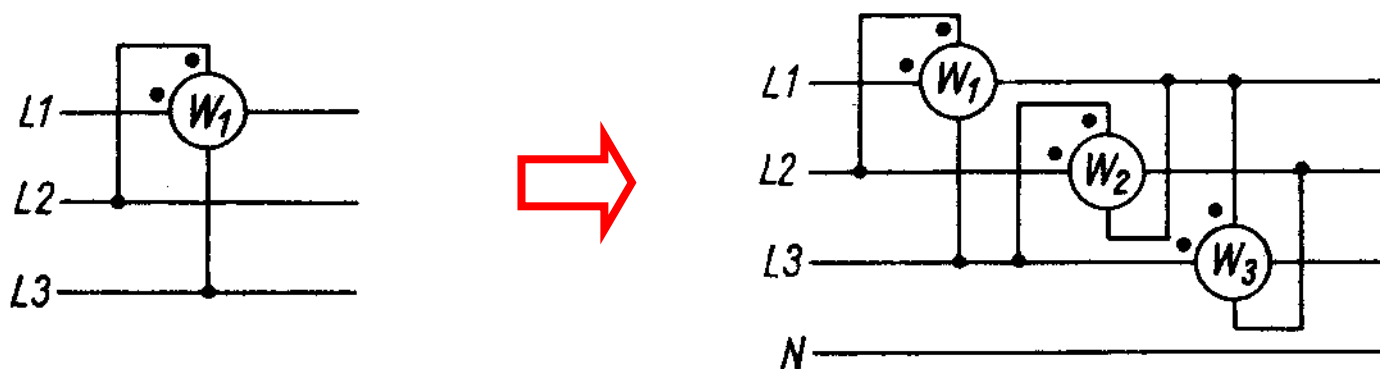
Należy opóźnić napięcie na watomierzu o  $90^\circ$  w stosunku do napięcia wykorzystywanego do pomiaru mocy czynnej

# Pomiar mocy biernej, trójfazowy, układ bezpośredni



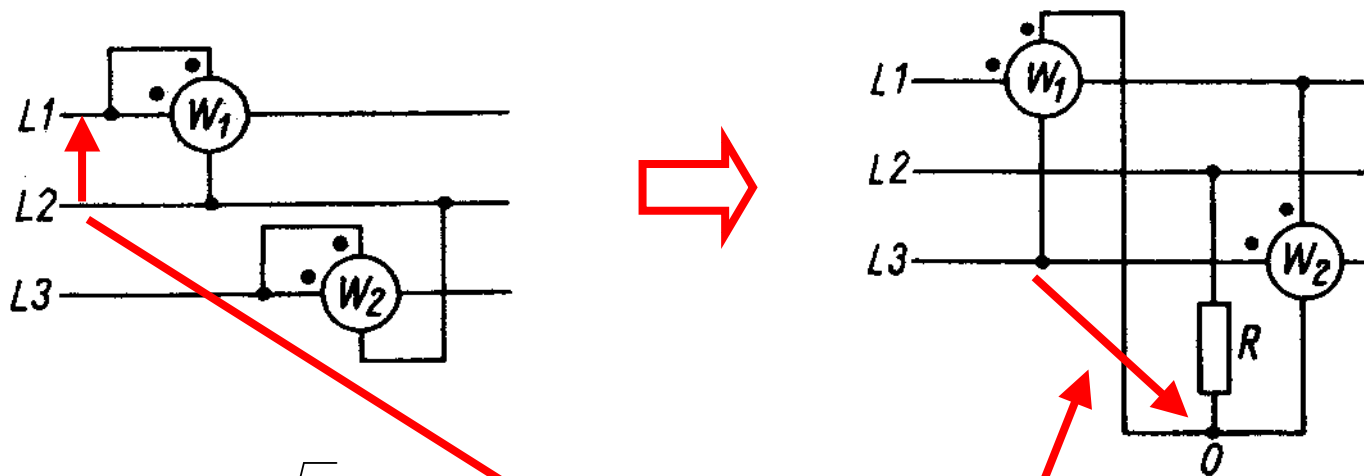
$$Q = 3Q_1 = \frac{3P_W}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}P_W$$

## Pomiar mocy biernej, trójfazowy, 3 watomierze



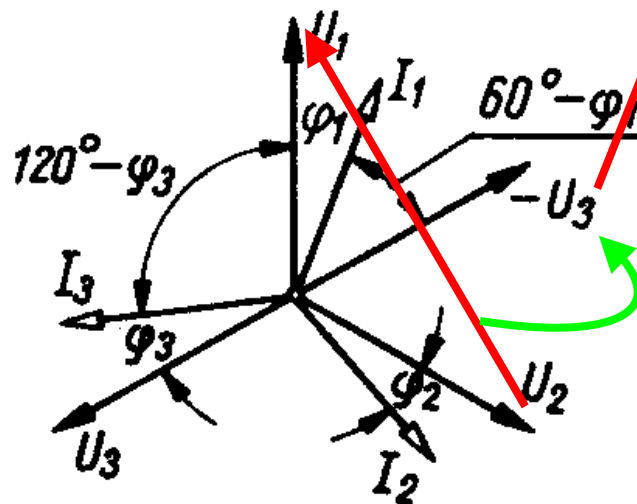
$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\sqrt{3}}$$

# Pomiar mocy biernej, trójfazowy, układ Arona



$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = \sqrt{3} U_f$$

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



## Pomiar mocy biernej w układach 3f - podsumowanie

Układy bezpośrednie, odbiornik symetryczny, jeden watomierz

$$Q_o = \sqrt{3} P_w$$

Układy bezpośrednie, odbiornik niesymetryczny, 3 watomierze

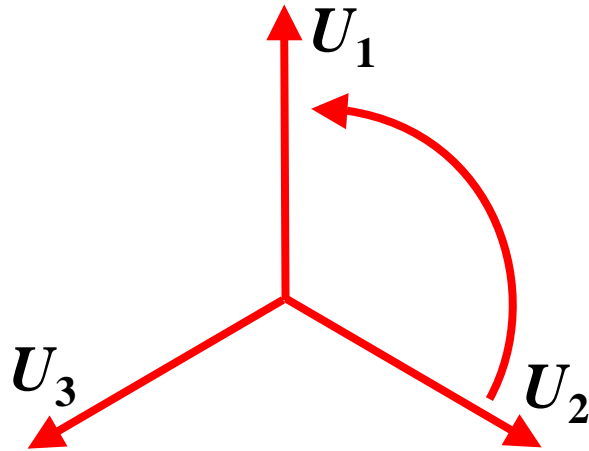
$$Q_o = \frac{P_{w1} + P_{w2} + P_{w3}}{\sqrt{3}}$$

Układy bezpośrednie, odbiornik niesymetryczny, 2 watomierze

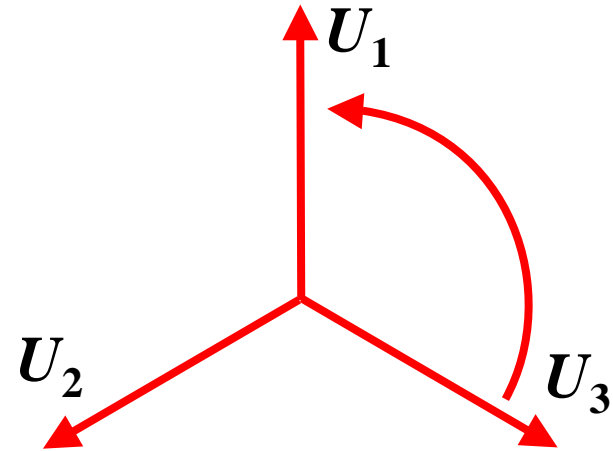
$$Q_o = \sqrt{3} (P_{w1} + P_{w2})$$

## Kolejność faz zgodna i przeciwna

Kolejność zgodna



Kolejność przeciwna



Kolejność oznaczenia faz 1-2-3  
**jest zgodna** z kolejnością  
wirowania wektorów napięć

$U_1 U_2 U_3$

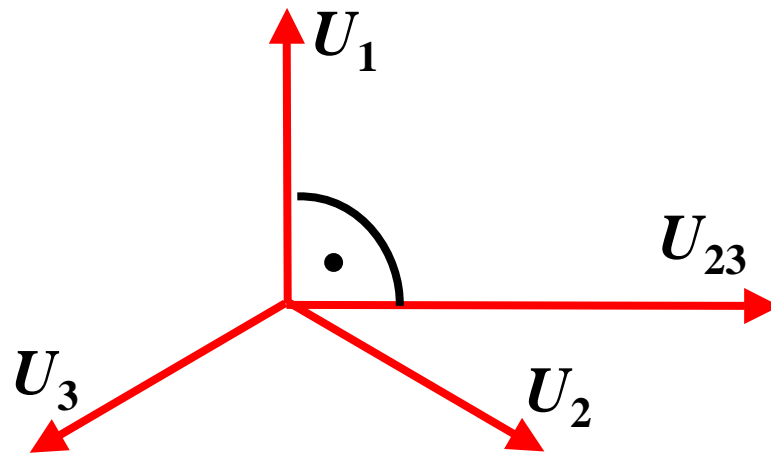
Kolejność oznaczenia faz 1-2-3  
**jest przeciwna** do kolejności  
wirowania wektorów napięć

$U_1 U_3 U_2$

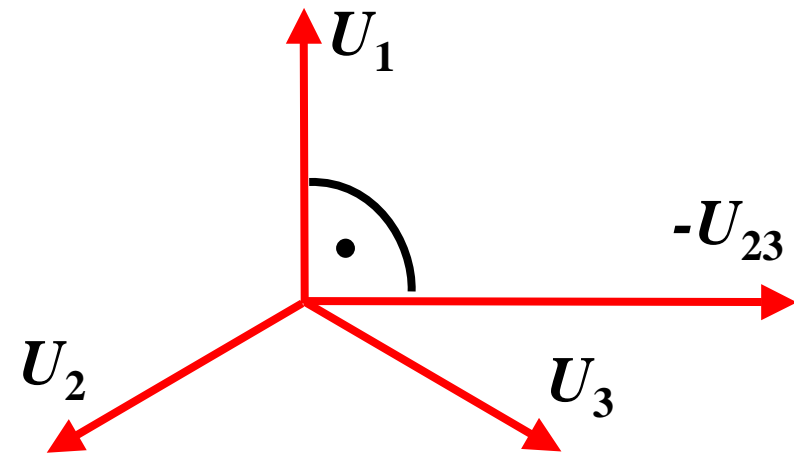


## Moc bierna przy kolejności faz zgodnej i przeciwnej

Kolejność zgodna



Kolejność przeciwna



Wszystkie wcześniejsze wykresy wskazowe oraz wzory na moc bierną były przedstawione dla kolejności faz zgodnej.

Jeśli w miejscu pomiaru mocy biernej występuje kolejność faz przeciwna, to znak wskazania watomierza będzie przeciwny.

## Pomiar mocy biernej przy kolejności faz przeciwnej

Jeśli w miejscu pomiaru mocy biernej występuje kolejność faz **przeciwna** to należy pamiętać, że:

- nie wolno zmieniać kolejności podłączenia przewodów zasilających, gdyż może to spowodować awarię maszyn zasilanych z tej sieci,
- podczas pomiarów należy uwzględnić fakt, że **znak** wskazania watomierza będzie **przeciwny**, w stosunku do pomiaru mocy biernej przy kolejności faz zgodnej
- **dodatnie** wskazanie mocy na watomierzu będzie oznaczało **ujemną** moc bierną odbiornika (pojemnościowego),
- **ujemne** wskazanie mocy na watomierzu będzie oznaczało **dodatnią** moc bierną odbiornika (indukcyjnościowego).

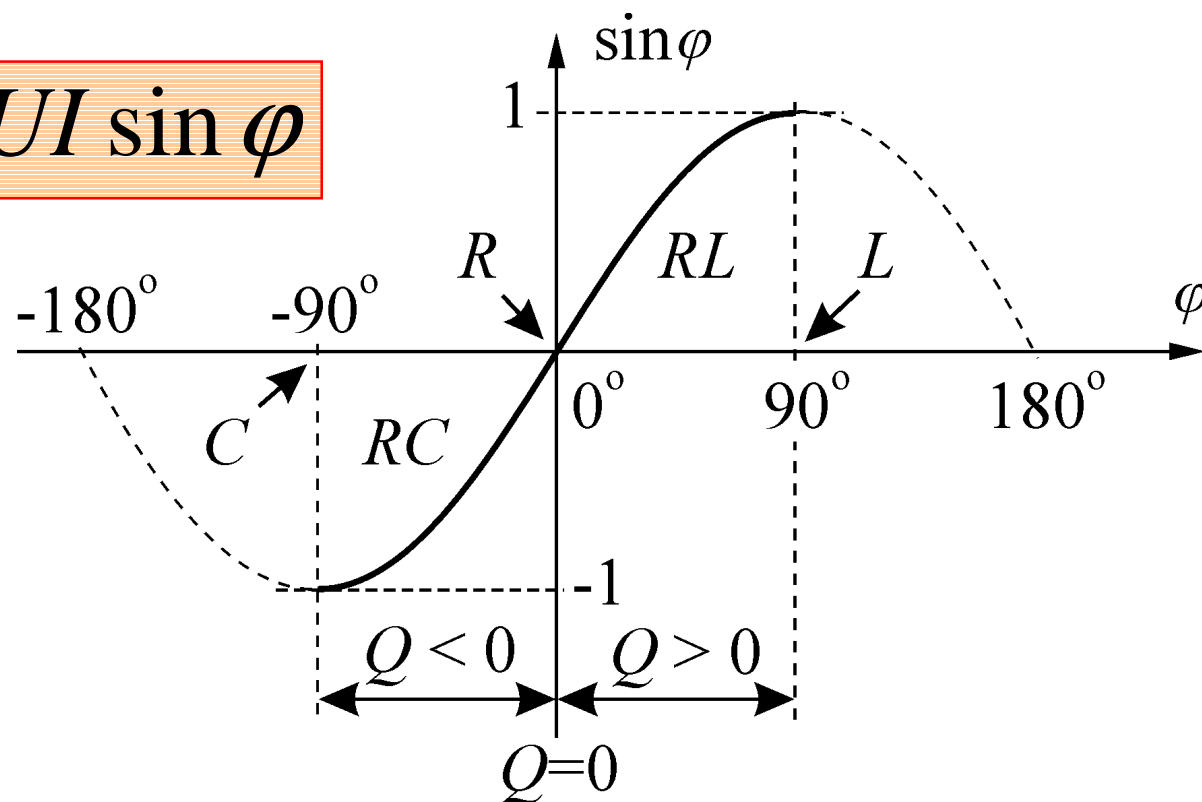
## Odczyt ujemnego wskazania watomierza

Aby odczytać ujemne wskazanie watomierza:

- nie wolno zmieniać kolejności podłączenia przewodów zasilających, gdyż może to spowodować awarię maszyn zasilanych z tej sieci,
- należy zamienić kolejność przewodów na zaciskach napięciowych watomierza, niektóre typy watomierzy mają w tym celu zainstalowany odpowiedni przełącznik,
- nie należy zamieniać kolejności przewodów na zaciskach prądowych watomierza, gdyż może to być niebezpieczne, szczególnie przy dużych prądach obciążenia,
- ujemne wskazanie watomierza przy pomiarze mocy biernej może wystąpić również przy kolejności faz zgodnej, wtedy oznacza to ujemną moc bierną, czyli odbiornik pojemnościowy.

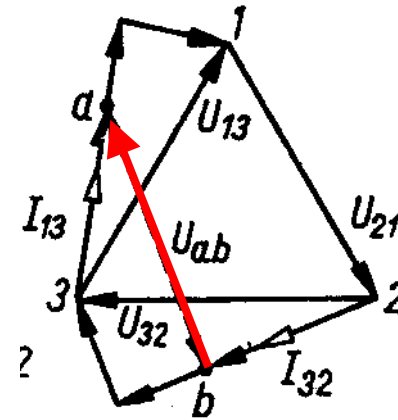
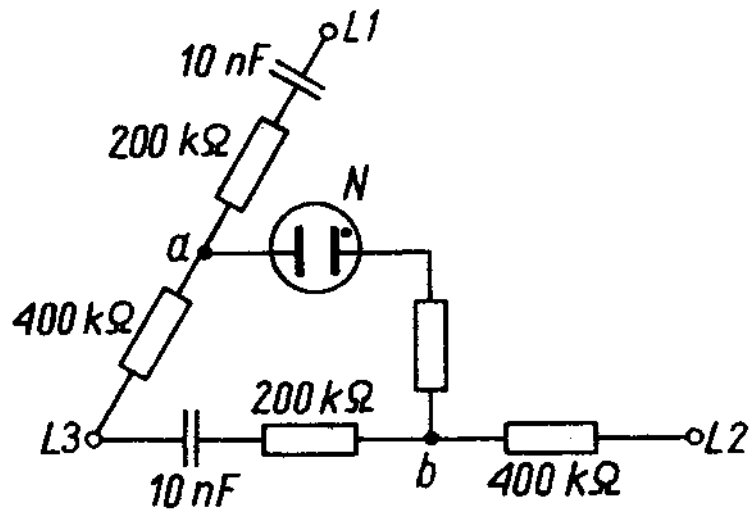
Ujemne wskazania watomierza przy pomiarze mocy biernej

$$Q = UI \sin \varphi$$



Ujemne wskazanie watomierza przy pomiarze mocy biernej  $Q$  przy kolejności faz zgodnej oznacza ujemną moc bierną  $Q$ , czyli **odbiornik pojemnościowy  $C$**

## Pomiar mocy biernej, wskaźnik kolejności faz

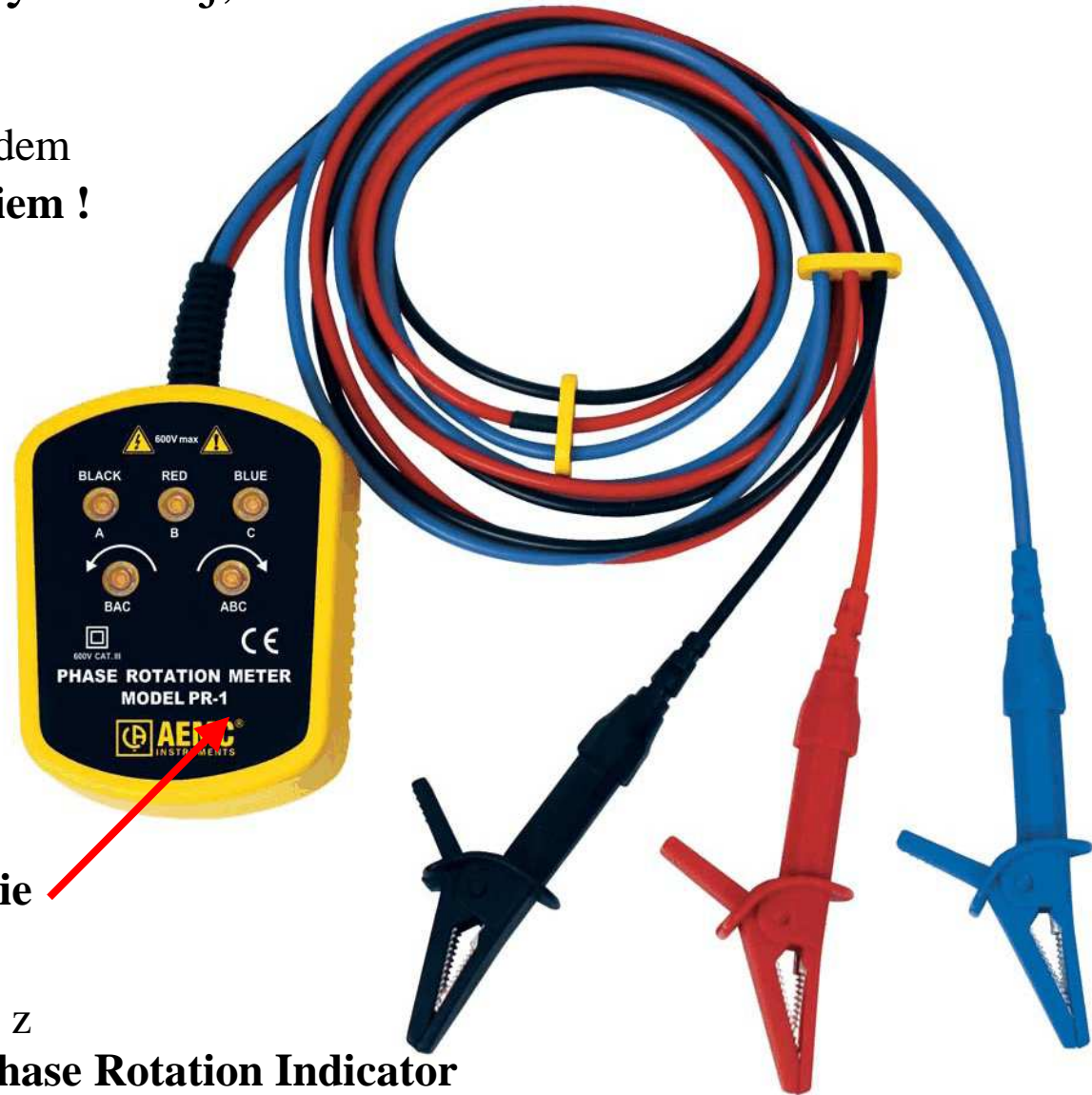


Pomiar mocy biernej wymaga sprawdzenia kolejności faz.

W tym celu stosuje się wskaźniki kolejności faz.

## Pomiar mocy biernej, Phase Rotation Indicator

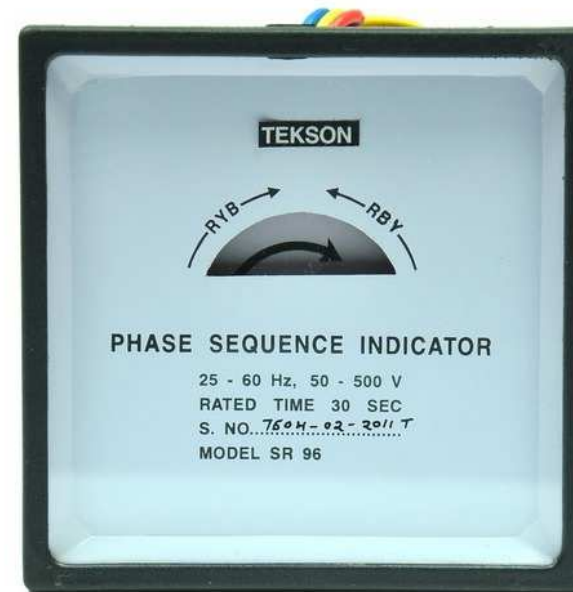
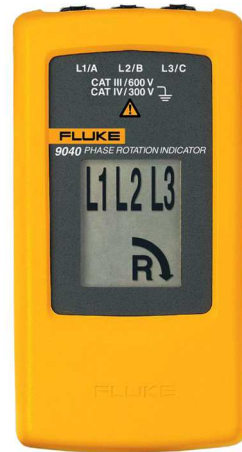
Należy pamiętać, że **wskaźnik** kolejności faz **nie jest** przyrządem pomiarowym, tylko **wskaźnikiem** !  
(wykłady z poprzedniego semestru o przyrządach pomiarowych, detektorach, czujkach i wskaźnikach).



Tutaj producent **niepoprawnie** nazwał wskaźnik miernikiem !

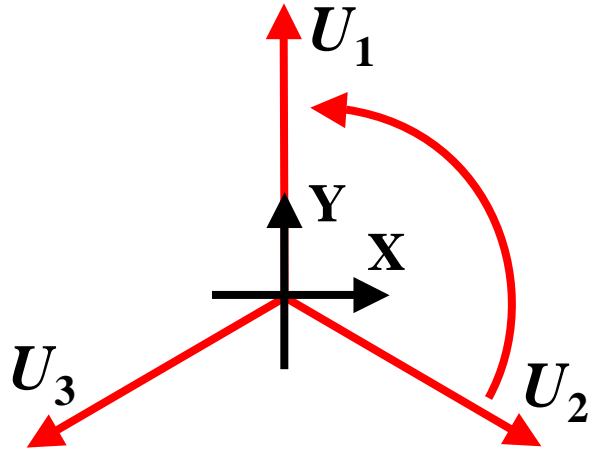
Zapewne nie chodził na wykłady z metrologii ! Poprawna nazwa: **Phase Rotation Indicator**

# Wskaźniki kolejności faz – różne wykonania



## Phase Rotation Indicator – kierunki wirowania

### Kolejność zgodna



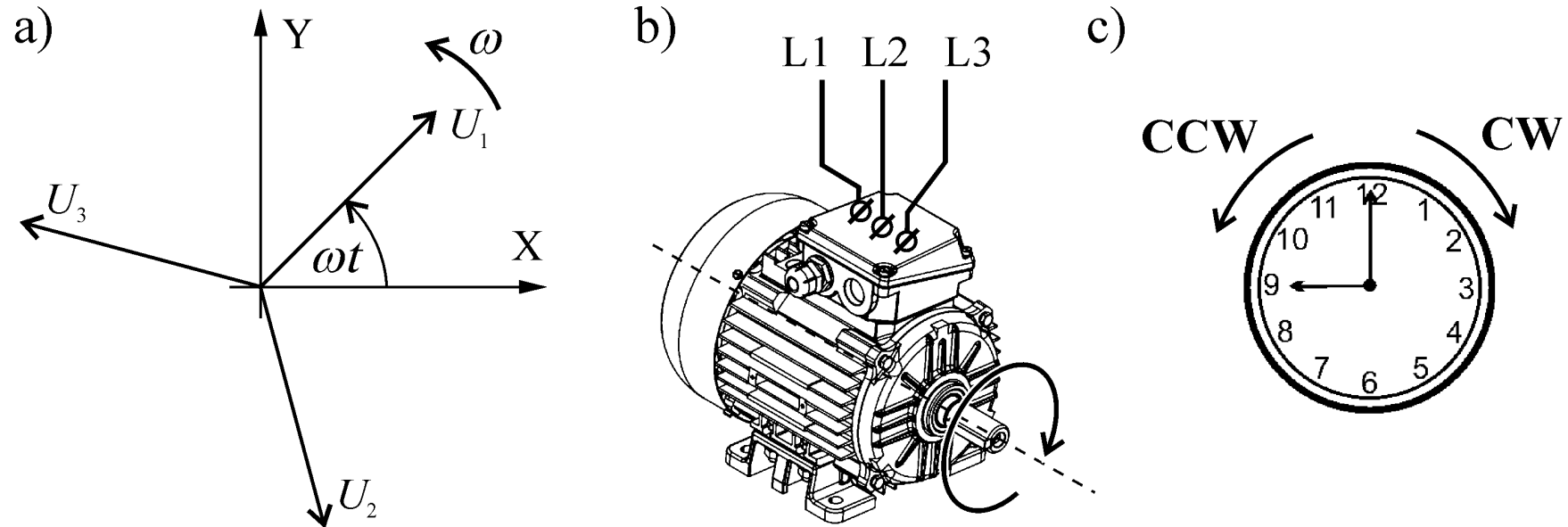
W sieci trójfazowej wektory napięć wirują w kierunku przeciwnym do ruch wskazówek zegara (czyli **w lewo**), ale silnik dołączony poprawnie do sieci o zgodnej kolejności faz, wiruje **w prawo** !

To dlatego, że w kartezjańskim układzie współrzędnych X-Y przyjęto zasadę, że kąt dodatni jest mierzony w kierunku od osi X do osi Y, czyli przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Natomiast wskazówki zegara poruszają się zgodnie z kierunkiem ruchu Słońca na nieboskłonie (na półkuli północnej).





## Phase Rotation Indicator – kierunki wirowania



W sieci trójfazowej przy zgodnej kolejności faz wektory napięć wirują w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara (czyli **w lewo** - rys. a), ale silnik dołączony poprawnie do sieci o zgodnej kolejności faz, wiruje **w prawo** (rys. b), co bywa oznaczane symbolem **CW** (*ClockWise*, zgodnie z ruchem wskazówek zegara - rys. c). Symbol **CCW** (*Counter-ClockWise*) oznacza wirowanie w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.

## Podsumowanie

1. Mierniki EM mogą mieć rozszerzane zakresy za pomocą przekładników prądowych i napięciowych
2. Rozwarcie strony wtórnej przekładnika prądowego grozi jego uszkodzeniem. Zwarcie strony wtórnej przekładnika oznacza jego stan jałowy
3. Przekładniki napięciowe posiadają właściwości zbliżone do transformatorów energetycznych
4. Do pomiaru mocy czynnej można zastosować ustroje realizujące mnożenie sygnałów: elektrodynamiczne i ferrodynamiczne.
5. Do pomiaru mocy biernej można zastosować watomierz odpowiednio włączając jego obwód napięciowy

