



Studia Podyplomowe

# EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ

w ramach projektu

**Śląsko-Małopolskie Centrum Kompetencji  
Zarządzania Energią**



**Ocena poprawności pomiarów, wpływ zakłóceń  
i środowiska na niepewność pomiaru, możliwości  
celowego wpływu na wyniki pomiarów**

**dr inż. Dariusz Borkowski**

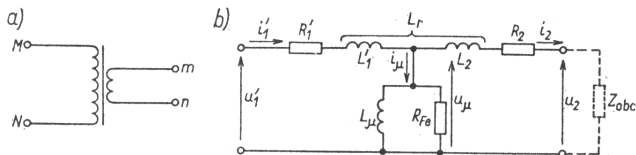
- 1 Błędy w pomiarach przekładnikami napięcia**
- 2 Błędy w pomiarach przekładnikami prądu
- 3 Inne rodzaje przetworników prądu i napięcia
- 4 Błędy w pomiarach mocy i energii

Producent podaje:

- napięcie pierwotne  $U_1$   
z typoszeregu
- napięcie wtórne  $U_2$   
zazwyczaj 100 V dla układów 1-fazowych i  $\frac{100}{\sqrt{3}}$  V dla układów 3-fazowych
- moc obciążenia  $S$
- klasę dokładności przekładnika

## Błędy w pomiarach przekładnikami napięcia

### Model przekładnika i błędy transformacji



Schemat zastępczy przekładnika napięciowego (źródło [1]).

Z transformacją napięcia wiążą się 2 rodzaje błędów:

- błąd amplitudowy  $\Delta U = \frac{\vartheta_n U_2 - U_1}{U_1} 100\%$   
przekładnia faktyczna różna od znamionowej
- błąd kątowy  $\delta_u = \arg(\underline{U}_2) - \arg(\underline{U}'_1)$   
przesunięcie fazowe między napięciami strony pierwotnej i wtórnej

Błędy transformacji wynikają z:

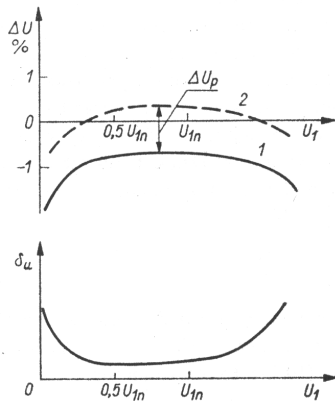
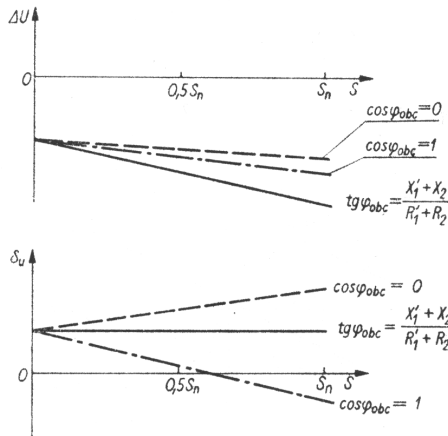
- konstrukcji przekładnika (kompromis między jakością i ceną)
- warunków pracy (elektrycznych, środowiskowych)
- interakcji z innymi elementami systemu (np. rezonansów)

Wartości błędów liczbowo zależą od:

- modułu i argumentu impedancji obciążenia  $\underline{Z}_{obc}$   
a w przybliżeniu od mocy obciążenia  $S = \frac{U_{2n}^2}{Z_{obc}}$
- wartości napięcia pierwotnego  $U_1$   
napięcie  $U_1 \Rightarrow$  indukcja B  $\Rightarrow$  parametry gałęzi poprzecznej  $R_{Fe}, X_{\mu}$
- częstotliwości  
indukcyjność przekładnika  $\Rightarrow$  tłumienie i przesunięcie fazowe rośnie z częstotliwością, chyba że wystąpi rezonans, wtedy może być różnie

# Błędy w pomiarach przekładnikami napięcia

## Krzywe błędów



Błędy transformacji napięcia (źródło [1]).

Na podstawie klasy przekładnika możemy z norm lub rozporządzeń odczytać **wartości graniczne błędów**:

- $\Delta V_{max}$  — błąd amplitudowy w procentach  
graniczny błąd amplitudowy w procentach jest równy klasie
- $\delta_{i,max}$  — błąd kątowy w minutach lub w centyradianach  
1 minuta = 1/60 stopnia

Faktyczne wartości błędów są nieznane, gdyż mogą się zmieniać  
powinny znajdować się w przedziałach  $\pm \Delta V_{max}$  i  $\pm \delta_{i,max}$ , jeśli ile spełnione są  
wymagania dotyczące warunków pracy przekładnika

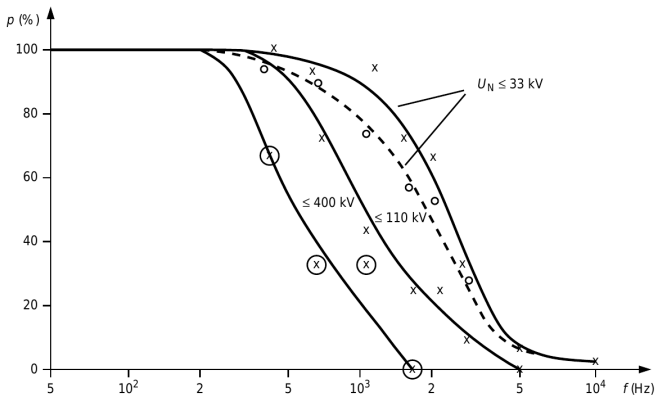
Błędy graniczne podawane są dla wąskiego zakresu częstotliwości  
zazwyczaj 45 Hz do 65 Hz, poza tym zakresem własności przekładnika są nieznane

- w typowych przekładnikach indukcyjnych indukcyjność uzwojeń tłumi wyższe harmoniczne
- tłumienie harmoniczných rośnie wraz ze wzrostem napięcia pierwotnego
- w przekładnikach pojemnościowych lub kaskadowych (pojemnościowo-indukcyjnych) mogą wystąpić rezonanse na elementach przekładnika lub między przekładnikiem i siecią energetyczną, co w efekcie niektóre harmoniczne tłumi, a inne wzmacnia



# Błędy w pomiarach przekładnikami napięcia

## Pasma częstotliwościowe przekładników a napięcie pierwotne



Procent badanych przekładników o  $U_1 < 400$  lub  $110$  lub  $33$  kV przenoszących określone częstotliwości z błędem mniejszym niż  $5\%$  (ciągła),  $5^\circ$  (przerywana).  
 Pobrane z PN-IEC 61000-4-7.

Transmisja napięcia wtórnego na poziomie 100 V lub  $\frac{100}{\sqrt{3}}$  V jest dosyć odporna na zakłócenia, ale:

- przy transmisji na znaczną odległość wystąpi spadek napięcia na kablu transmisyjnym
- wyższe harmoniczne napięcia mają małe amplitudy, a więc są wrażliwe do zakłócenia

- naturalne czyli związane z konstrukcją przekładnika  
zwiększanie  $X_\mu$  i  $R_{Fe}$ , zmniejszanie  $R$  uzwojeń i  $X$  rozproszenia
- poprawka zwojowa czyli korekta przekładni  
z poprawką zwojową przekładnia  $\vartheta_n \neq \vartheta_z = \frac{w_1}{w_2}$
- dołączanie elementów kompensujących do obciążenia  
kondensator szeregowo lub równoległe z uzwojeniem wtórnym
- odpowiedni dobór mocy i rodzaju obciążenia  
z zakresu  $0,5S_n \div 1S_n$ ,  $\cos(\varphi) = 0,8$  ind.
- odpowiedni dobór kabli transmisyjnych  
kable krótkie, o małej indukcyjności, skrętka ekranowana

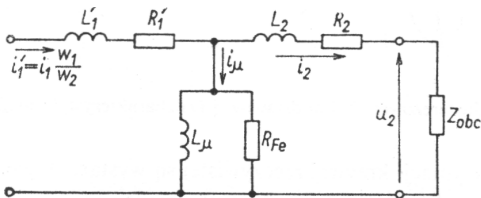
- 1 Błędy w pomiarach przekładnikami napięcia
- 2 Błędy w pomiarach przekładnikami prądu**
- 3 Inne rodzaje przetworników prądu i napięcia
- 4 Błędy w pomiarach mocy i energii

Producent przekładnika podaje:

- prąd pierwotny  $I_1$   
z typoszeregu
- prąd wtórny  $I_2$   
zazwyczaj 5 A lub 1 A
- moc obciążenia  $S$
- klasę dokładności

## Błędy w pomiarach przekładnikami prądu

### Model przekładnika i błędy transformacji



Schemat zastępczy przekładnika prądowego (źródło [1]).

Z transformacją prądu wiążą się następujące rodzaje błędów:

- błąd amplitudowy  $\Delta I = \frac{\vartheta_n I_2 - I_1}{I_1} 100\%$

przekładnia faktyczna różna od znamionowej

- błąd kątowy  $\delta_i = \arg(I_2) - \arg(I_1')$

przesunięcie fazowe między prądami strony pierwotnej i wtórnej

- błąd wskazowy  $\Delta I_w = \frac{|\vartheta_n I_2 - I_1|}{|I_1|} 100\%$

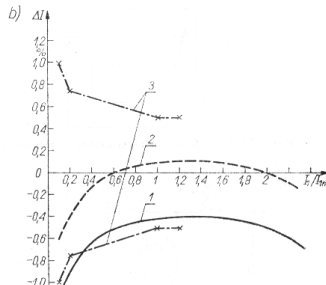
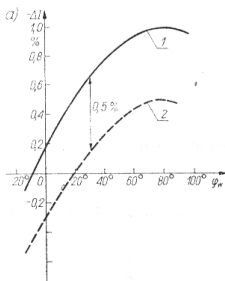
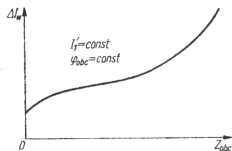
względny błąd wektorowy, określa zbiorczo błąd amplitudowy i kątowy

Błędy transformacji wynikają z:

- konstrukcji przekładnika (kompromis między jakością i ceną)
- warunków pracy (elektrycznych, środowiskowych)
- jakości montażu (położenie elementów, szerokość szczeliny)

Wartości błędów liczbowo zależą od:

- impedancji obciążenia  $\underline{Z}_{obc}$   
określanej za pomocą mocy obciążenia  $\underline{S} = I_2^2 \underline{Z}_{obc}$
- wartości prądu pierwotnego  $I_1$   
zarówno  $I_1$  jak i  $\underline{Z}_{obc}$  wpływają na  $\underline{Z}_\mu$



Błędy transformacji prądu (źródło [1]).

Błędy rosną przy małych i dużych wartościach prądu pierwotnego  $I_1$  oraz ze wzrostem impedancji obciążenia.





AGH

## Błędy w pomiarach przekładnikami prądu O czym mówi klasa przekładnika

Na podstawie klasy przekładnika możemy z norm lub rozporządzeń odczytać **wartości graniczne błędów**:

- $\Delta I_{max}$  — błąd amplitudowy w procentach  
graniczny błąd amplitudowy w procentach jest równy klasie
- $\delta_{i,max}$  — błąd kątowy w minutach lub w centyradianach  
1 minuta = 1/60 stopnia

Faktyczne wartości błędów są nieznane, gdyż mogą się zmieniać powinny znajdować się w przedziałach  $\pm \Delta I_{max}$ ,  $\pm \delta_{i,max}$ , jeśli ile przekładnik pracuje warunkach normalnych  $I_1 = (5\% \div 200\%)I_{1n}$ ,  $S = (25\% \div 100\%)S_n$

Ze względu na szeroki zakres zmian wartości prądu  $I_1$  w normalnej pracy, błędy graniczne są podawane dla określonych przedziałów prądu pierwotnego  $I_1 \leq x \cdot I_{1n}$ , gdzie  $x = 5\%, 20\%, 100\%, 120\%$   
np. dla przekładnika klasy 0,2 przy prądzie  $I_1 < 5\%I_{1n}$ ,  $\Delta I_{max} = 0,75\%$

- naturalne czyli związane z konstrukcją przekładnika  
zwiększanie  $X_{\mu}$  i  $R_{Fe}$ , zmniejszanie impedancji uzwojenia wtórnego
- poprawka zwojowa czyli korekta przekładni  
z poprawką zwojową przekładnia  $\vartheta_n \neq \vartheta_z = \frac{w_1}{w_2}$
- odpowiedni dobór mocy i rodzaju obciążenia  
z zakresu  $0,5S_n \div 1S_n$ ,  $\cos(\varphi) = 0,8$  ind.
- umieszczenie przewodu z prądem  $I_1$  centralnie w środku otworu przekładnika  
w przypadku przekładników montowanych na przewodzie z prądem
- minimalizacja szczeliny powietrznej  
w przypadku przekładników z otwieranym rdzeniem lub cęgowych

- 1 Błędy w pomiarach przekładnikami napięcia
- 2 Błędy w pomiarach przekładnikami prądu
- 3 Inne rodzaje przetworników prądu i napięcia**
- 4 Błędy w pomiarach mocy i energii

Rodzaje:

- cęgi Dietza (amperomierze i mierniki mocy)
- przekładniki na szynę lub przewód z rdzeniem skręcanym

Cechy przetworników z otwieranym rdzeniem:

- **łatwość i szybkość montażu**  
nie wymagają rozłączania obwodu, w którym mierzony będzie prąd
- **ograniczona precyzja**  
ze względu na trudność zapewnienia powtarzalnej szczeliny powietrznej
- **konieczność umieszczenia przewodnika centralnie w otworze**  
poza tym punktem błąd graniczny rośnie, czasem bez ograniczeń (wtedy nie jest podawany), problem ten dotyczy raczej mierników ręcznych i cęg, gdyż przekładniki do montażu na stałe dobierane do rozmiaru przewodu/szyn, mają kształtki wymuszające położenie przewodu



AGH

## Inne rodzaje przetworników prądu i napięcia

Przetworniki prądu i napięcia wykorzystujące efekt Halla (tzw. LEMy)

Hallotron — czujnik półprzewodnikowy, w którym napięcie jest proporcjonalne do iloczynu prądu i indukcji ( $U_H = \frac{B \cdot I \cdot R}{d}$ )

Firma LEM (patenty!) produkuje wiele rodzajów przetworników prądu i napięcia wykorzystujących efekt Halla. Ich zalety:

- szeroki zakres mierzonych wielkości  
zakresy prądów od mA do kA, napięciowe do 6,4 kV
- bogaty wybór rodzajów sygnałów wyjściowych  
napięciowe symetryczne, niesymetryczne, prądowe 0-20 mA, 4-20 mA
- szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości
- szeroki zakres pracy przy zachowaniu stałych błędów w konstrukcjach z kompensacją strumienia magnetycznego, rdzeń się nie nasycy
- izolacja galwaniczna
- niektóre przetworniki LEM posiadają otwierany rdzeń

- 1 Błędy w pomiarach przekładnikami napięcia
- 2 Błędy w pomiarach przekładnikami prądu
- 3 Inne rodzaje przetworników prądu i napięcia
- 4 Błędy w pomiarach mocy i energii**

- Pomiar bezpośredni

samym watomierzem lub licznikiem

błąd graniczny względny  $\delta P = \delta M$ ,

$\delta M$  jest równe klasie miernika (watomierza lub licznika)

- Pomiar pośredni

watomierzem lub licznikiem oraz przekładnikami napięciowym i prądowym

do błędu watomierza dochodzi błąd wyrażenia  $P = UI \cos(\varphi)$

iloczyn wielkości wejściowych  $\Rightarrow$  suma błędów względnych

błąd graniczny względny  $\delta P = \delta M + \delta U + \delta I + \delta \cos(\varphi)$ ,

gdzie  $\delta \cos(\varphi) \approx |\tan(\varphi)|(\Delta \Psi_U + \Delta \Psi_I) \cdot 100\%$ ,

$\delta U$  — błąd amplitudowy przekładnika napięciowego,  $\delta I$  — błąd amplitudowy

przekładnika prądowego,  $\Delta \Psi_U$  — błąd kątowy przekładnika napięciowego w

radianach,  $\Delta \Psi_I$  — błąd kątowy przekładnika prądowego w radianach



AGH

## Błędy w pomiarach mocy i energii

Przykład: błąd graniczny pośredniego pomiaru energii w jednej fazie

Dane przyrządów:

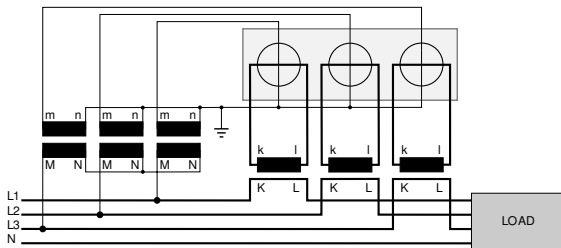
- licznik klasy 0,5  
błąd graniczny 0,5%
- przekładniki napięciowy i prądowy klasy 0,2  
błędy graniczne: amplitudowe 0,2%, kątowe 10'

Wyniki:

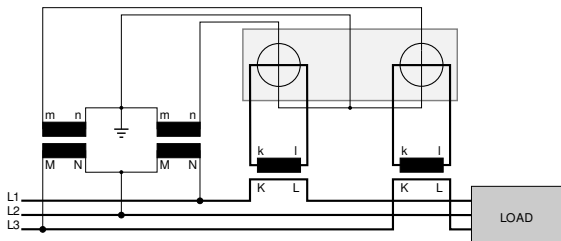
- $\cos(\varphi) = 0,7 \implies \delta P = 1,5\%$   
$$\delta P = 0,5\% + 0,2\% + 0,2\% + |1,02| \cdot \left(\frac{10'}{60'} + \frac{10'}{60'}\right) \cdot \frac{2\pi}{360'} \cdot 100\%$$
- $\cos(\varphi) = 0,95 \implies \delta P = 1,1\%$   
$$\delta P = 0,5\% + 0,2\% + 0,2\% + |0,33| \cdot \left(\frac{10'}{60'} + \frac{10'}{60'}\right) \cdot \frac{2\pi}{360'} \cdot 100\%$$
- $\cos(\varphi) = 1 \implies \delta P = 0,9\%$   
$$\delta P = 0,5\% + 0,2\% + 0,2\% + |0| \cdot \left(\frac{10'}{60'} + \frac{10'}{60'}\right) \cdot \frac{2\pi}{360'} \cdot 100\%$$



Układ trzech watomierzy



Układ Arona





AGH

## Błędy w pomiarach mocy i energii

### Błąd pomiaru pośredniego mocy i energii w układzie trzech watomierzy

3 watomierze lub 3 liczniki oraz 3 przekładniki napięciowe i 3 przekładniki prądowe

- moc łączna  $P = P_1 + P_2 + P_3$ , gdzie  $P_n = U_n I_n \cos(\varphi_n)$
- błąd bezwzględny łączny bez uwzględnienia watomierzy  
$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = \delta P_1 \cdot P_1 + \delta P_2 \cdot P_2 + \delta P_3 \cdot P_3$$
- jeśli asymetria jest niewielka, wtedy  $\delta P_1 \approx \delta P_2 \approx \delta P_3 \approx \delta P_p$   
zatem  $\Delta P \approx \delta P_p \cdot (P_1 + P_2 + P_3) = \delta P_p \cdot P$ ,
- $\delta P_p$  jest przybliżeniem granicznego błędu względnego  $\delta P$  mocy łącznej  $P$  bez uwzględnienia watomierzy
- a po uwzględnieniu watomierzy  
$$\delta P \approx \delta M + \delta P_p = \delta M + \delta U + \delta I + \delta \cos(\varphi)$$
  
gdzie  $\delta \cos(\varphi) \approx |\tan(\varphi)|(\Delta \Psi_U + \Delta \Psi_I) \cdot 100\%$ ,

Dane przyrządów:

- licznik klasy 0,5  
błąd graniczny 0,5%
- przekładniki napięciowy i prądowy klasy 0,2  
błędy graniczne: amplitudowe 0,2%, kątowe 10'

Wyniki:

- $\cos(\varphi) = 0,7 \implies \delta P = 1,5\%$   

$$\delta P = 0,5\% + 0,2\% + 0,2\% + |1,02| \cdot \left(\frac{10'}{60'} + \frac{10'}{60'}\right) \cdot \frac{2\pi}{360'} \cdot 100\%$$
- $\cos(\varphi) = 0,95 \implies \delta P = 1,1\%$   

$$\delta P = 0,5\% + 0,2\% + 0,2\% + |0,33| \cdot \left(\frac{10'}{60'} + \frac{10'}{60'}\right) \cdot \frac{2\pi}{360'} \cdot 100\%$$
- $\cos(\varphi) = 1 \implies \delta P = 0,9\%$   

$$\delta P = 0,5\% + 0,2\% + 0,2\% + |0| \cdot \left(\frac{10'}{60'} + \frac{10'}{60'}\right) \cdot \frac{2\pi}{360'} \cdot 100\%$$

2 watomierze lub 2 liczniki oraz 2 przekładniki napięciowe i 2 przekładniki prądowe

- moc łączna

$$P = P_1 + P_3 = U_{12}I_1 \cos(\varphi - \frac{\pi}{6}) + U_{23}I_3 \cos(\varphi + \frac{\pi}{6})$$

- błąd bezwzględny łączny bez uwzględnienia watomierzy

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_3 = \delta P_1 \cdot P_1 + \delta P_3 \cdot P_3$$

- zw względu na różne kąty w argumencie funkcji kosinus mamy

$$\delta P_1 = \delta U + \delta I + \delta \cos(\varphi - \frac{\pi}{6})$$

$$\delta P_3 = \delta U + \delta I + \delta \cos(\varphi + \frac{\pi}{6})$$

- ostatecznie po przekształceniach  $\delta P \approx$

$$\approx \delta M + \delta U + \delta I + \frac{P_1 |\tan(\varphi - \frac{\pi}{6})| + P_3 |\tan(\varphi + \frac{\pi}{6})|}{P_1 + P_3} (\Delta \Psi_U + \Delta \Psi_I) \cdot 100\%$$

Dane przyrządów:

- licznik klasy 0,5  
błąd graniczny 0,5%
- przekładniki napięciowy i prądowy klasy 0,2  
błędy graniczne: amplitudowe 0,2%, kątowe 10'

Wyniki:

- $\cos(\varphi) = 0,7 \implies \delta P = 1,5\%$   
błąd jest taki sam jak w układzie 3 watomierzy
- $\cos(\varphi) = 0,95 \implies \delta P = 1,25\%$   
błąd jest większy niż w układzie 3 watomierzy o 0,15%
- $\cos(\varphi) = 1 \implies \delta P = 1,24\%$   
w tym zakresie błąd jeż prawie się nie zmienia

Energia  $w(t_1, t_2)$  przesłana w czasie  $t_1$  do  $t_2$  to całka z mocy chwilowej  $p(t) = u(t)i(t)$  czyli  $w(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt$

- dla stałej mocy czynnej  $P$  możemy napisać, że energia  $W$  przesłana w przedziale czasu  $T$  jest równa  $W = P \cdot T$
- zakładając bezbłędny pomiar czasu błąd, względny pomiaru energii  $\delta W = \delta P$
- jeśli uwzględnimy względny graniczny błąd pomiaru czasu  $\delta T$  wtedy  $\delta W = \delta T + \delta P$

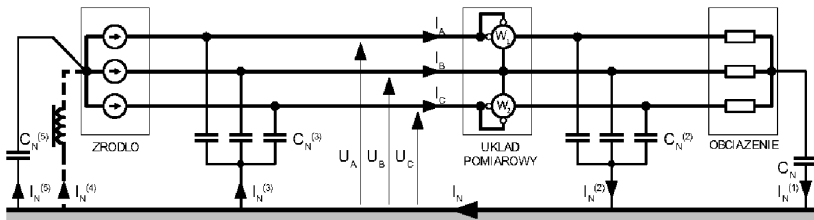
gdzie  $\delta P$  jest błędem względnym pomiaru mocy

właściwy wzór na  $\delta P$  należy wybrać odpowiednio do układu pomiarowego z podanych wcześniej

Założenie poprawnej pracy układu Arona: suma geometryczna prądów przepływających przez punkt pomiaru jest zerem.

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0$$

- Założenie jest spełnione przy symetrii odbiornika (obwodu za układem Arona).
- Przy asymetrii prądy przepływające poza układem Arona mogą powodować znaczne błędy (od 0,1% w stanie normalnym do > 100% przy doziemieniach)



Możliwe drogi przepływu prądu w systemie z układem Arona.



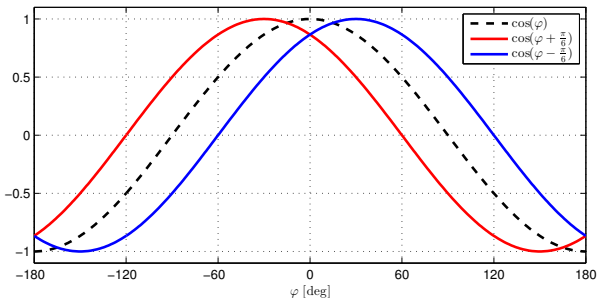
AGH

## Błędy w pomiarach mocy i energii

Błędy pomiaru w układzie Arona wynikające z błędów montażowych





$$P = P_1 + P_3 = U_{12}I_1 \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right) + U_{23}I_3 \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right)$$

Przy silnie indukcyjnym lub silnie pojemnościowym obciążeniu jedna z mocy  $P_1$  lub  $P_3$  przyjmuje ujemny znak ( $\varphi < -60^\circ \Rightarrow P_1 < 0$ ,  $\varphi > 60^\circ \Rightarrow P_3 < 0$ ). Wzór jest nadal prawdziwy, **należy sumować moce ze znakiem**, a nie zamieniać kolejności końców uzwojeń miernika!







-  Wiszniewski Andrzej. *Przekładniki w elektroenergetyce*. WNT, Warszawa 1982.
-  Wetula Andrzej, Borkowski Dariusz. *Błędy pomiaru mocy i energii w układach z przekładnikami napięciowymi i prądowymi* Elektro Info, 7/8, 2011.
-  Bień Andrzej, Borkowski Dariusz. *Stosowanie układu Arona w sieciach średniego napięcia w obecności prądów wyrównawczych*. Przegląd Elektrotechniczny, 2004-7-8.
-  *Rozporządzenie w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać przekładniki klasy dokładności 0,5 i dokładniejsze do współpracy z licznikami energii elektrycznej czynnej prądu przemiennego, oraz szczegółowego zakresu badań i sprawdzeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych*. Warszawa 2006.