



**AGH**



**Euro - Centrum**

**Studia Podyplomowe**

# **EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ**

w ramach projektu

**Śląsko-Małopolskie Centrum Kompetencji  
Zarządzania Energią**

## **Straty mocy i energii w elementach elektroenergetycznego układu przesyłowego**

**Dr hab. inż. Wiesław Nowak**



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. AGH

Energooszczędność w instalacjach i sieciach  
elektroenergetycznych

# **Straty mocy i energii w elementach elektroenergetycznego układu przesyłowego**

Kraków, 2 marca 2013



# Plan wykładu

1. Straty mocy i energii
2. Straty w liniach i przewodach
3. Wpływu odbiorników nieliniowych na straty w elementach sieci
4. Straty w pozostałych elementach sieci i instalacji
5. Dyskusja

# 1. Straty mocy i energii



## Straty mocy i energii

Straty mocy i energii to potrzeby własne składowych elementów sieci elektroenergetycznych w procesie dostawy energii elektrycznej.

Straty dzieli się na straty:

- **obciążeniowe** (podłużne) – zależne od obciążenia elementu sieciowego
- **jałowe** (poprzeczne) – praktycznie niezależne od obciążenia.

# Straty mocy czynnej obciążeniowe

Ogólna zależność:

$$P = \int_V J^2 \rho dV$$

gdzie:  $J$  – gęstość prądu,  $\rho$  – rezystywność materiału przewodzącego,  $V$  – objętość elementu przewodzącego.

Dla **jednorodnego toru o stałym przekroju** przy przepływie prądu  $I$ :

$$P = I^2 R$$

przy czym dla temperatury  $\vartheta \leq 300^\circ\text{C}$ :

$$R = R_{20} [1 + \alpha(\vartheta - 20)]$$

gdzie:  $R_{20}$  – rezystancja toru w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – temperaturowy współczynnik wzrostu rezystywności materiału.

# Straty mocy czynnej obciążeniowe

*Orientacyjne wartości rezystywności  $\rho_{20}$  i temperaturowego współczynnika  $\alpha$  dla wybranych przewodników*

Materiał	$\rho_{20}, \mu\Omega\cdot m$	$\alpha, 1/K$
srebro	0,0162	0,0036
miedź	0,01724	0,0039
aluminium	0,02278	0,0041
wolfram	0,055	0,0052
stal	0,097	0,0057



# Straty mocy czynnej obciążeniowe

Przy **prądzie przemiennym** należy uwzględnić, że:

$$R_{\sim} = k_w R_{-}$$

gdzie:  $R_{\sim}$ ,  $R_{-}$  – rezystancja przy prądzie przemiennym i stałym,  $k_w$  – **współczynnik wypierania** określony wzorem:

$$k_w = k_o k_z$$

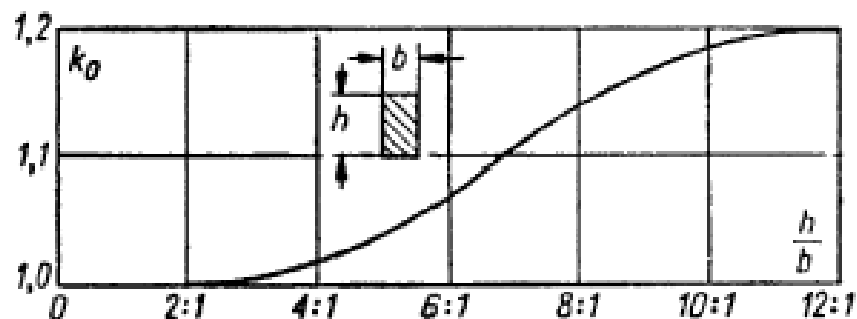
przy czym:  $k_o$  – **współczynnik naskórkowości** ( $k_o > 1$ ),  $k_z$  – **współczynnik zbliżenia** ( $k_z > 0$ ).

**Wartość współczynnika naskórkowości zależy od:**

- częstotliwości prądu
- rezystancji rozpatrywanego przewodnika
- kształtu przekroju przewodnika
- zawiera się w praktycznych przypadkach od 1,1÷1,2



# Straty mocy czynnej obciążeniowe



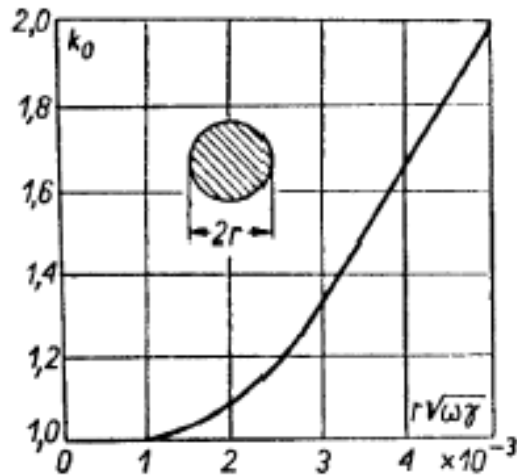
*Wartość współczynnika naskórkowości dla przewodnika o przekroju prostokątnym przy częstotliwości 50 Hz*

*Wartości współczynnika naskórkowości dla szyn prostokątnych przy częstotliwości prądu 50 Hz*

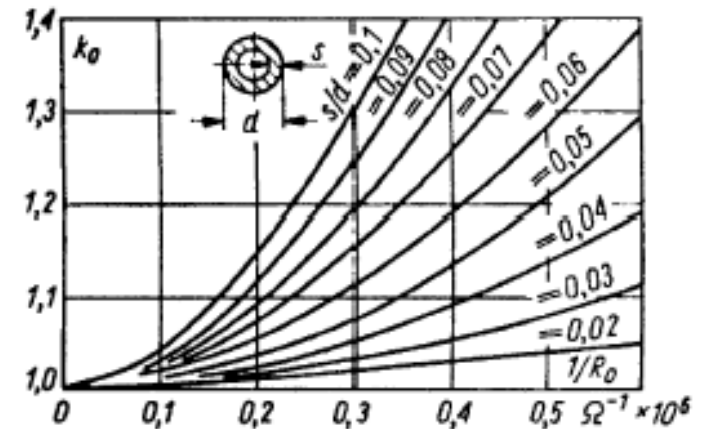
b × h mm	Przewód pojedynczy		Przewód podwójny <sup>*)</sup>		Przewód potrójny <sup>*)</sup>	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
10 × 50	1,04	1,03	1,10	1,08	1,25	1,17
10 × 60	1,07	1,05	1,17	1,12	1,34	1,25
10 × 80	1,11	1,08	1,27	1,19	1,50	1,35
10 × 100	1,17	1,12	1,33	1,23	1,62	1,43
10 × 120	1,20	1,14	1,38	1,29	1,70	1,49
10 × 160	1,25	1,17	1,46	1,32	1,85	1,59

<sup>\*)</sup> przy założeniu, że odstęp równa się  $b$

## Straty mocy czynnej obciążeniowe



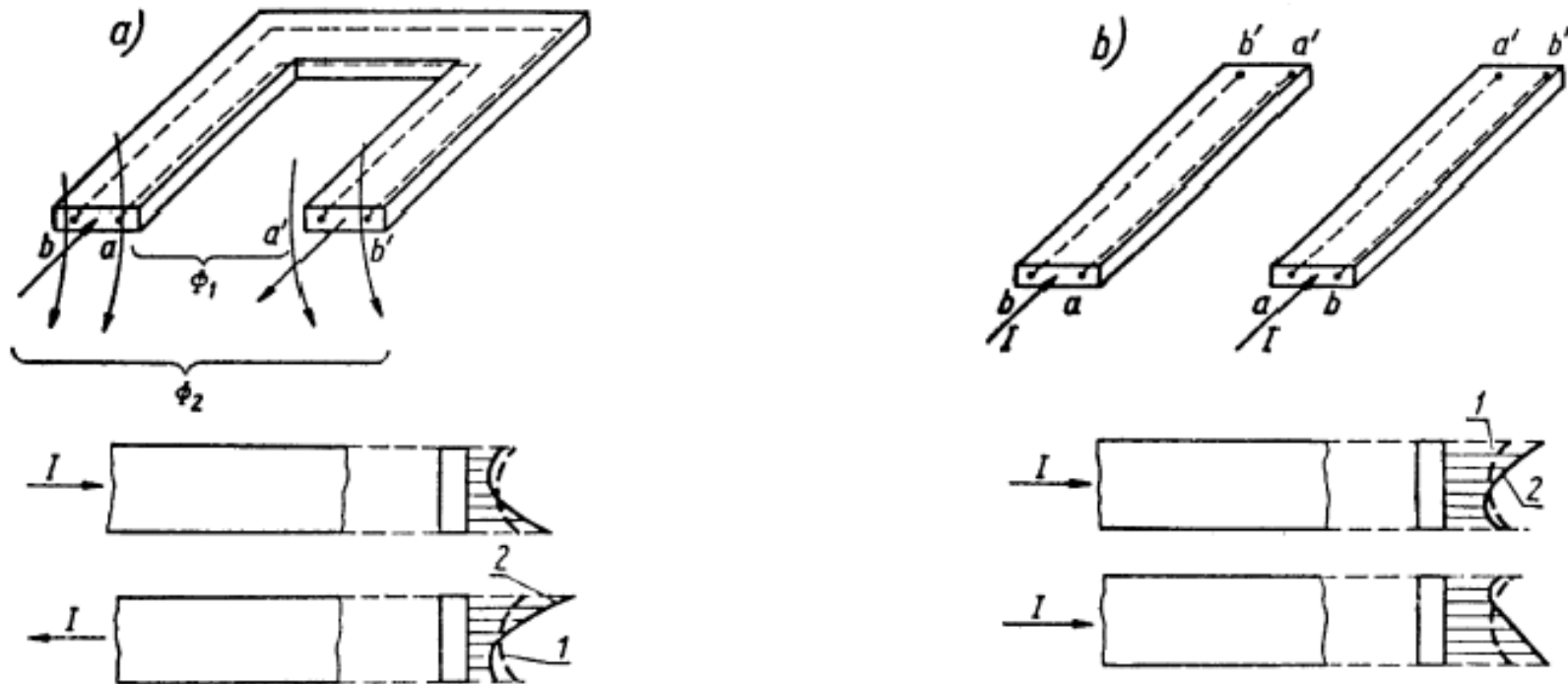
Wartość współczynnika naskórkowości dla przewodnika o przekroju kołowym:  $r$  – promień [m],  $\omega$  – pulsacja prądu [rad/s],  $\gamma$  – konduktywność przewodnika [S/m]



Wartość współczynnika naskórkowości dla przewodnika o przekroju rurowym przy częstotliwości 50 Hz:  $R_0$  – rezystancja jednostkowa przewodu [ $\Omega/m$ ]

# Straty mocy czynnej obciążeniowe

*Efekt zbliżenia, który jest wywołany wpływem sąsiednich pól magnetycznych*



*Zmienność gęstości prądu w wyniku efektu zbliżenia: a) przy przeciwnym przepływie prądu, b) przy zgodnym przepływie prądu, 1 – bez efektu zbliżenia, 2 – z efektem zbliżenia*

## Straty mocy czynnej obciążeniowe

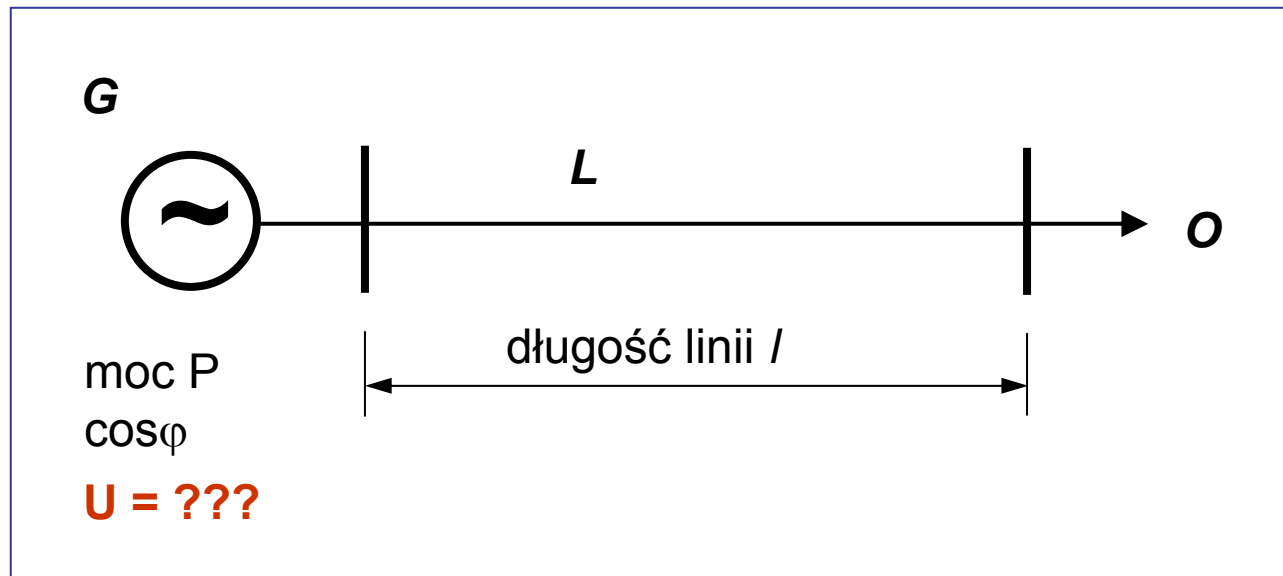
Straty mocy jako funkcja przesyłanej mocy:

$$\Delta P_o = 3 I^2 R = 3 \left( \frac{S}{\sqrt{3} U} \right)^2 R = \frac{S^2}{U^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R$$

- $I$  – wartość skuteczna natężenia prądu w danym elemencie sieciowym
- $S, P, Q$  – odpowiednio moc pozorna, czynna i bierna przepływająca przez dany element sieciowy
- $R$  – rezystancja podłużna elementu sieciowego
- $U$  – napięcie międzyfazowe

## Straty mocy czynnej obciążeniowe

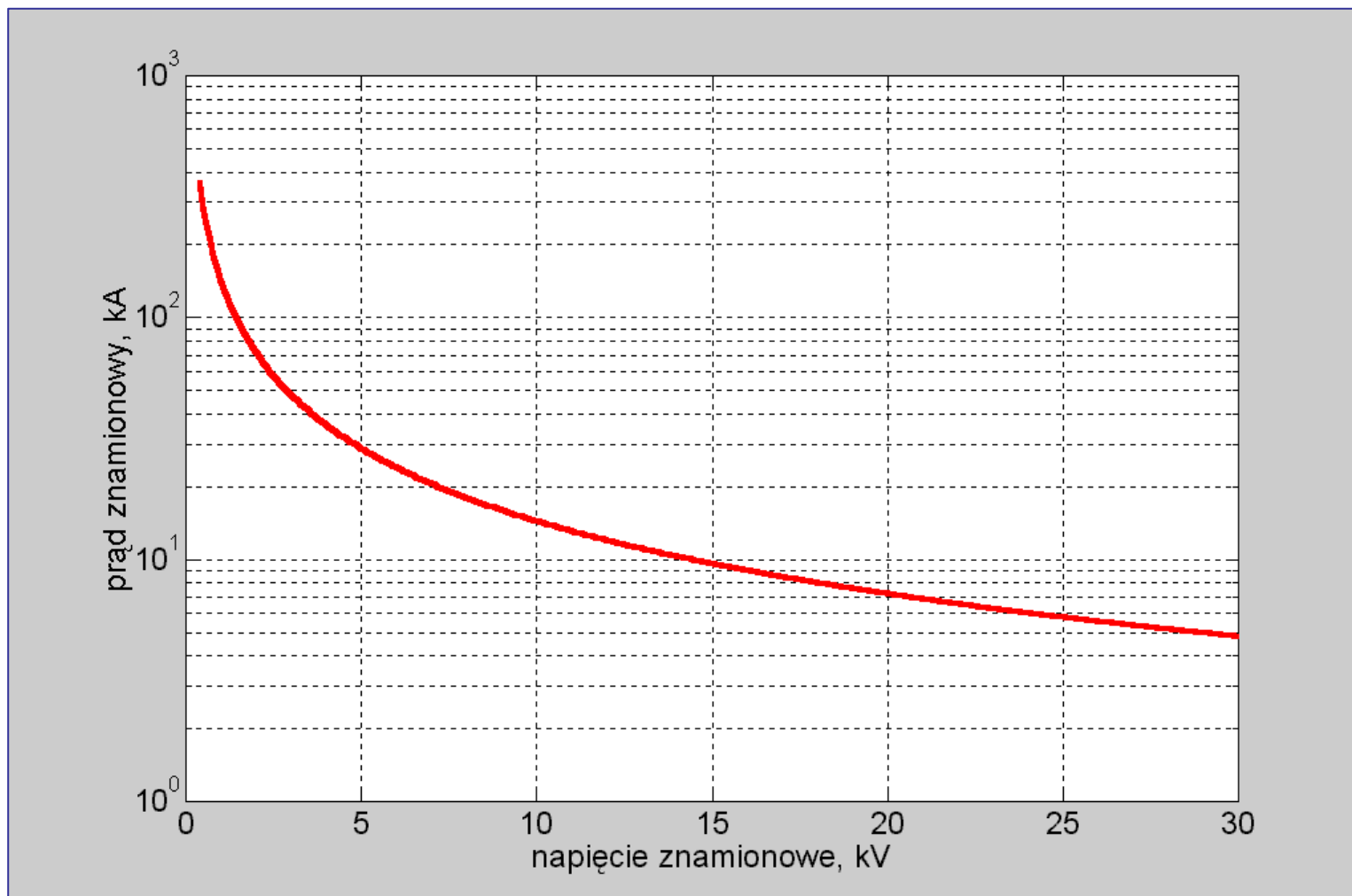
**Problem: dostarczyć linią elektroenergetyczną  $L$  do punktu odbioru  $O$ , moc wytwarzaną w generatorze  $G$**



**Jakie wybrać napięcie znamionowe generatora (linii)?**

# Straty mocy czynnej obciążeniowe

Zależność prądu znamionowego od napięcia znamionowego,  $P = 200 \text{ MW}$ ,  $\cos\varphi = 0,80$



# Straty mocy czynnej obciążeniowe

**(1) Moc przesyłana:**

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

**(2) Prąd w przewodzie linii:**

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}$$

**(3) Straty mocy:**

$$\Delta P = 3I^2 R_0 l$$

gdzie:  $R_0$  – rezystancja jednostkowa linii,  $\Omega/\text{km}$

$l$  – długość linii, km

## Straty mocy czynnej obciążeniowe

**(4) Podstawiając (2) do (3):**

$$\Delta P = 3 \left( \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} \right)^2 R_0 l$$

**(5) Rezystancja przewodu:**

$$R_0 l = \frac{\rho l}{s} = \frac{\rho l}{\pi r^2}$$

gdzie:  $\rho$  – rezystywność materiału przewodu,  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$   
 $l$  – promień przewodu, mm



## Straty mocy czynnej obciążeniowe

(6) Podstawiając (5) do (4) otrzymujemy:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{P}{\cos^2 \varphi} \cdot \frac{\rho}{\pi r^2} \cdot \frac{l}{U^2} \cdot 100\%$$

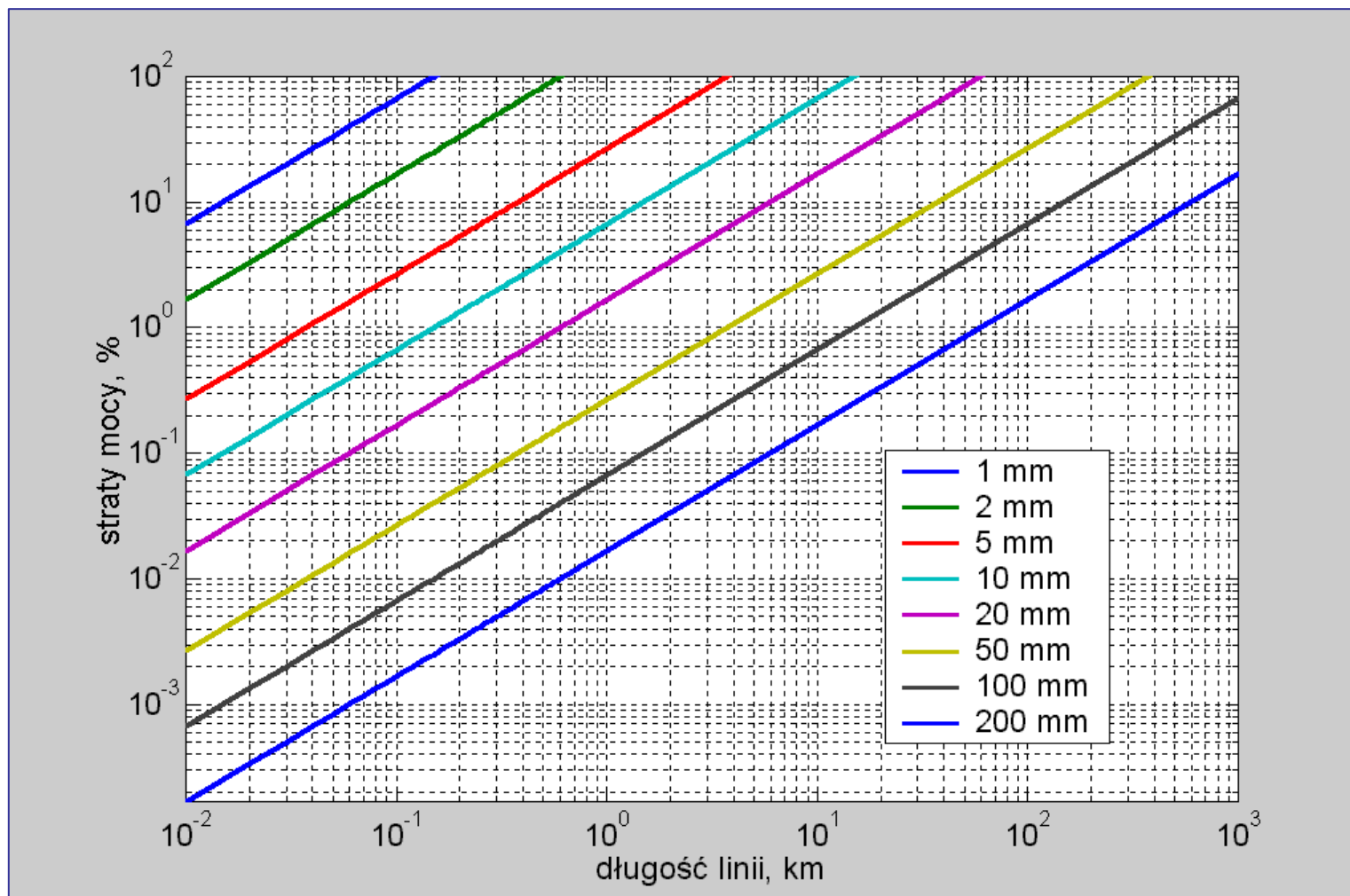
### Wniosek:

- ❑ chcąc ograniczać wielkość strat mocy przy danym  $P$ ,  $\cos \varphi$ ,  $\rho$  oraz  $l$  należy zwiększać promień  $r$  przewodu lub napięcie znamionowe  $U$  przesyłu

# Straty mocy czynnej obciążeniowe

Zależność strat mocy od długości i promienia przewodu (Cu) linii

$U = 15,75 \text{ kV}$ ,  $P = 200 \text{ MW}$ ,  $\cos\varphi = 0,80$



## Straty mocy czynnej obciążeniowe

- ❑ aby np. ograniczyć wielkość strat do poziomu 1% przy przesyle na odległość 100 km linią o napięciu **15,75 kV**, należałoby zastosować przewody o promieniu **powyżej 200 mm**

- ❑ masa jednostkowa jednego przewodu takiej linii wynosiłaby:

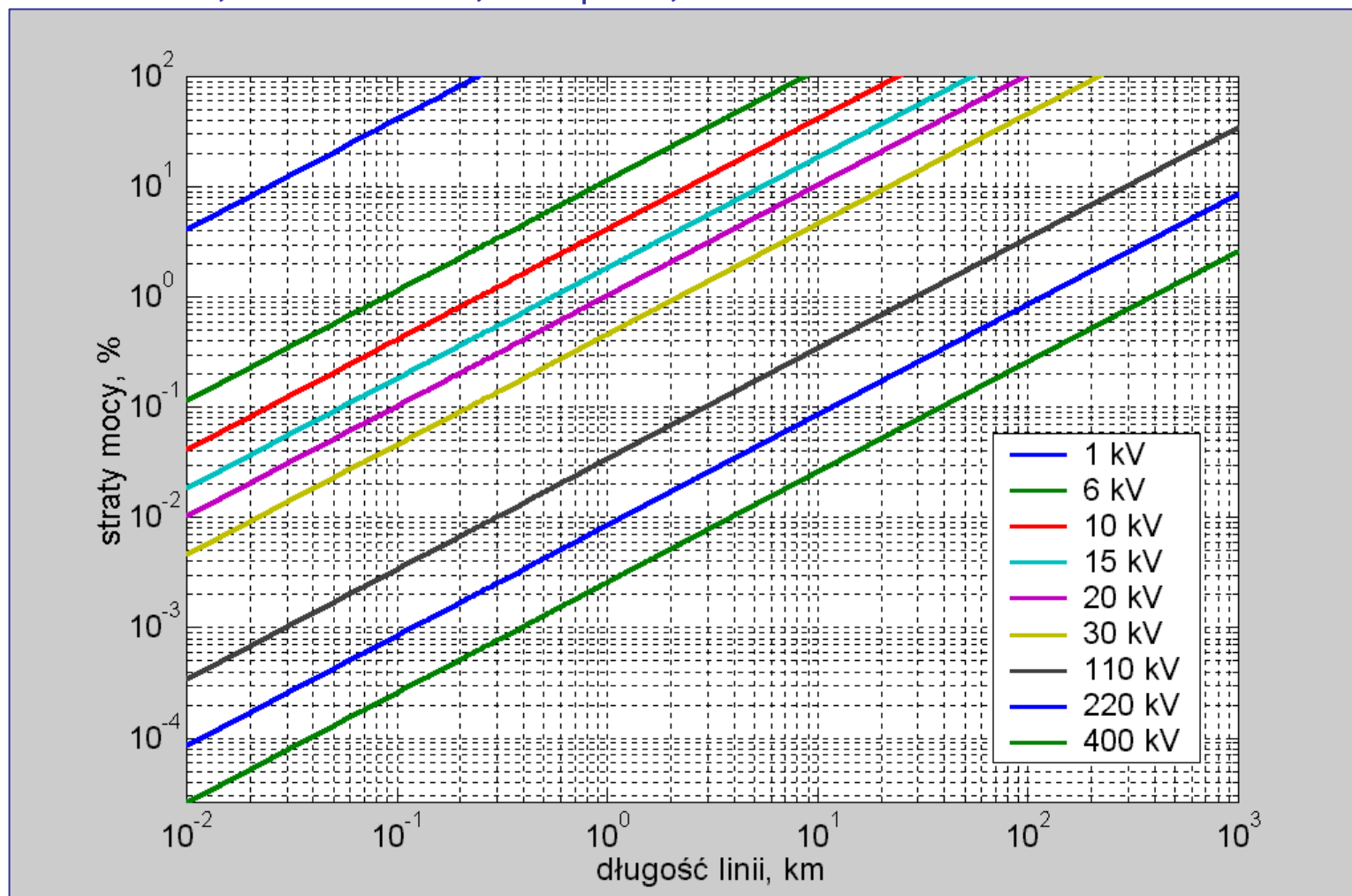
$$\pi \cdot 0,2^2 [\text{m}^2] \cdot 1000 [\text{m}] \cdot 9000 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \approx 1100 \text{ ton !!!}$$

- ❑ istniałyby trudności w budowie takiej linii

# Straty mocy czynnej obciążeniowe

Zależność strat mocy od długości i napięcia znamionowego linii

$r = 20 \text{ mm}$ ,  $P = 200 \text{ MW}$ ,  $\cos\varphi = 0,80$



## Straty mocy czynnej obciążeniowe

- ❑ aby ograniczyć wielkość strat do poziomu 1% przy przesyle na odległość 100 km linią o napięciu **220 kV**, należy zastosować przewody o promieniu **20 mm**
- ❑ masa jednostkowa jednego przewodu takiej linii wynosi:

$$\pi \cdot 0,02^2 [\text{m}^2] \cdot 1000 [\text{m}] \cdot 9000 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \approx 11 \text{ ton (tylko!)}$$

- ❑ lepiej jest zastosować przewody aluminiowe: aluminium ma co prawda ok. 1,6 razy większą oporność właściwą w stosunku do miedzi, ale ponad 3 razy mniejszą gęstość

# Straty mocy czynnej jałowe

Straty jałowe:

$$\Delta P_j = U^2 G$$

- $G$  – konduktancja poprzeczna elementu sieciowego  
 $U$  – napięcie międzyfazowe

Straty jałowe:

- w praktyce przyjmuje się, że są stałe
- określa się dla tych elementów sieciowych, dla których w schematach zastępczych uwzględnia się konduktancję (linie elektroenergetyczne napowietrzne o napięciu znamionowym  $U_n > 30$  kV i kablowe o napięciu znamionowym  $U_n > 20$  kV, transformatory oraz kondensatory równoległe)

## Wypadkowe straty mocy czynnej

Wypadkowe straty mocy czynnej:

$$\Delta P = \Delta P_o + \Delta P_j$$

## Straty energii

Straty energii  $\Delta E$  określa następująca zależność:

$$\Delta E = \int_0^{T_a} \Delta P_t dt$$

- $\Delta P_t$  – chwilowe straty mocy czynnej  
 $T_a$  – czas obliczeniowy czyli czas, dla którego wyznacza się straty energii



# Straty energii

Straty energii  $\Delta E$  są sumą:

$$\Delta E = \int_0^{T_a} \Delta P_t dt = \int_0^{T_a} [\Delta P_j + \Delta P_{ot}] dt = \Delta E_j + \Delta E_o$$

- $\Delta E_j$  – jałowe straty energii czynnej
- $\Delta E_o$  – jałowe straty energii czynnej

## Jałowe straty energii

Jałowe straty energii przy założeniu  $\Delta P_j = \text{const}$ :

$$\Delta E_j = \Delta P_j T_a$$

$T_a$  – czas pracy urządzenia (np.  $T_a = 8760$  h)

## Obciążeniowe straty energii

Obciążeniowe straty energii czynnej  $\Delta E_o$ :

$$\Delta E_o = \int_0^{T_a} \Delta P_{ot} dt$$

Moc chwilową strat  $\Delta P_{ot}$  można wyrazić jako:

$$\Delta P_{ot} = \Delta P_{os} \left( \frac{I_t}{I_s} \right)^2 = \Delta P_{os} \left( \frac{S_t}{S_s} \right)^2 = \Delta P_{os} m_{St}^2$$

- $I_s$  – największe natężenie prądu w okresie obliczeniowym  $T_a$
- $I_t$  – natężenie prądu w chwili  $t$
- $S_s$  – największe obciążenie mocą pozorną w okresie obliczeniowym  $T_a$
- $S_t$  – obciążenie mocą pozorną w chwili  $t$
- $\Delta P_{os}$  – straty obciążeniowe przy szczytowym (maksymalnym) obciążeniu
- $m_{St}$  – chwilowy stopień obciążenia mocą pozorną

# Obciążeniowe straty energii

Obciążeniowe straty energii czynnej  $\Delta E_o$ :

$$\Delta E_o = \Delta P_{os} \int_0^{T_a} m_{St}^2 dt = \Delta P_{os} \tau = \Delta P_{os} \tau_w T_a$$

- $\tau$  – czas trwania strat maksymalnych
- $\tau_w$  – względny czas trwania strat maksymalnych

## Czas trwania strat maksymalnych

Czas występowania strat maksymalnych wyrażony jest następującą zależnością :

$$\tau = \frac{1}{I_s^2} \int_0^{T_a} I_t^2 dt = \int_0^{T_a} \frac{S_t^2}{S_s^2} dt = \int_0^{T_a} m_{S_t}^2 dt \equiv \tau_w T_a$$

Obliczenie dokładnej wartości wymaga funkcyjnego odwzorowania przebiegu prądu  $I_t = I(t)$  lub mocy  $S_t = S(t)$  w ciągu całego okresu czasu.

## Czas trwania strat maksymalnych

W praktyce podstawowymi wielkościami mierzonymi są:

- ilość wprowadzonej (zakupionej) energii elektrycznej
- maksymalne obciążenia (moc szczytowa)
- średnie obciążenia w wybranych jednostkach czasu np. obciążenia 15-minutowe

Analiza różnych metod wyznaczania czasu trwania strat maksymalnych przedstawiona jest w:

**Kulczycki J. pod red.: *Straty energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych*, Wyd. PTPIREE, Poznań 2009**

## **2. Straty w liniach i przewodach**



# Straty mocy w liniach

Straty w liniach napowietrznych i kablowych:

- obciążeniowe
- jałowe
- dodatkowe



# Straty obciążeniowe

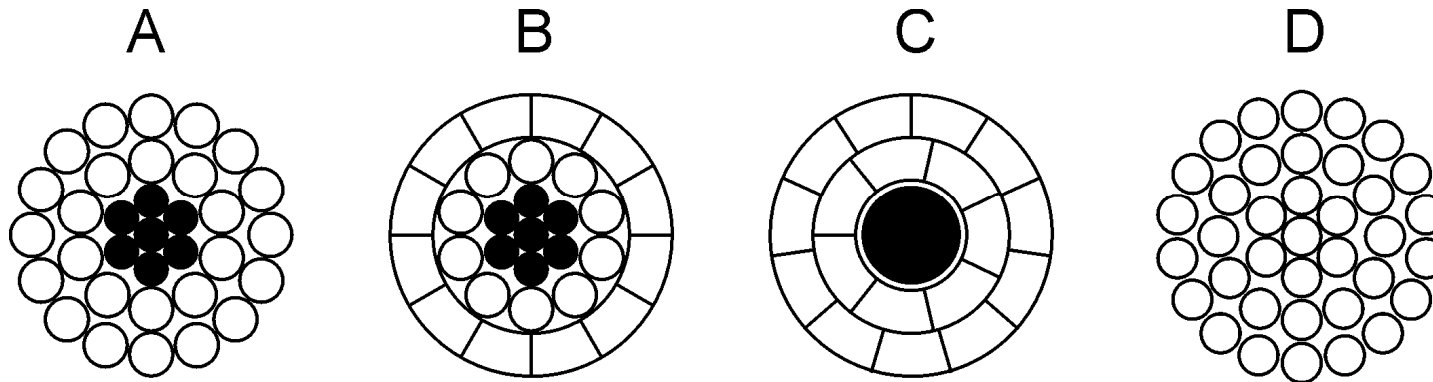
Straty obciążeniowe:

$$\Delta P_o = 3 I^2 R = 3 \left( \frac{S}{\sqrt{3} U} \right)^2 R = \frac{S^2}{U^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R$$

- $I$  – wartość skuteczna natężenia prądu w danym elemencie sieciowym
- $S, P, Q$  – odpowiednio moc pozorna, czynna i bierna przepływająca przez dany element sieciowy
- $R$  – rezystancja podłużna elementu sieciowego
- $U$  – napięcie międzyfazowe

## Straty obciążeniowe

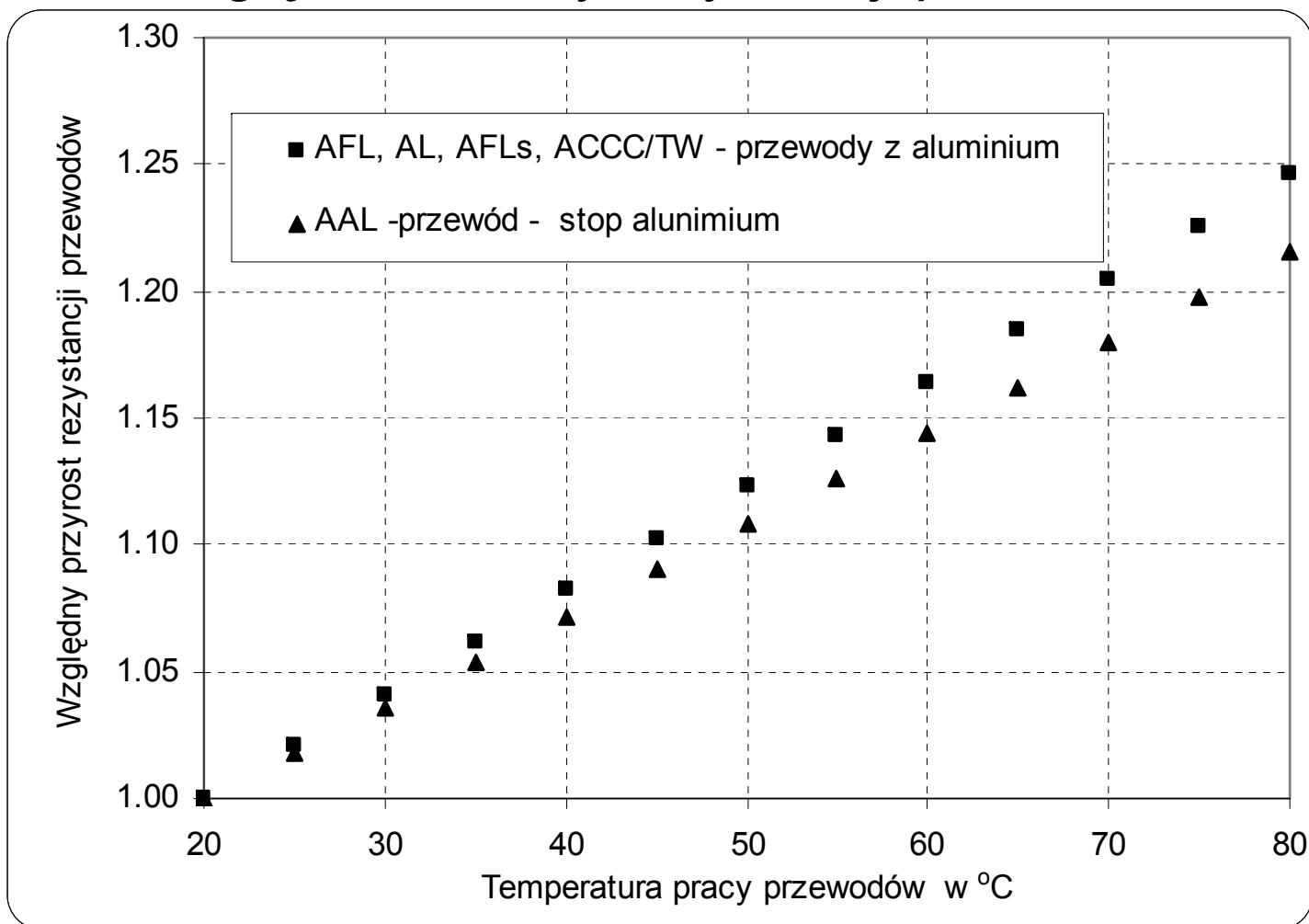
Przekroje napowietrznych przewodów gołych stosowanych w elektroenergetycznych sieciach przesyłowych i dystrybucyjnych



- A - klasyczny przewód stalowo aluminiowy z drutami okrągłymi (AFL)
- B - przewód z drutami segmentowymi i rdzeniem z drutów okrągłych stalowych (AFLs)
- C - przewód z drutami segmentowymi i rdzeniem kompozytowym (ACCC/TW),
- D - przewody gołe z aluminium lub ze stopu aluminium AlMgS (AAL)

# Straty obciążeniowe

## Względne zmiany rezystancji przewodów

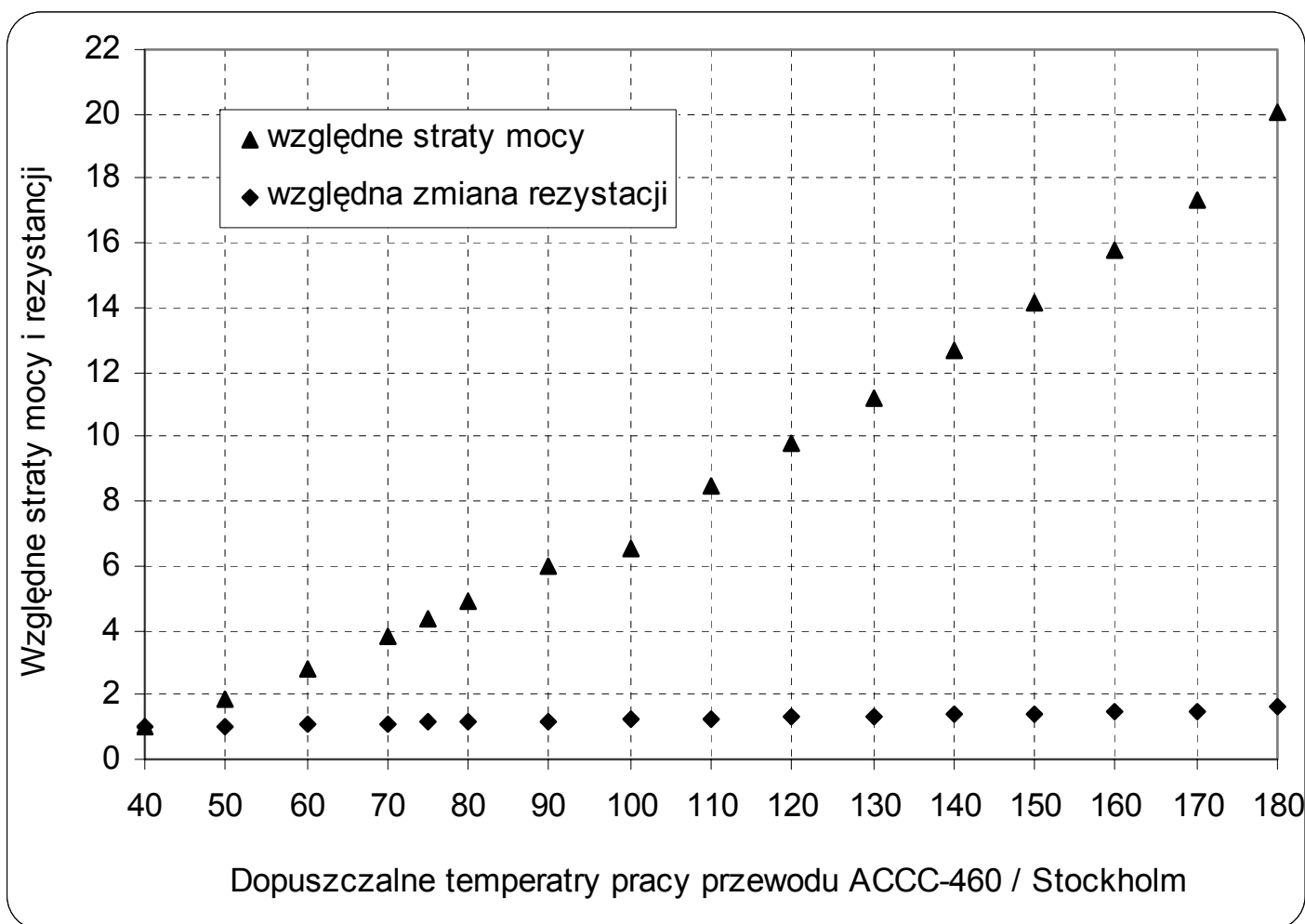


## Straty obciążeniowe

- ❑ konstrukcji przewodów z drutami segmentowym i kompozytowymi pozwalają na zwiększenie pola przekroju aluminium przewodów AFL<sub>S</sub> o 20 ÷ 25%, a w przewodach z rdzeniem kompozytowym (ACCC/TW) o około 30% w stosunku do klasycznego przewodu AFL o tej samej średnicy
- ❑ zwiększenie ilości aluminium w przewodach kompozytowych i segmentowych przekłada się na zmniejszenie rezystancji
- ❑ zastosowanie przewodów „niskozwisowych” z rdzeniem kompozytowym, pozwala na pracę przewodów w wyższych temperaturach i przy zwiększonym obciążeniu bez konieczności zmiany konstrukcji słupów - równocześnie podwyższona temperatura przewodów oraz zwiększone obciążenie powoduje większe straty mocy w takim przewodzie

# Straty obciążeniowe

Względne straty mocy czynnej i rezystancji w linii z przewodami ACCC





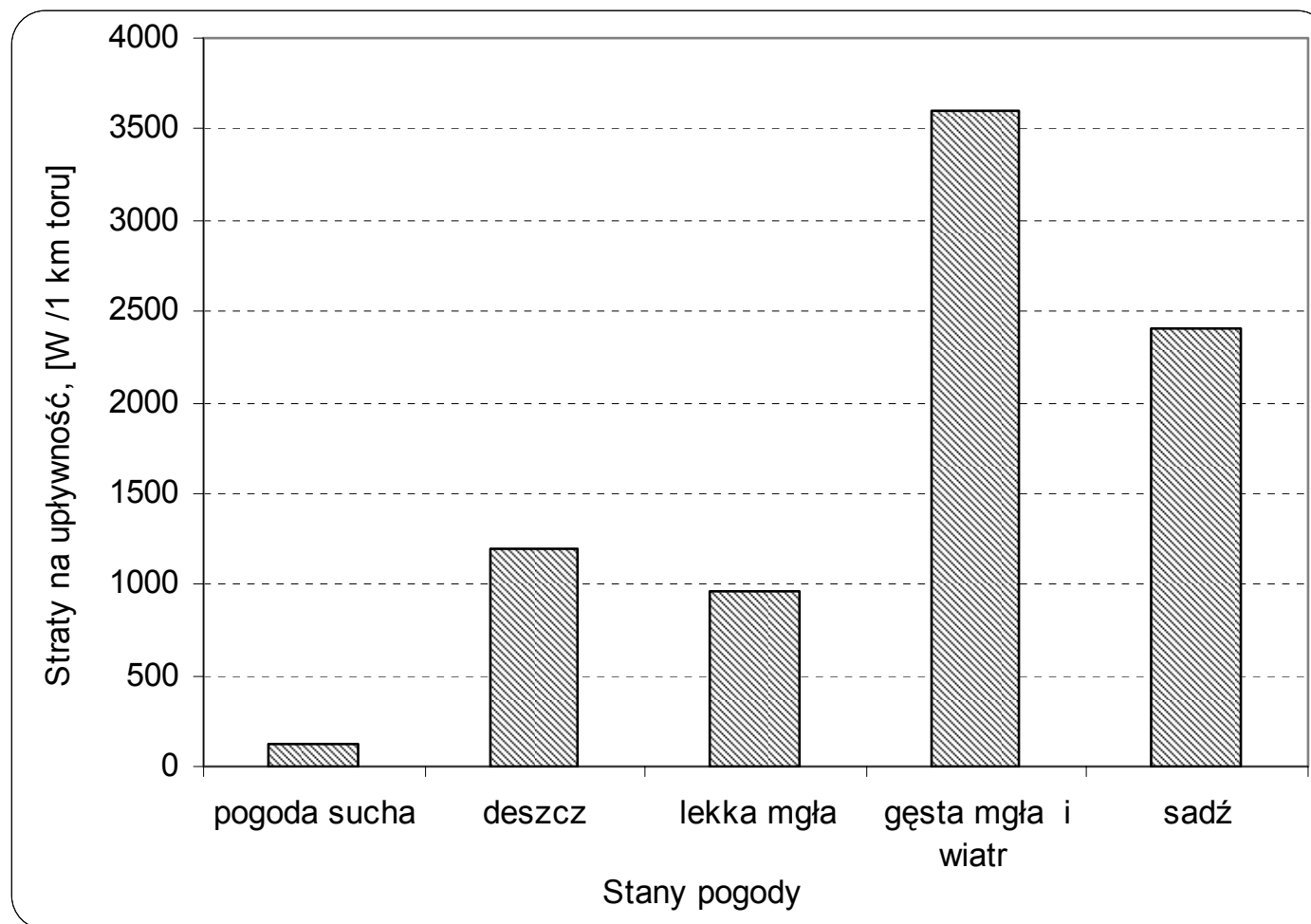
## Straty jałowe

Straty jałowe to straty wywołane zjawiskiem:

- upływem w izolacji
- ulotu elektrycznego

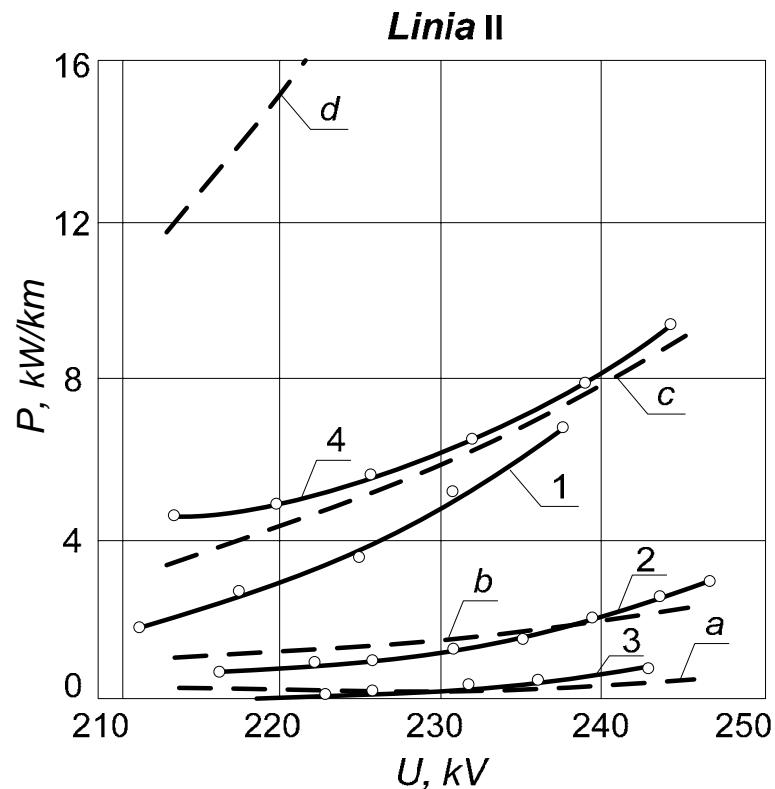
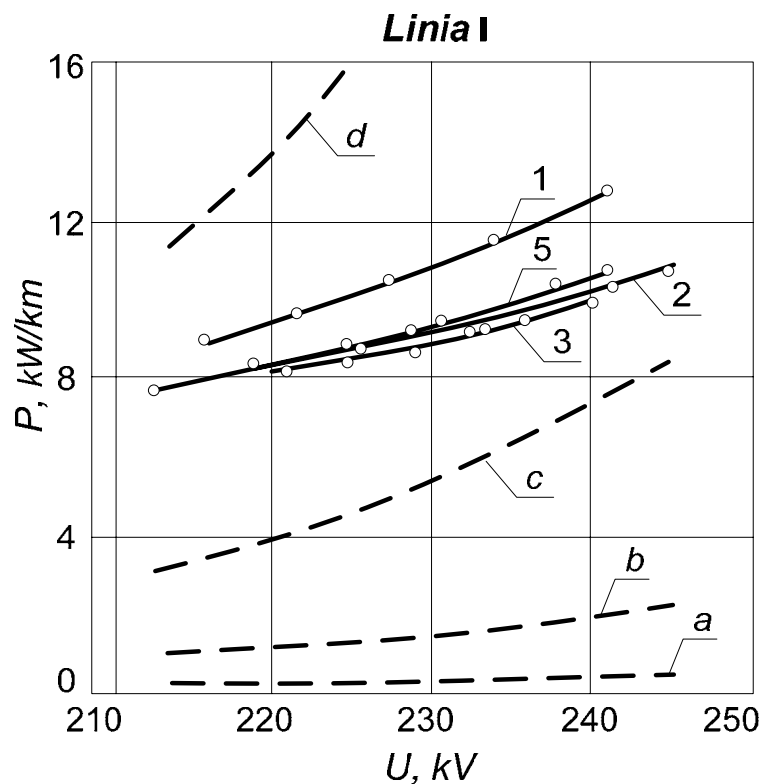
# Straty jałowe

Straty mocy na upływność w linii 110 kV na izolatorach wiszących



# Straty jałowe

Straty ulotowe w dwóch liniach 220 kV o podobnych konstrukcjach: 2, 3, 5, a – dobra pogoda; 1, c – deszcz; 4 – marznąca mżawka; b – suchy śnieg; 4 – szron. Linie przerywane (oznaczenia literowe) – wartości obliczeniowe; Linie ciągłe (oznaczenia liczbowe) – wartości pomiarowe





## Straty jałowe

Według klasycznego wzoru Peek'a wielkość strat ulotowych  $P$  wyrażona jest zależnością:

$$P = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{a}} (U - U_j)^2 \cdot 10^{-5} \quad [\text{kW/km}]$$

- $\delta$  – gęstość względna powietrza,
- $f$  – częstotliwość w Hz,
- $a$  – odstęp między przewodami linii,
- $r$  – promień przewodu linii,
- $U$  – wartość skuteczna napięcie fazowego w kV,
- $U_j$  – wartość skuteczna napięcie fazowego w kV odpowiadająca natężeniu pola elektrycznego jonizacji zderzeniowej:

## Straty jałowe

Według klasycznego wzoru Peeka wielkość strat ulotowych  $P$  wyrażona jest zależnością:

$$P = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{a}} (U - U_j)^2 \cdot 10^{-5} \quad [\text{kW/km}]$$

- $\delta$  – gęstość względna powietrza,
- $f$  – częstotliwość w Hz,
- $a$  – odstęp między przewodami linii,
- $r$  – promień przewodu linii,
- $U$  – wartość skuteczna napięcie fazowego w kV,
- $U_j$  – wartość skuteczna napięcie fazowego w kV odpowiadająca natężeniu pola elektrycznego jonizacji zderzeniowej:

## Straty jałowe

Według klasycznego wzoru Peek'a wielkość strat ulotowych  $P$  wyrażona jest zależnością:

$$P = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{a}} (U - U_j)^2 \cdot 10^{-5} \quad [\text{kW/km}]$$

- $\delta$  – gęstość względna powietrza,
- $f$  – częstotliwość w Hz,
- $a$  – odstęp między przewodami linii,
- $r$  – promień przewodu linii,
- $U$  – wartość skuteczna napięcie fazowego w kV,
- $U_j$  – wartość skuteczna napięcie fazowego w kV odpowiadająca natężeniu pola elektrycznego jonizacji zderzeniowej:

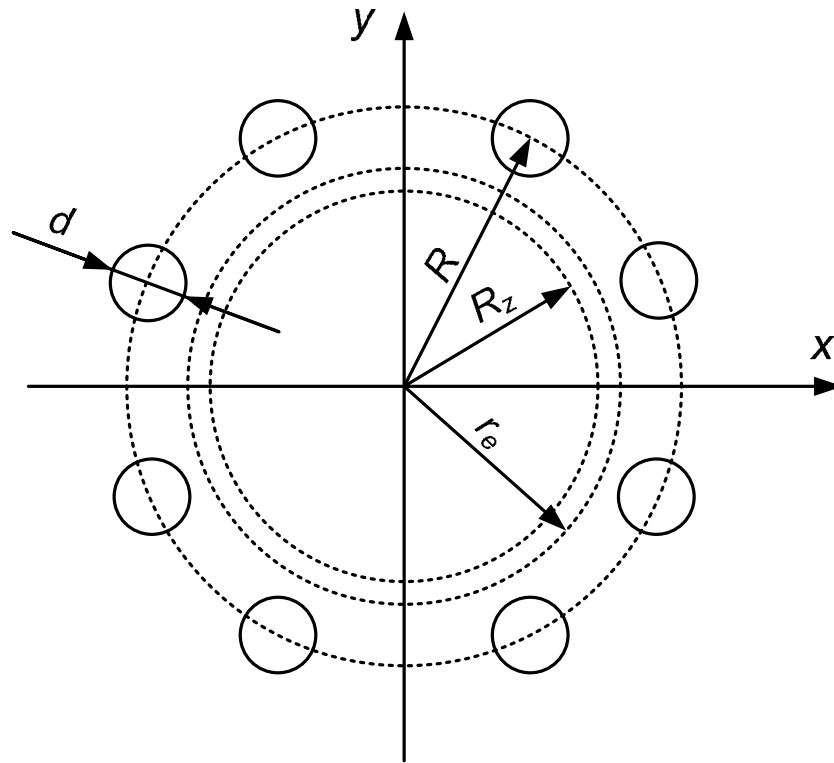
## Straty jałowe

$$E_j = 21,2 \delta m_1 m_2$$

- $m_1$  – współczynnik uwzględniający gładkość powierzchni przewodu, równy 0,98 ... 0,83 w zależności od konstrukcji i stopnia zesterzenia przewodu,
- $m_2$  – współczynnik uwzględniający warunki pogodowe, równy 0,8 dla deszczu.

# Straty jałowe

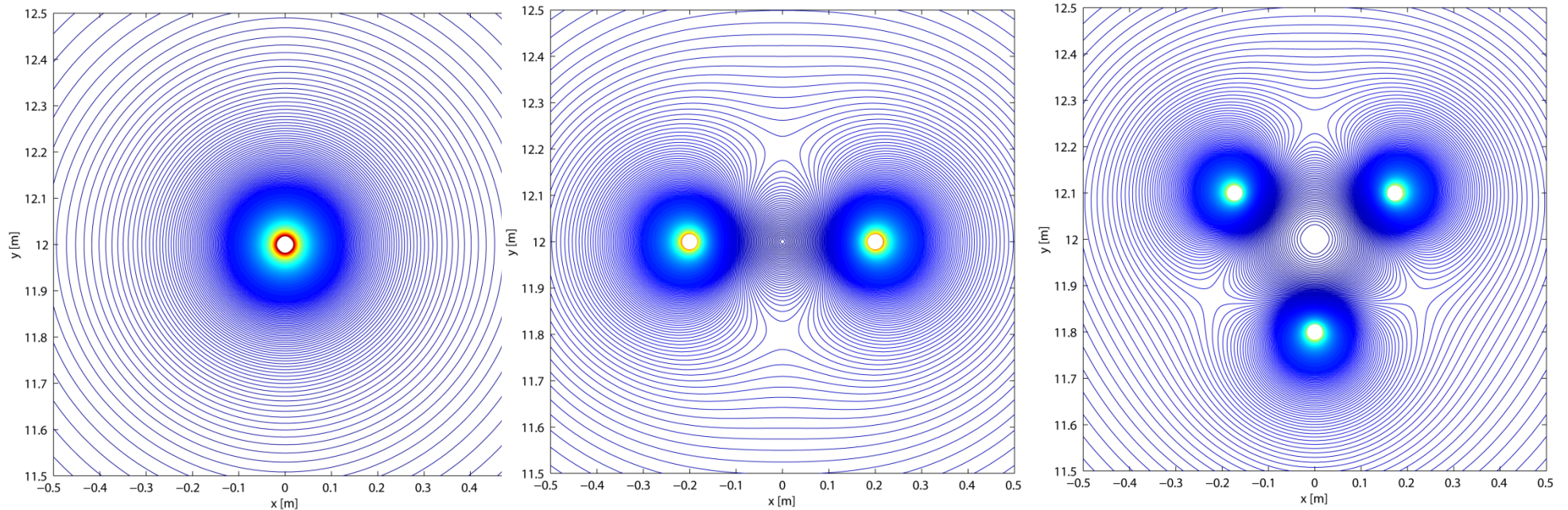
Przekrój wiązki przewodowej;  $R$  – promień wiązki,  $R_z$  – promień równoważny,  $r_e$  – promień zastępczy wiązki,  $r = 0,5 d$  – promień przewodu wiązki



$$r_e = R \sqrt[3]{\frac{Nr}{R}}$$

# Straty jałowe

Obrazy natężenia pola elektrycznego w otoczeniu fazy środkowej jednotorowej linii 400 kV dla liczby przewodów w wiązce  $N = 1, 2, 3$ ,





## Straty dodatkowe

Straty jałowe to straty wywołane zjawiskiem:

- straty w powłokach, pancerzach i żyłach powrotnych kabli
- straty w przewodach odgromowych

### **3. Wpływu odbiorników nieliniowych na straty w elementach sieci**





# Wprowadzenie

- **Stosowanie odbiorników nieliniowych** w sieciach elektroenergetycznych skutkuje odkształceniem od sinusoidy przebiegów napięć i prądów
- Wpływa to między innymi na zwiększenie strat mocy i energii w elementach sieci:
  - **liniach**
  - **transformatorach**



# Wprowadzenie

- **Dodatkowe straty mocy w liniach** spowodowane są:
  - wzrostem rezystancji przewodów linii przy przepływie prądów wyższej częstotliwości
  - obciążeniem przewodu neutralnego harmonicznymi rzędu o krotności trzy – *harmoniczne potrójne*
- **Dodatkowe straty mocy w transformatorach** spowodowane są prądami wirowymi powstającymi wskutek oddziaływania strumienia rozproszenia w:
  - przewodach uzwojeń
  - elementach konstrukcyjnych transformatora

## Straty mocy w liniach

- Przepływ prądu w czteroprzewodowej linii niskiego napięcia skutkuje wystąpieniem strat mocy  $\Delta P_L$

$$\Delta P_L = \Delta P_{LF} + \Delta P_{LN}$$

$$\Delta P_{LF} = (I_{L1}^2 + I_{L2}^2 + I_{L3}^2) R_F$$

$$\Delta P_{LN} = I_N^2 R_N$$

gdzie:

$I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}$  – wartości skuteczne prądów w przewodach fazowych,

$R_F$  – rezystancja przewodu fazowego,

$I_N$  – wartość skuteczna prądu w przewodzie neutralnym,

$R_N$  – rezystancja przewodu neutralnego.

## Straty mocy w liniach

- Powyższe zależności pozostają słuszne również dla odkształconych przebiegów prądów
- Wartości skuteczne prądów określone są następująco:

$$I_F = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} I_{Fi}^2} \qquad I_N = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} I_{Ni}^2}$$

gdzie:

$I_{fi}$  – wartość skuteczna  $i$ -tej harmoniczej prądu w przewodach fazowych,

$I_{ni}$  – wartość skuteczna  $i$ -tej harmoniczej prądu w przewodzie neutralnym.

## Straty mocy w liniach

- Analizując wpływ prądów odkształconych na straty mocy należy uwzględnić wzrost rezystancji przewodów wskutek zjawiska naskórkowości i efektu zbliżenia przewodów
- Wzrost rezystancji  $R_{AC}$  przewodu linii niskiego napięcia przy przepływie prądu przemiennego, w odniesieniu do rezystancji  $R_{DC}$  przewodu przy przepływie prądu stałego wynosi:

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = 1 + x_s(n) + x_{sp}(n)$$

gdzie:

$x_s(n)$  – współczynnik określający wpływ zjawiska naskórkowości,

$x_{sp}(n)$  – współczynnik określający wpływ efektu zbliżenia przewodów,

$n$  – rząd harmonicznej.

## Straty mocy w transformatorach

- Straty w transformatorach są sumą *strat jałowych* i *strat obciążeniowych*
- *Straty jałowe* są niezależne od obciążenia transformatora. *Straty obciążeniowe*  $\Delta P_T$  można przedstawić jako sumę *strat podstawowych*  $\Delta P_{TP}$  i *strat dodatkowych*  $\Delta P_{TD}$ :

$$\Delta P_T = \Delta P_{TP} + \Delta P_{TD}$$

- *Straty podstawowe* – wydzielanie ciepła w uzwojeniach transformatora przy przepływie prądu obciążeniowego
- *Straty dodatkowe* – wywołane prądami wirowymi w przewodach uzwojeń i innych elementach konstrukcyjnych transformatora - powstającymi wskutek oddziaływania *strumienia rozproszenia*

## Straty mocy w transformatorach

- Współczynnik wzrostu strat obciążeniowych  $K_o$  można wyrazić zależnością:

$$K_o = \frac{\Delta P_{To}}{\Delta P_T} = \frac{\Delta P_{TP} + K \cdot \Delta P_{TD}}{\Delta P_{TP} + \Delta P_{TD}}$$

$$K = \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \left( \frac{I_i}{I} \right)^2 \cdot n_i^2 \right]$$

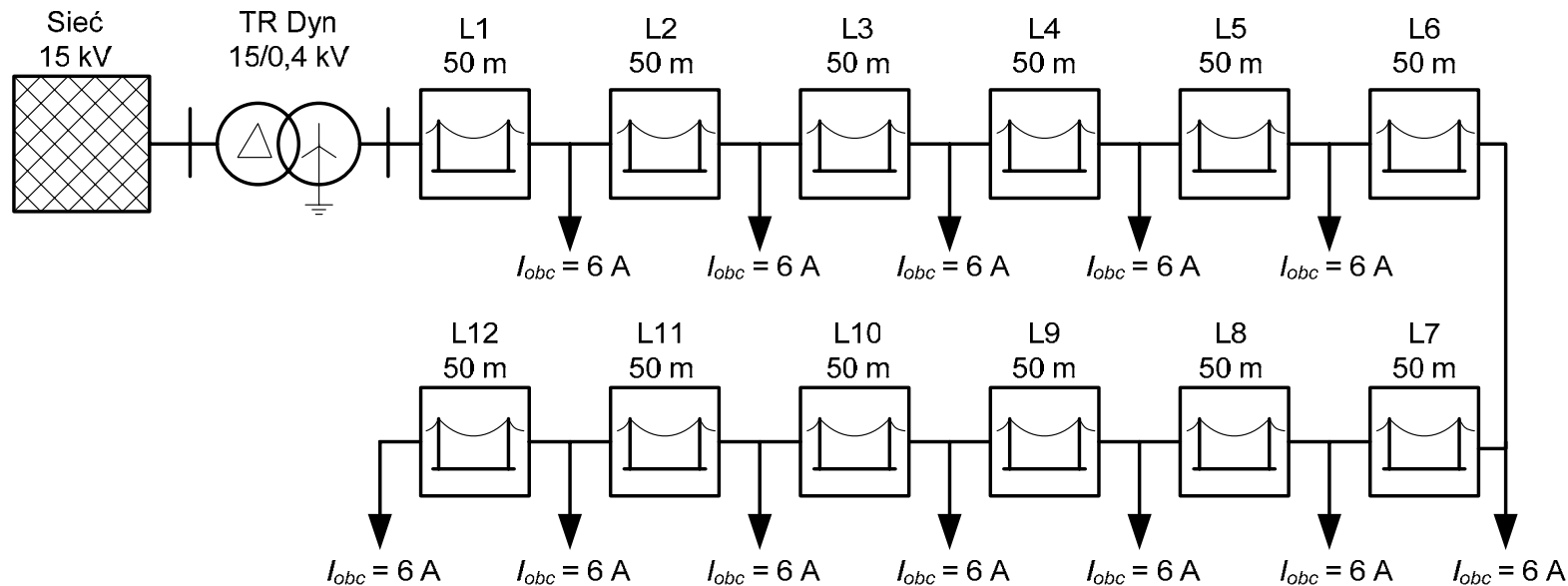
- Jeżeli założyć, że stosunek  $\beta$  strat dodatkowych do podstawowych wynosi:

$$\beta = \frac{\Delta P_{TD}}{\Delta P_{TP}} \quad \text{to} \quad K_o = \frac{1 + K \cdot \beta}{1 + \beta}$$

# Straty w modelowej sieci nn

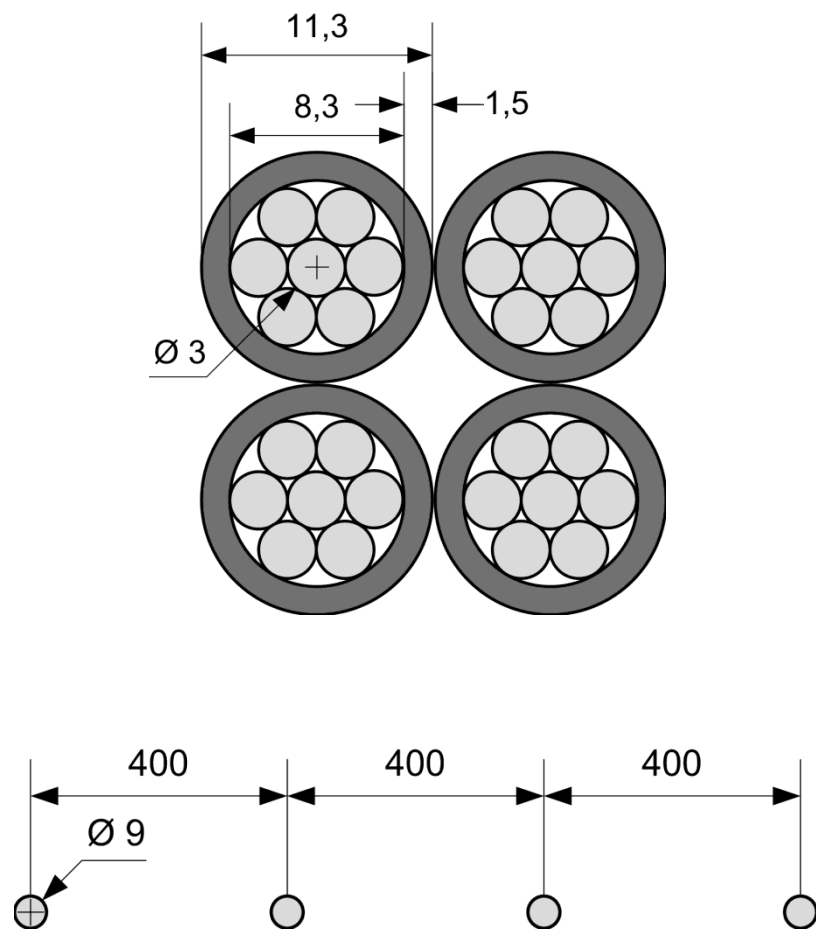
## Układ modelowy:

- transformator  $S_{nT} = 100 \text{ kVA}$ ,
- napowietrznej linii nN
  - długość  $L = 12 \times 50 \text{ m}$
  - przewody typu AsXSn  $4 \times 50 \text{ mm}^2$
- obciążenie takiej samej mocy i charakterze ( $I_{obc} = 6 \text{ A}$ )

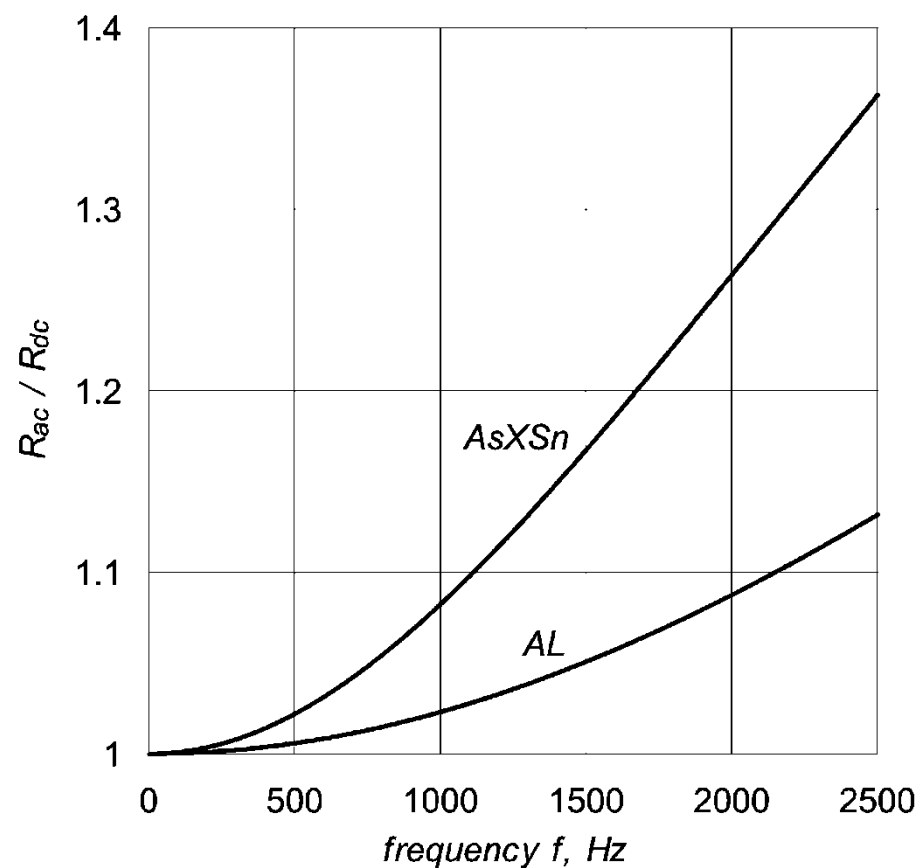




# Straty w modelowej sieci nn



Zależność rezystancji przewodu izolowanego typu AsXSn oraz przewodu gołego typu AL od częstotliwości płynącego prądu



## Straty w modelowej sieci nn

Obliczenia wykonano dla dziewięciu wariantów obciążenia różniących się kształtem prądu obciążenia i przy zachowaniu wartości skutecznej wynoszącej **6A**:

W1: obciążenie sinusoidalne  $I_1 = 6A$ ;

W2: z zawartością trzeciej harmonicznej  $I_1 = 5,69A$ ,  $I_3 = 1,9A$

W3: z zawartością piątej harmonicznej  $I_1 = 5,69A$ ,  $I_5 = 1,9A$

W4: z zawartością siódmej harmonicznej  $I_1 = 5,69A$ ,  $I_7 = 1,9A$

W5: z zawartością dziewiątej harmonicznej  $I_1 = 5,69A$ ,  $I_9 = 1,9A$

W6: z zawartością jedenastej harmonicznej  $I_1 = 5,69A$ ,  $I_{11} = 1,9A$

W7: z zawartością trzynastej harmonicznej  $I_1 = 5,69A$ ,  $I_{13} = 1,9A$

W8: obciążenie występujące się przy zasilaniu odbiorników liniowych oraz prostowników jednofazowych na poziomie około 25%

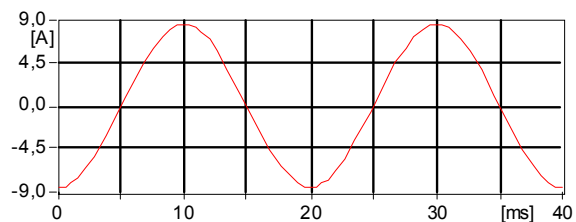
( $THD_I = 14,37\%$ )

W9: obciążenie występujące się przy zasilaniu odbiorników liniowych oraz prostowników jednofazowych na poziomie około 50%

( $THD_I = 51,33\%$ )

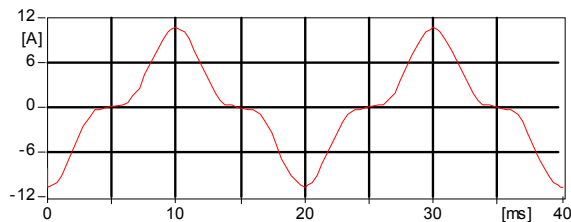
# Przebiegi prądów obciążenia

Wariant 1



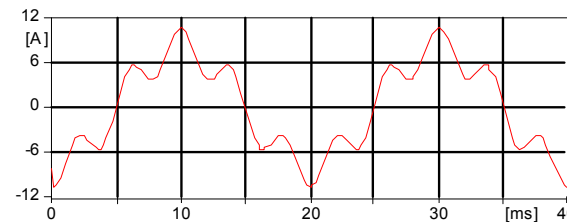
(file 1v4.pl4; x-var t) c:TKA -X0001A

Wariant 2



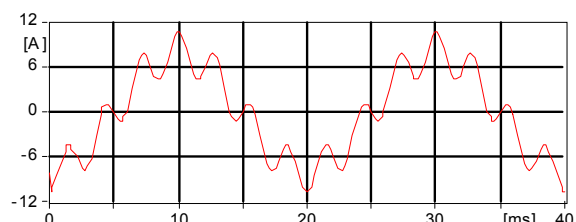
(file prady.pl4; x-var t) c:X0021A-X0026A

Wariant 3



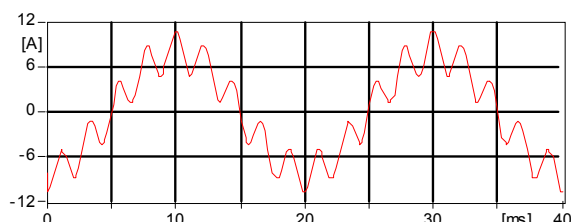
(file prady.pl4; x-var t) c:X0021A-X0026A

Wariant 4



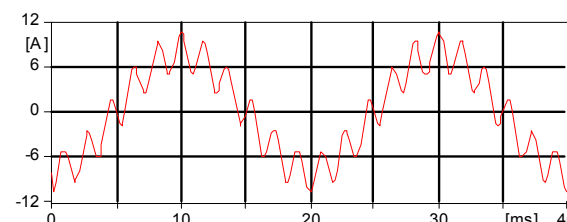
(file prady.pl4; x-var t) c:X0021A-X0026A

Wariant 5



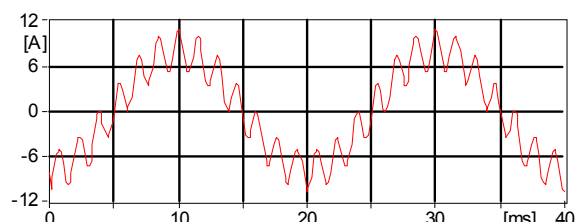
(file prady.pl4; x-var t) c:X0021A-X0026A

Wariant 6



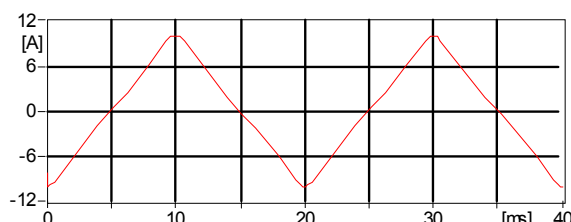
(file prady.pl4; x-var t) c:X0021A-X0026A

Wariant 7



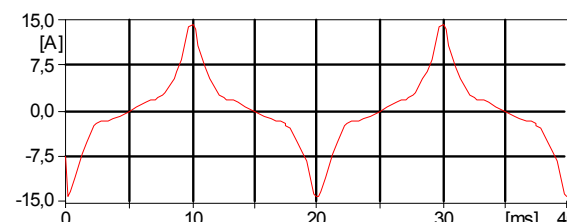
(file prady.pl4; x-var t) c:X0021A-X0026A

Wariant 8



(file prady.pl4; x-var t) c:X0004A-X0026A

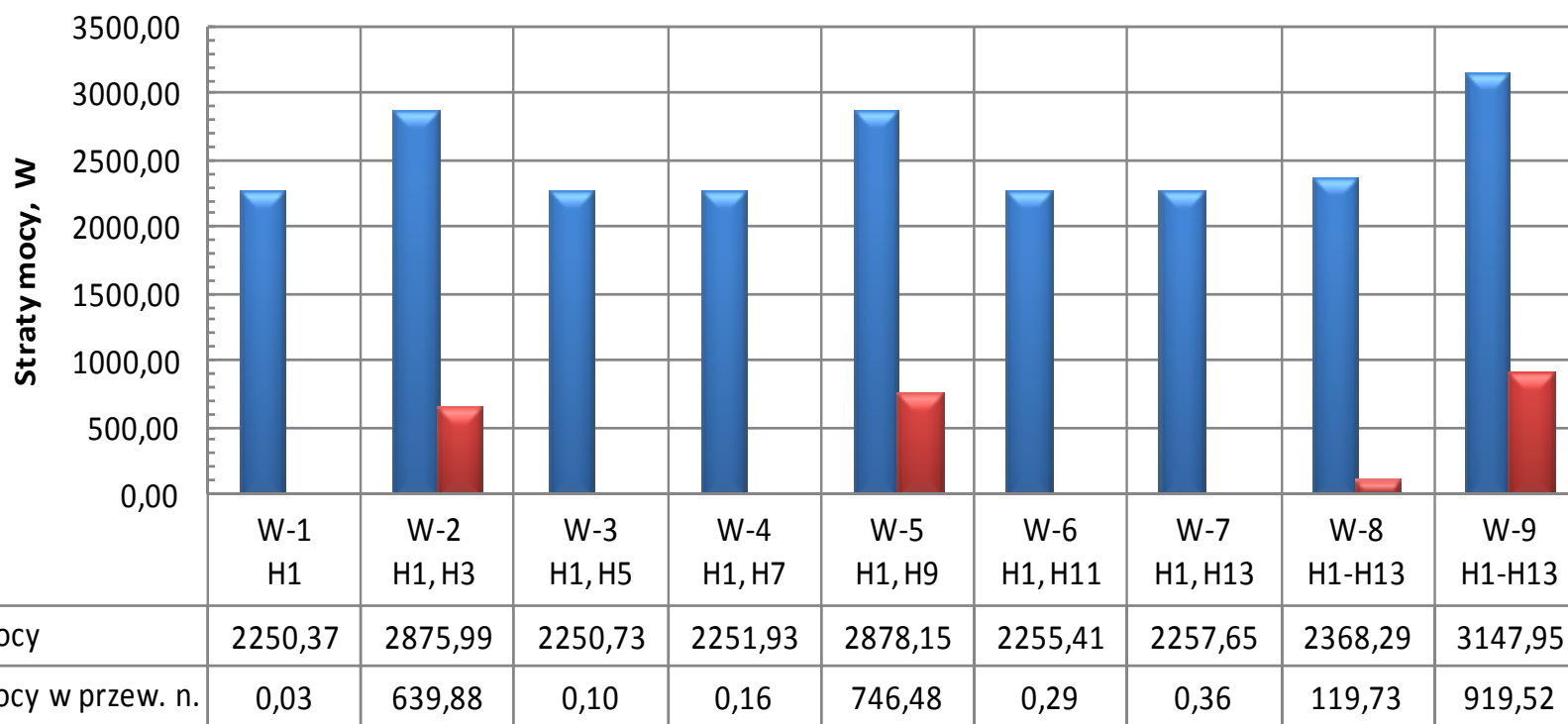
Wariant 9



(file prady.pl4; x-var t) c:X0004A-X0026A

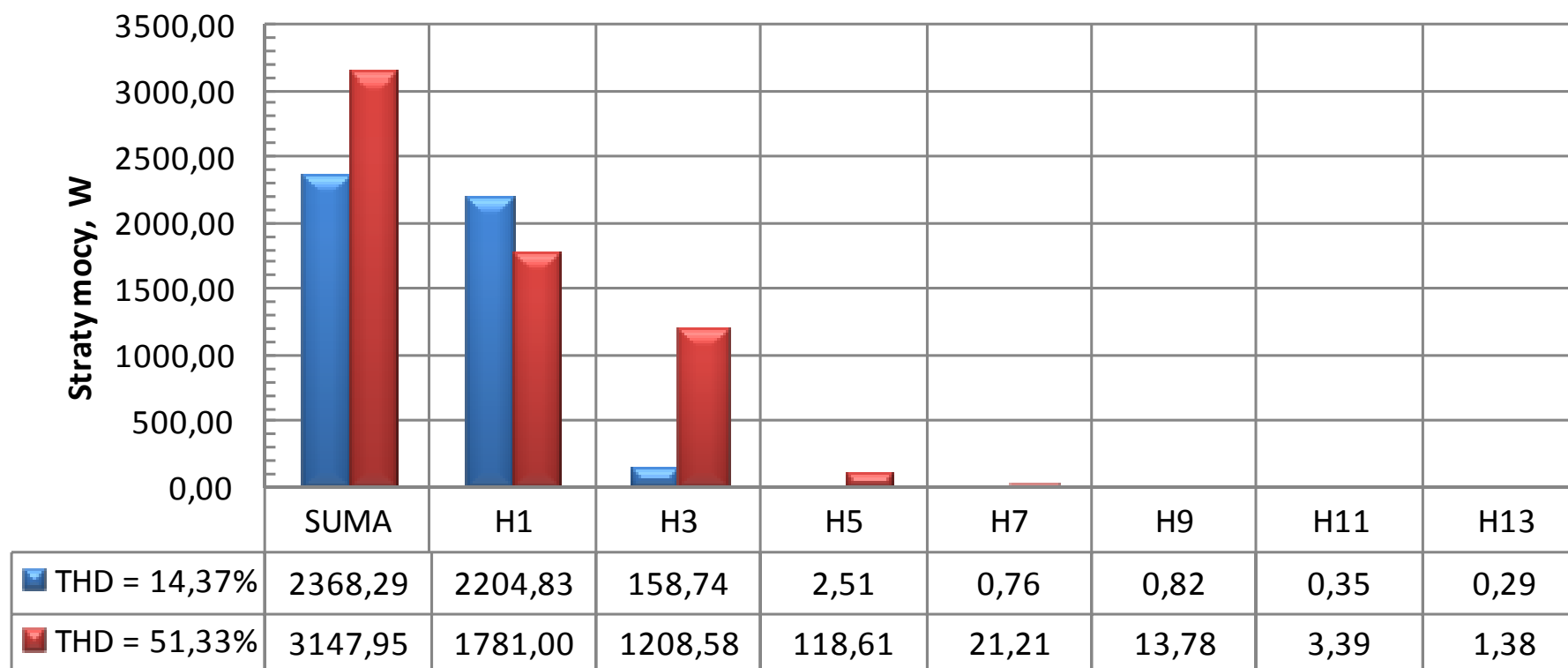
## Wyniki obliczeń strat mocy w linii

- Całkowite straty mocy w linii nN oraz straty mocy w przewodach neutralnych w wariantach W1-W9



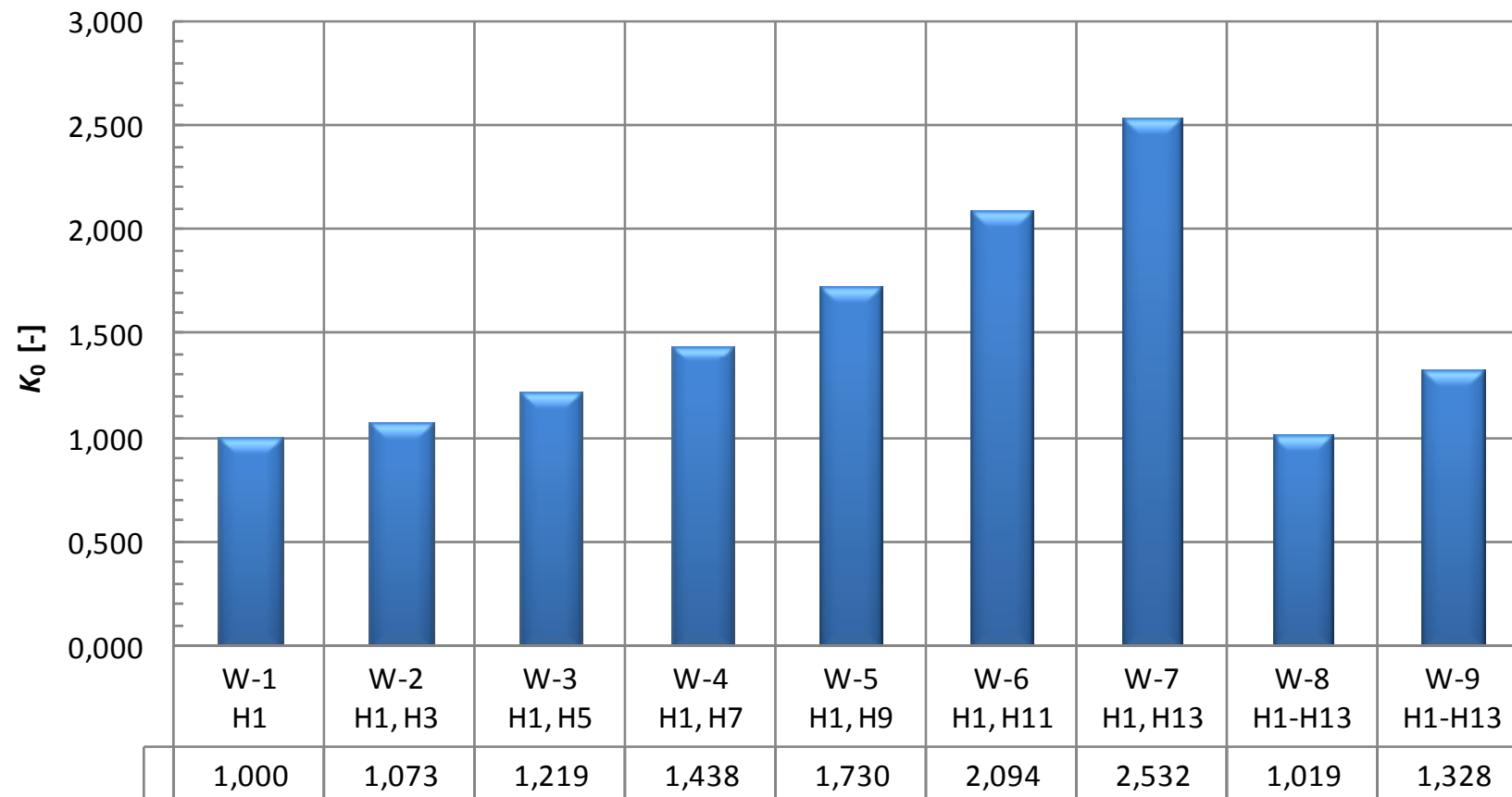
## Wyniki obliczeń strat mocy w linii

- Całkowite straty mocy w linii nN wywołane poszczególnymi prądami harmonicznymi w wariantach W-8 i W-9



## Wyniki obliczeń strat mocy w transformatorze

- Wartości współczynnika  $K_0$  dla analizowanych wariantów obciążenia





## Wnioski

- Należy zwrócić uwagę na fakt, że różne czynniki wpływają na wielkość zmian strat mocy w liniach i w transformatorach.
  - W liniach najistotniejsze są straty wywołane harmonicznymi o krotności rzędu 3.
  - Natomiast w transformatorach straty dodatkowe silnie zależą od stopnia odkształcenia prądu – można wskazać na harmoniczne wyższych rzędów, jako główną przyczynę wzrostu strat dodatkowych.

## **4. Straty w pozostałych elementach sieci i instalacji**



# Straty w kondensatorach

## Straty w bateriach kondensatorów

$$\Delta P_C = \Delta P_{Cj} \cdot Q_j$$

- $\Delta P_{Cj}$  – całkowite straty jednostkowe w baterii kondensatorów [W/kvar]  
 $Q_j$  – moc baterii kondensatorów [kvar]

Rodzaj baterii kondensatorów	Bateria kondensatorów			
	bez rezystorów rozładowczych	łącznie z rezystorami rozładowczymi	łącznie z bezpiecznikami, stycznikami, kablami	w układach z dławikami ochronnymi
	Straty mocy czynnej [W/kvar]			
Na niskie napięcie nn (do 1 kV)	≤ 0,2	< 0,7	< 2,5	< 7
Na średnie napięcie SN (do 30 kV)	≈(0,07 – 0,25)			

# Straty w licznikach energii elektrycznej

## Straty w licznikach:

$$\Delta P_{liczn} = n_1 \Delta P_{1f} + n_{1e} \Delta P_{1fe} + n_2 \Delta P_{3f} + n_{2e} \Delta P_{3fe}$$

gdzie:  $\Delta P_{1f}$  – straty mocy w liczniku indukcyjnym jednofazowym,  $\Delta P_{3f}$  – straty mocy w liczniku indukcyjnym trójfazowym,  $\Delta P_{1fe}$  – straty mocy w liczniku elektronicznym jednofazowym,  $\Delta P_{3fe}$  – straty mocy w liczniku elektronicznym trójfazowym,  $n_1$  – liczba liczników indukcyjnych jednofazowych,  $n_2$  – liczba liczników indukcyjnych trójfazowych,  $n_{1e}$  – liczba liczników elektronicznych jednofazowych,  $n_{2e}$  – liczba liczników elektronicznych trójfazowych.

Liczniki energii elektrycznej	Straty mocy czynnej [W/licznik]	
	jednofazowe	trójfazowe
Liczniki indukcyjne	(3,2 – 3,4)	7,2
Liczniki elektroniczne	(0,8 – 1,1)	(1,0 – 1,2)

## Straty w przyłączach i WLZ

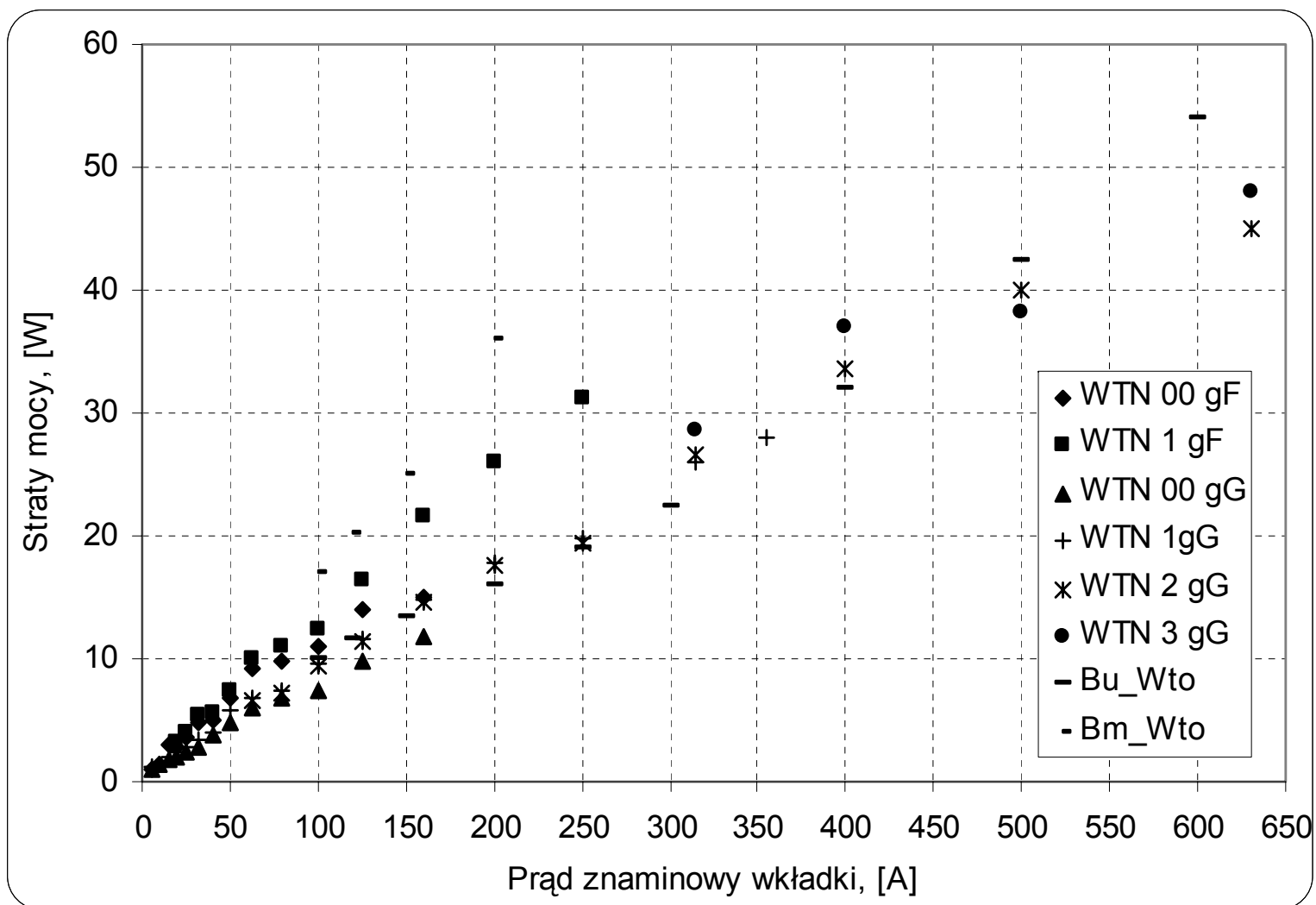
??? – duży problem – szacunkowo:

$$\Delta E_p = 0,003 E$$

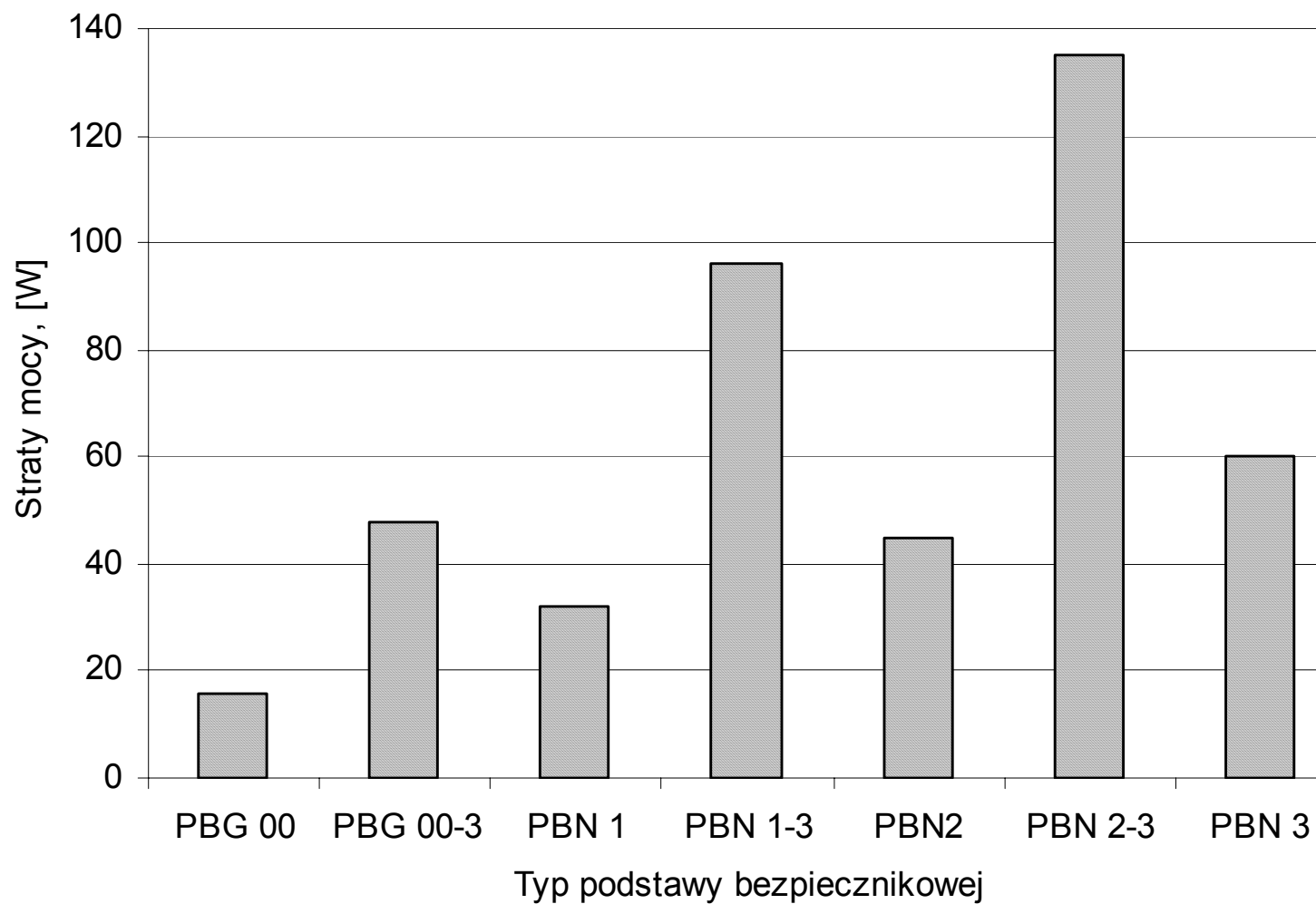
$$\Delta E_{wlz} = 0,003 E$$

- $\Delta E_p$  – straty energii w przyłączach
- $\Delta E_{wlz}$  – straty energii w WLZ
- $E$  – energia przepływająca przez przyłącze i WLZ

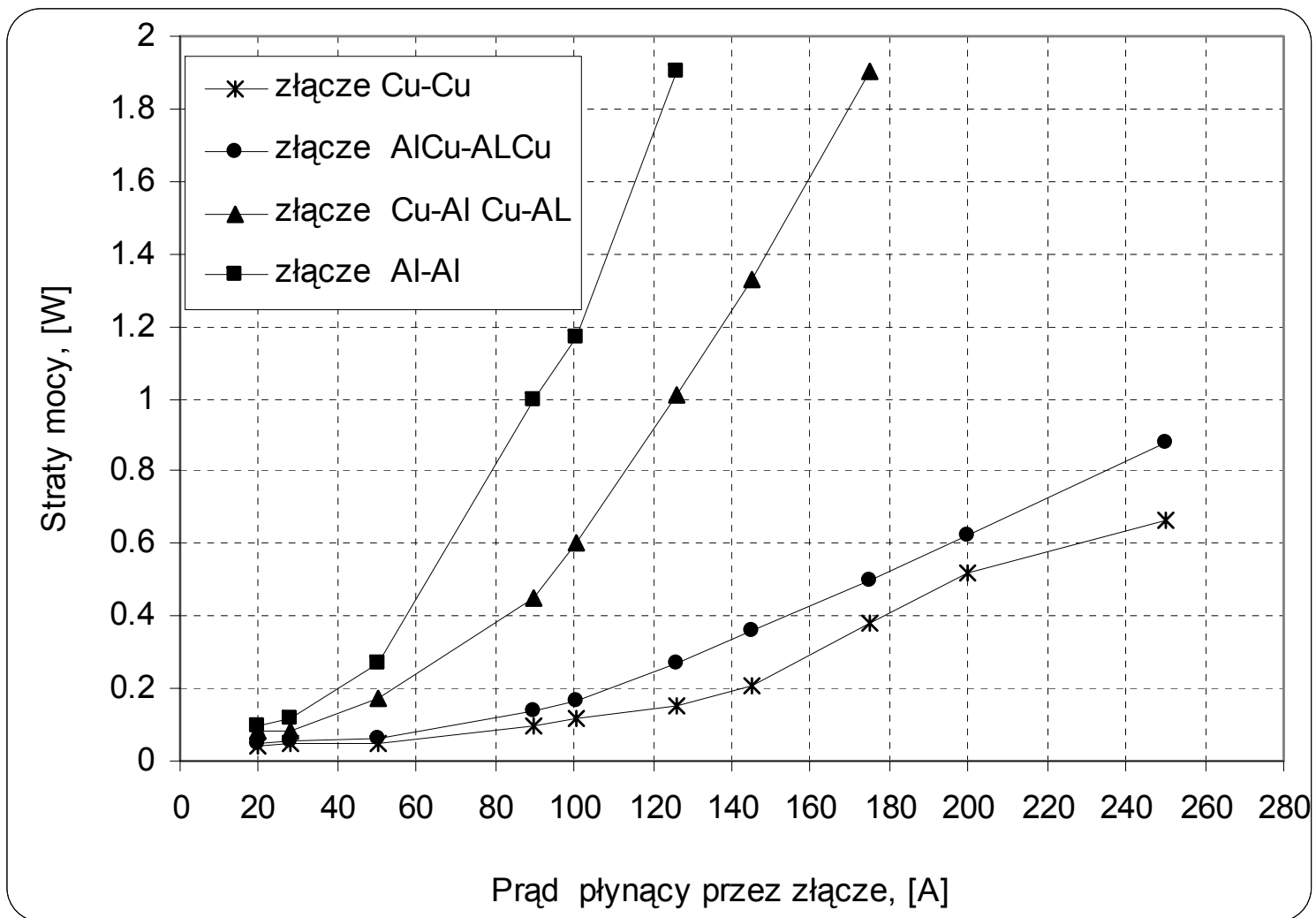
# Straty mocy w bezpiecznikach



# Straty mocy w bezpiecznikach



# Straty mocy w zestykach



## 6 komputerów, 12 monitorów

Wielkość	Stand by	Obciążenie
Wartość skuteczna napięcia, V	227,6	227,2
Wartość skuteczna prądu, A	1,50	2,18
Współczynnik THD prądu, %	138	155
Moc czynna, W	188	280
Moc bierna przesunięcia, VAr	62	72
Moc bierna odkształcenia, VAr	280	399
Moc pozorna, VA	343	492
Współczynnik mocy, —	0,50	0,56
Współczynnik mocy pierwszych. harmonicznym, —	0,95	0,96

Dziękuję za uwagę  
i zapraszam do dyskusji