



Studia Podyplomowe

# EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ

w ramach projektu

**Śląsko-Małopolskie Centrum Kompetencji  
Zarządzania Energią**

## **JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ – ZMIANA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA**

**dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka, prof. AGH**

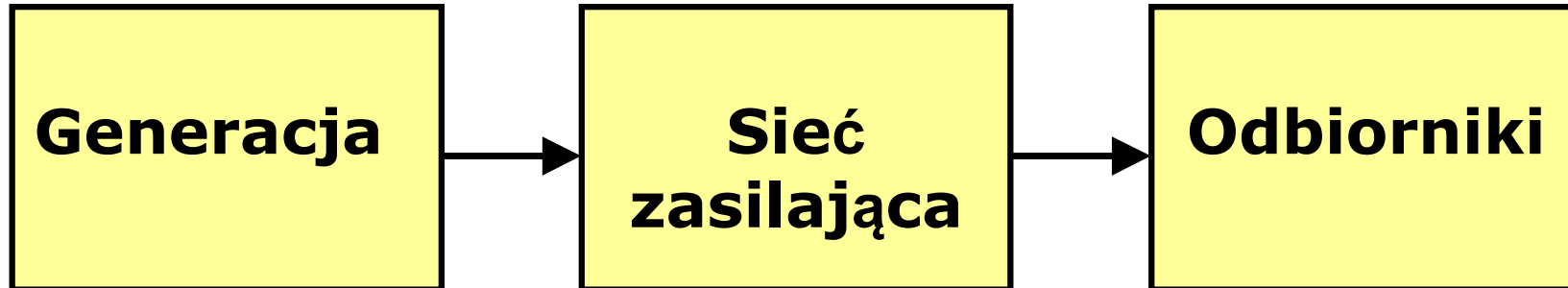


AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

# **JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ - ZMIANA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA**

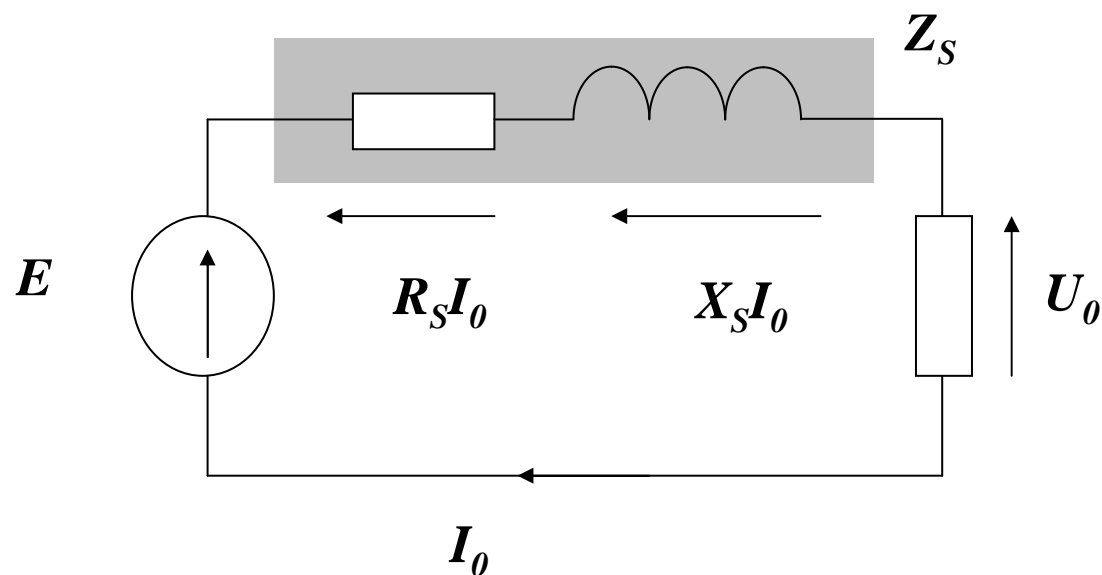
**Zbigniew HANZELKA**

# ZMIANA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA

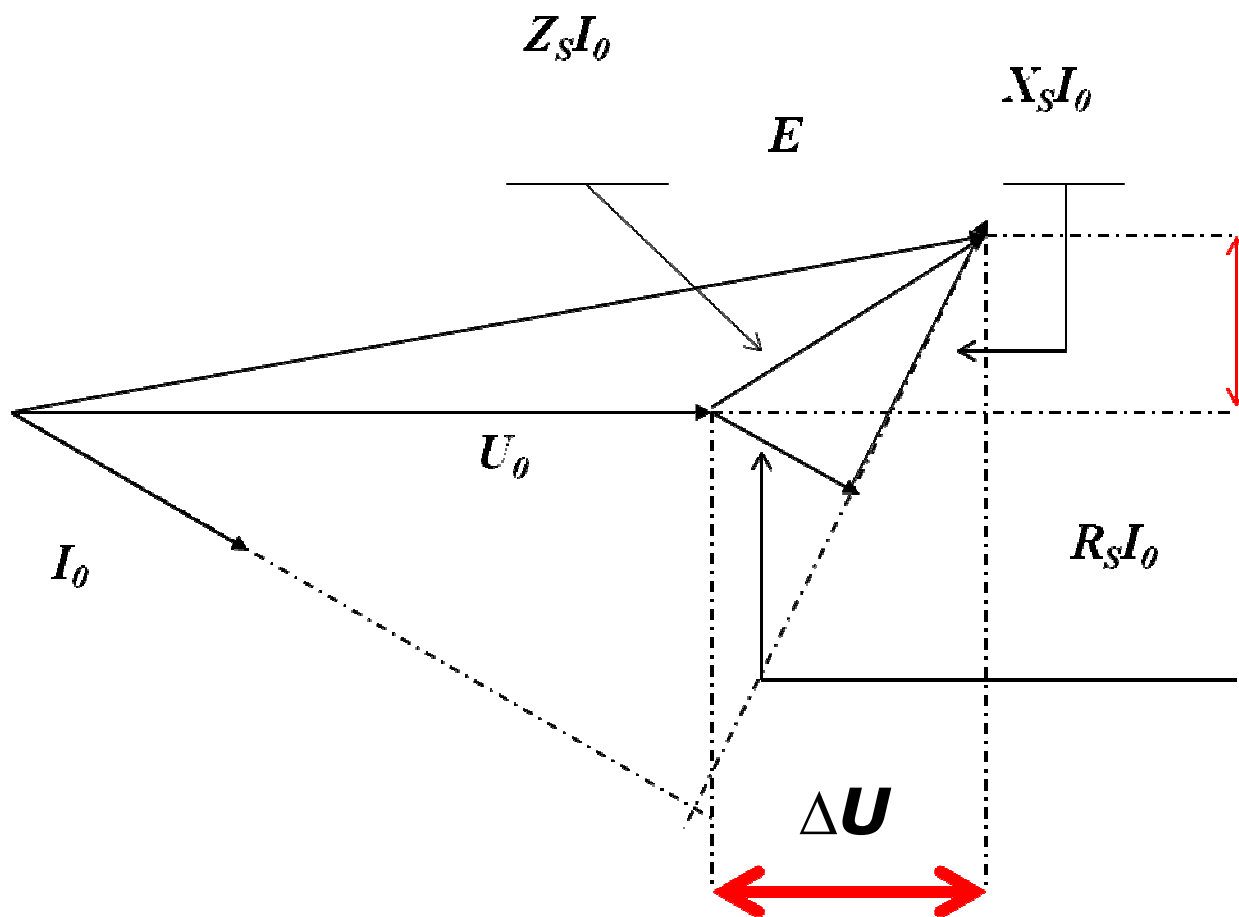


- **Generacja** – dostosowuje się do zmieniających się warunków obciążenia, utrzymując równowagę pomiędzy produkcją i konsumpcją energii
- **Sieć zasilająca** – zmieniająca swoją strukturę na skutek łączeń i podlegająca wpływom np. zwarć,
- **Odbiorniki** – o zmiennym poborze mocy czynnej i biernej (odbiorniki niespokojne)

# ZMIANA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA



# ZMIANA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA



**Wykres wskazowy**

## ZMIANA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA

$$\frac{E - U_0}{U_0} \approx \frac{\Delta U}{U_0} = R_S \frac{P}{U_0^2} + X_S \frac{Q}{U_0^2} \cong R_S \frac{P}{U_0^2} + \frac{Q}{S_{zw}}$$

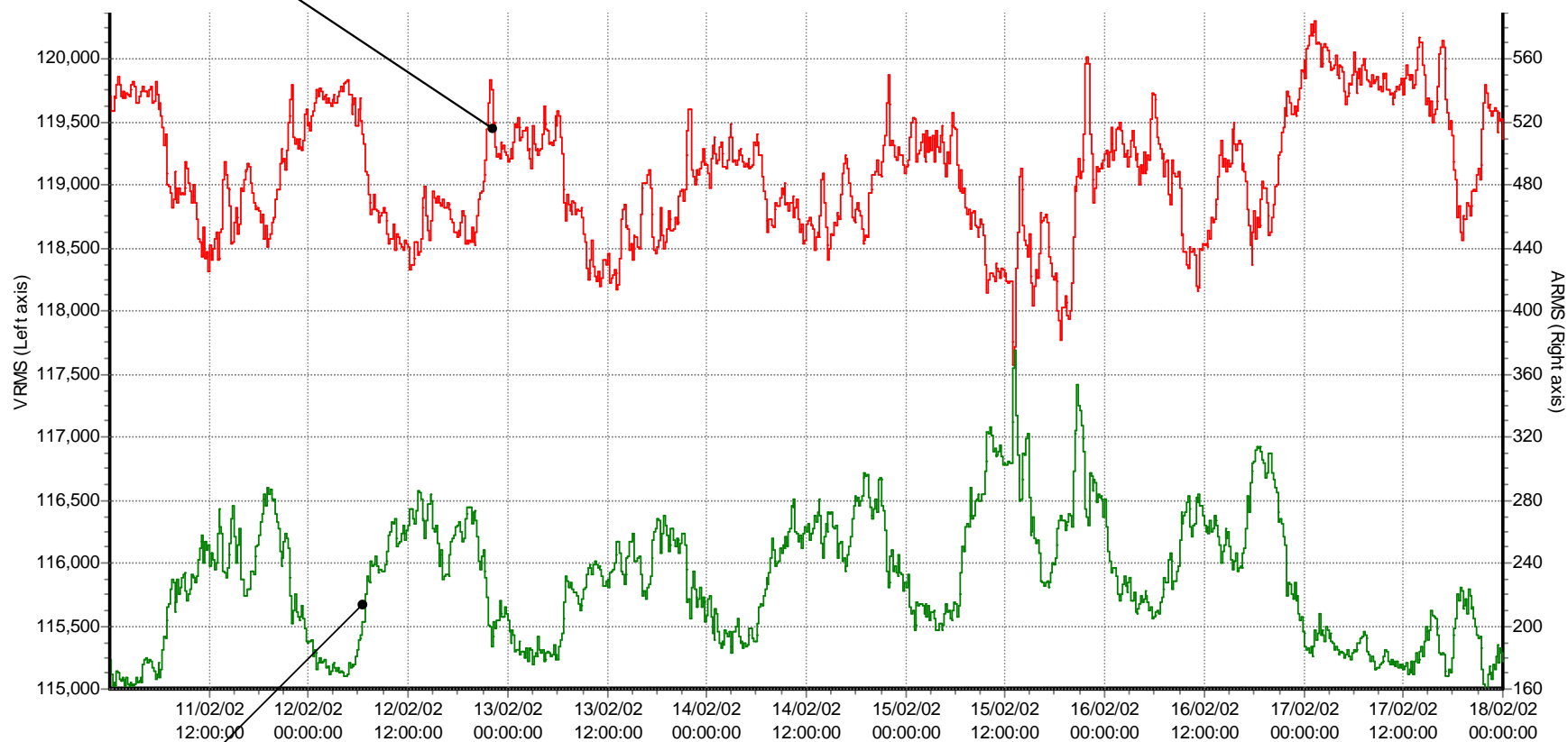
$$\frac{\Delta U}{U_0} \cong \frac{Q}{S_{zw}}$$

**$P, Q$**  - moce: czynna i bierna odbiornika,  
 **$S_{zw}$**  - moc zwarciowa w miejscu przyłączenia



# ZMIANA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA

napięcie

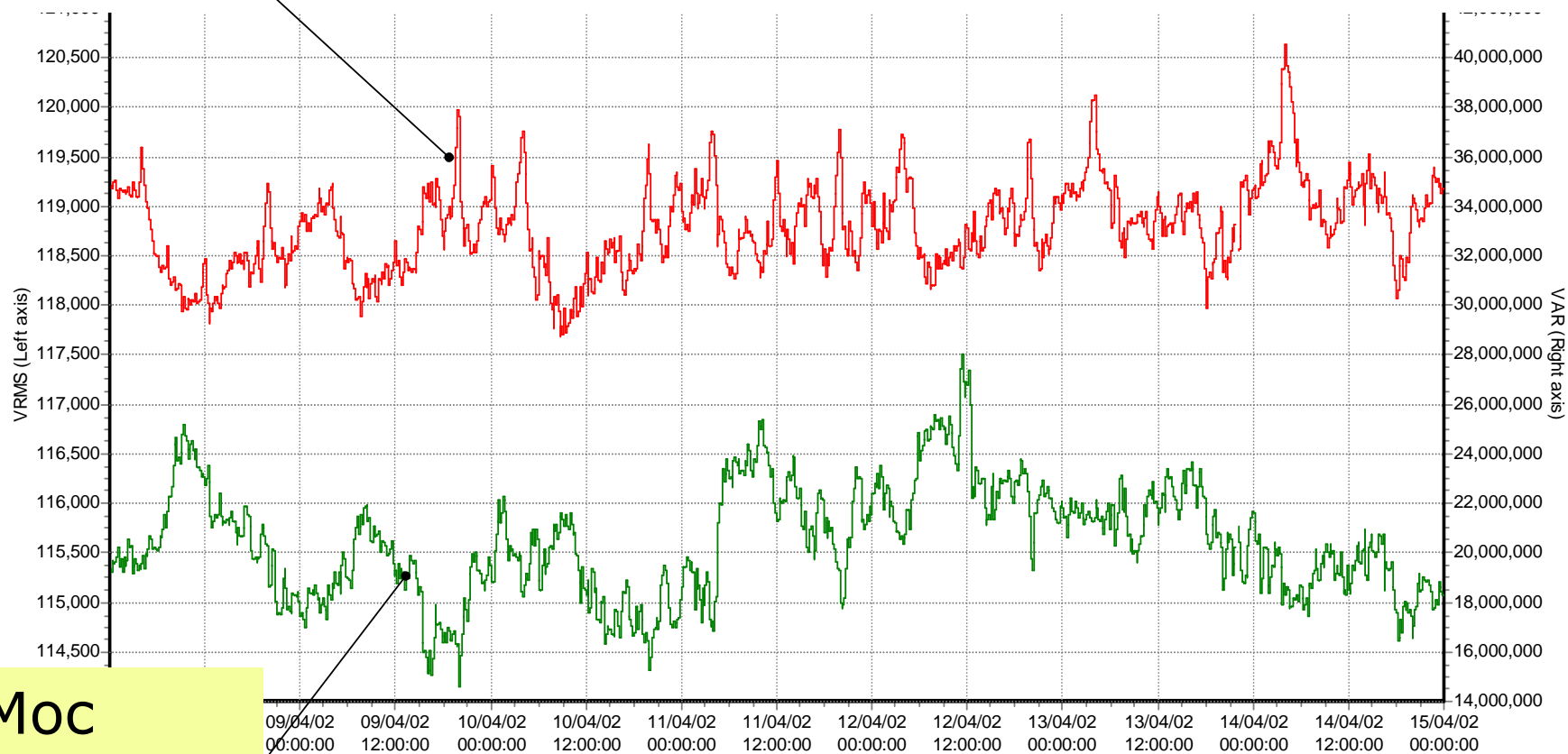


prąd



# ZMIANA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA

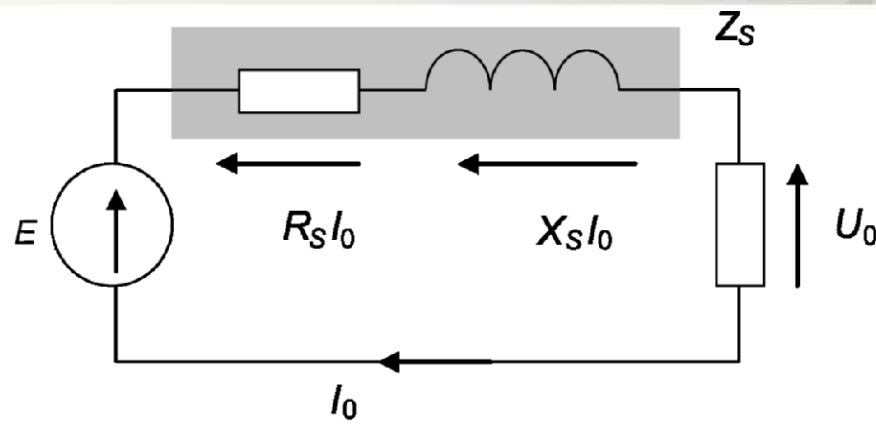
Napięcie



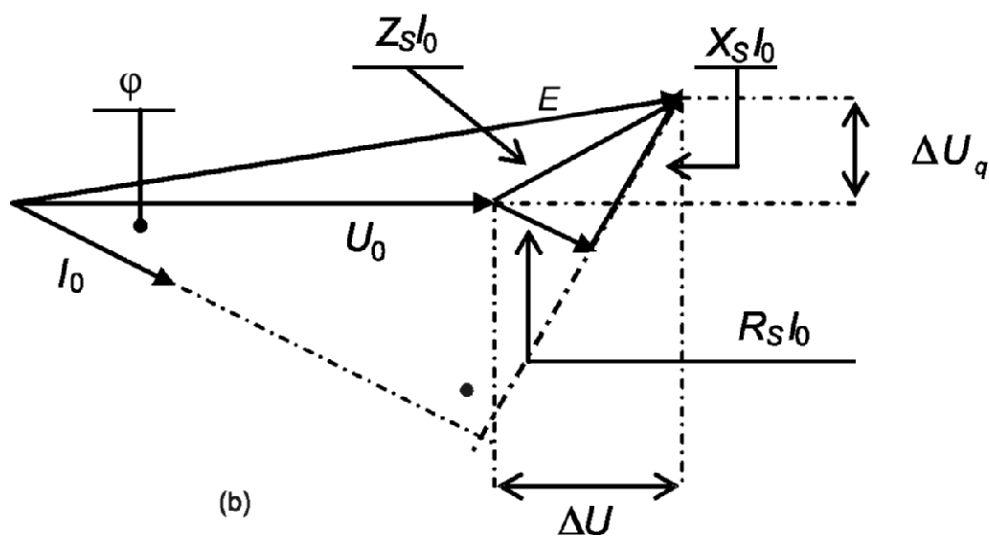
Moc  
bierna Q



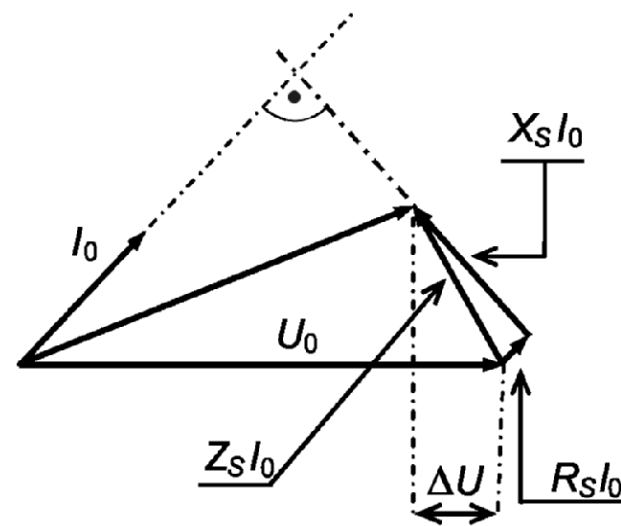
# ZMIANA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA



(a)



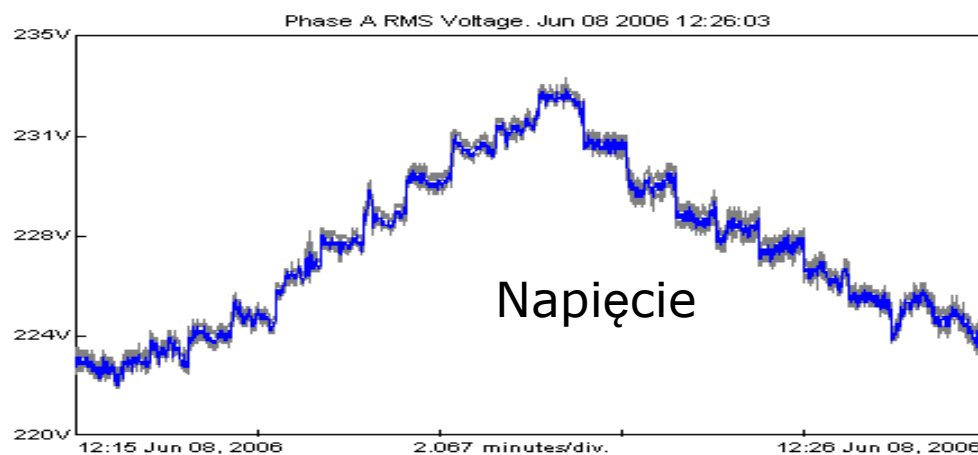
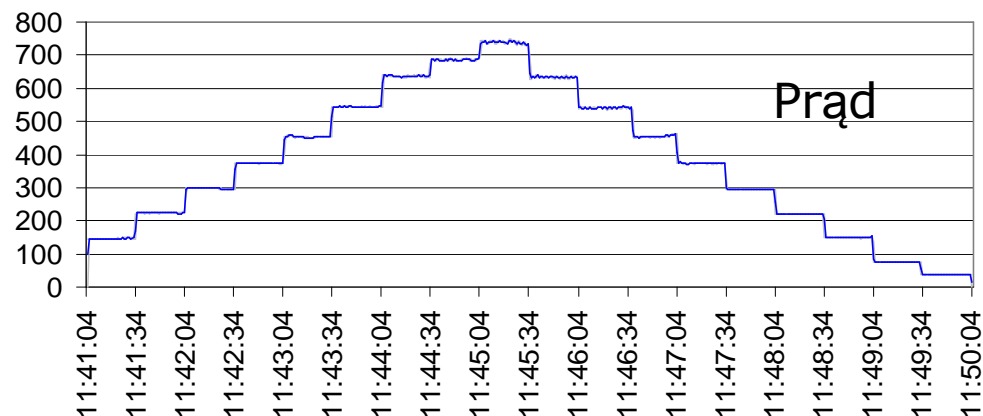
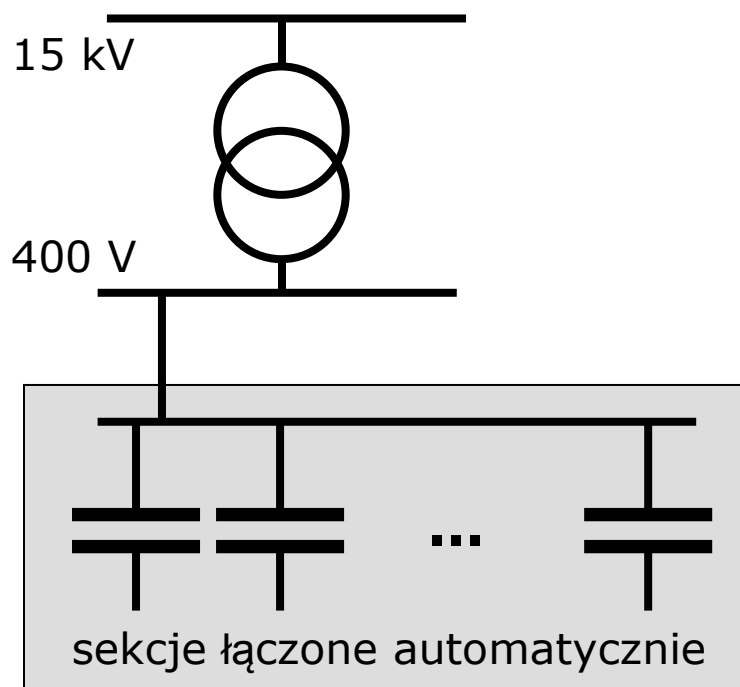
(b)



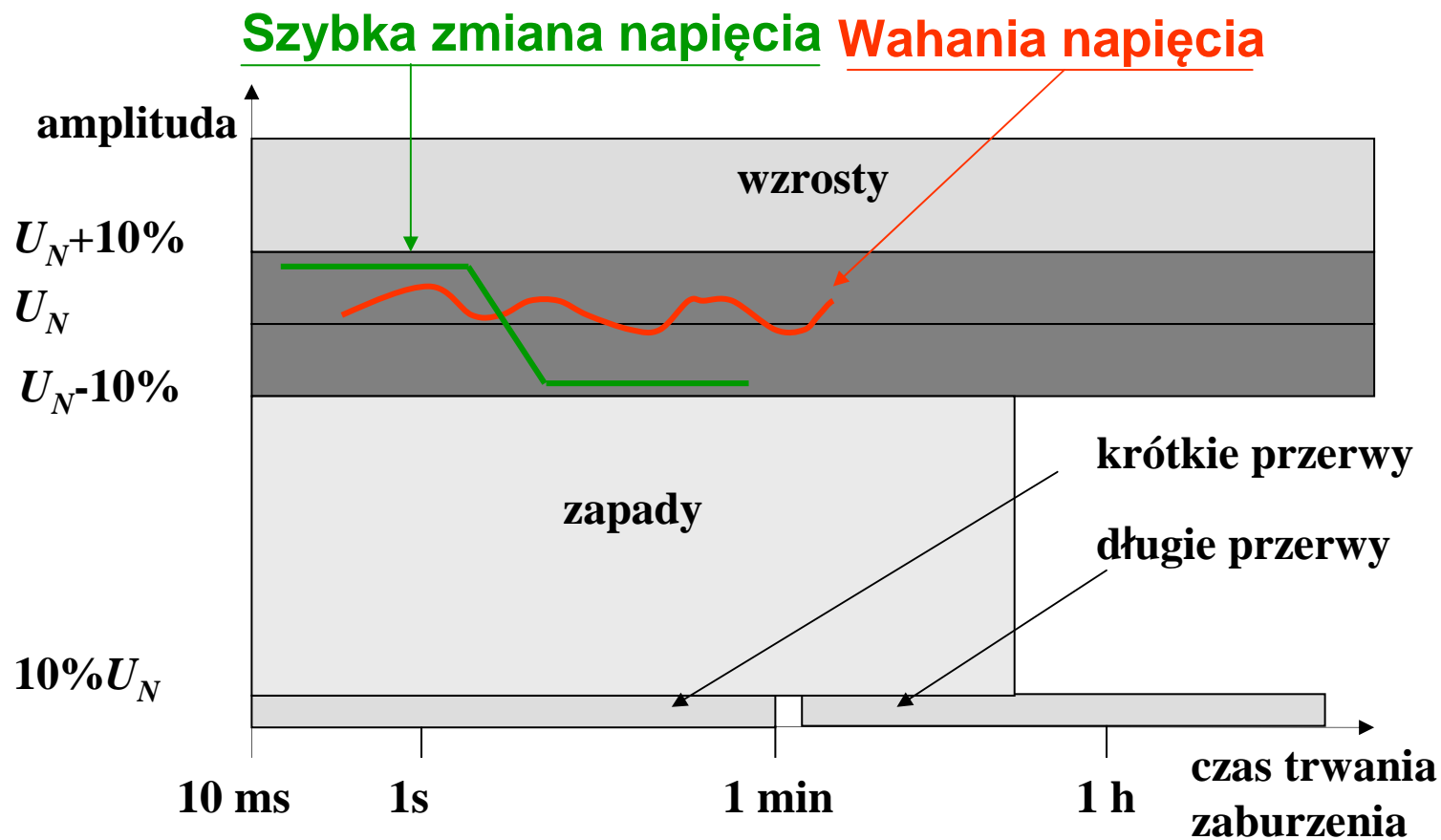
(c)



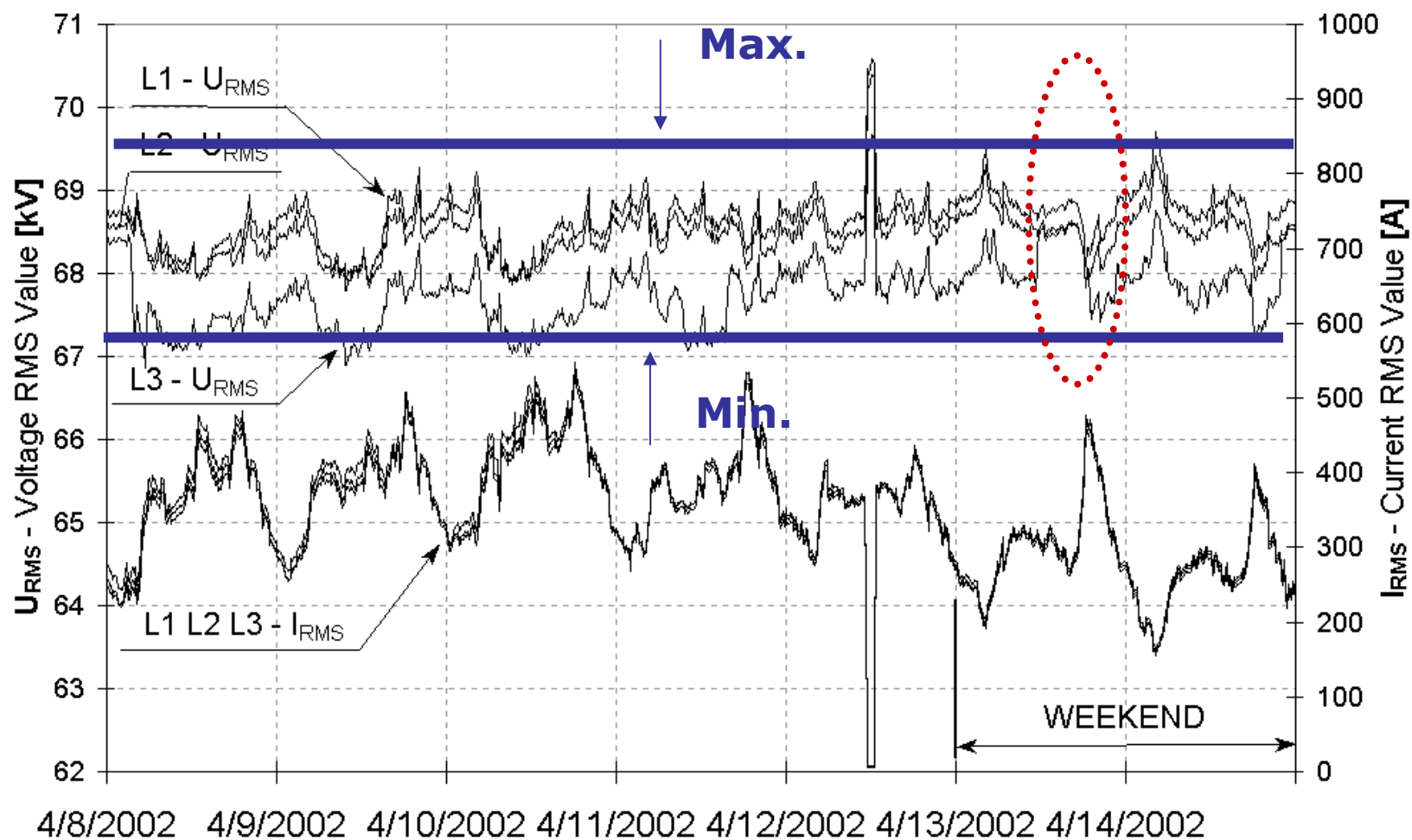
# ZMIANA WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA



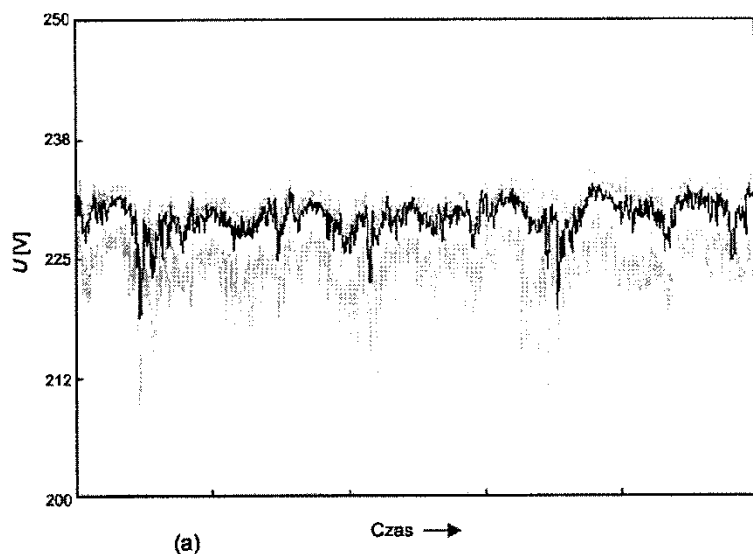
# ZMIANY WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA



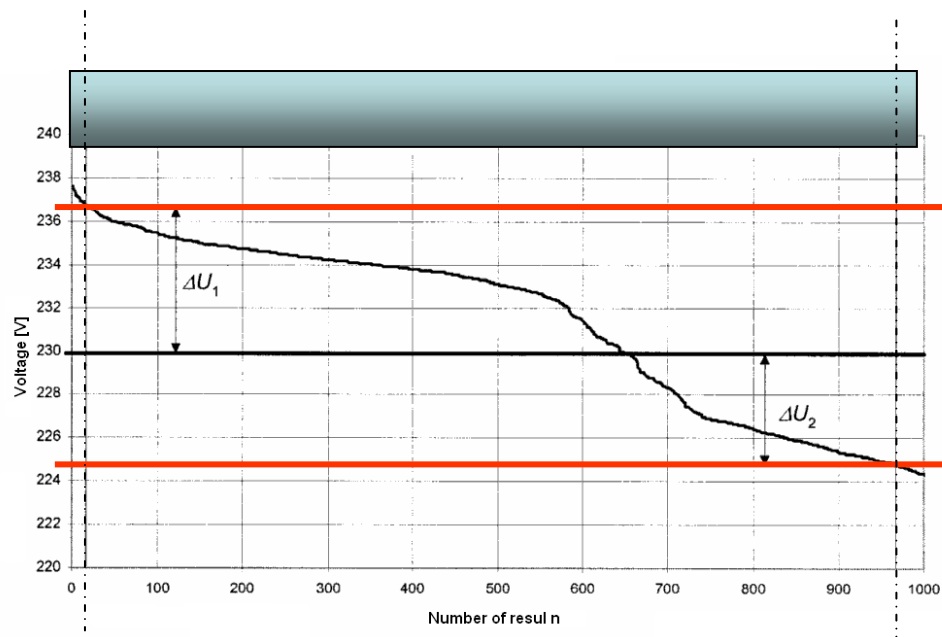
# ZMIANY WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA



## Miary statystyczne



**(a)**  
Zmiana w czasie wartości skutecznej napięcia w okresie jednego tygodnia (100%);



**(b)**  
Charakterystyka uporządkowana oraz percentyle CP05 i CP95 (dopisać CP05 i CP95)



# ZMIANY WARTOŚCI SKUTECZNEJ NAPIĘCIA

**W każdym tygodniu 95 % ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych napięcia zasilającego powinno, wyłączając przerwy w zasilaniu mieścić się w przedziale odchyień:**

## Grupa przyłączeniowa I i II

- (a) **+/-10 %** napięcia znamionowego dla sieci o napięciu znamionowym 110 kV i 220 kV
- (b) **+5%/-10%** napięcia znamionowego dla sieci o napięciu znamionowym 400 kV

## Grupa przyłączeniowa III-V

**W każdym tygodniu 95 % ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych napięcia zasilającego powinno, wyłączając przerwy w zasilaniu mieścić się w przedziale odchyień +/- 10 % napięcia znamionowego**



## ROZPORZĄDZENIE SYSTEMOWE .....

... warunkiem utrzymania parametrów napięcia zasilającego w określonych granicach jest pobieranie przez odbiorcę mocy czynnej nie większej od mocy umownej, przy współczynniku  $\text{tg}\varphi$  nie większym niż 0,4.

Z analizy statystycznej będącej podstawą oceny jakości napięcia należy wykluczyć te wyniki pomiarów, które zostały zmierzone w warunkach przekroczenia mocy umownej lub wartości współczynnika  $\text{tg}\varphi > 0,4$ .

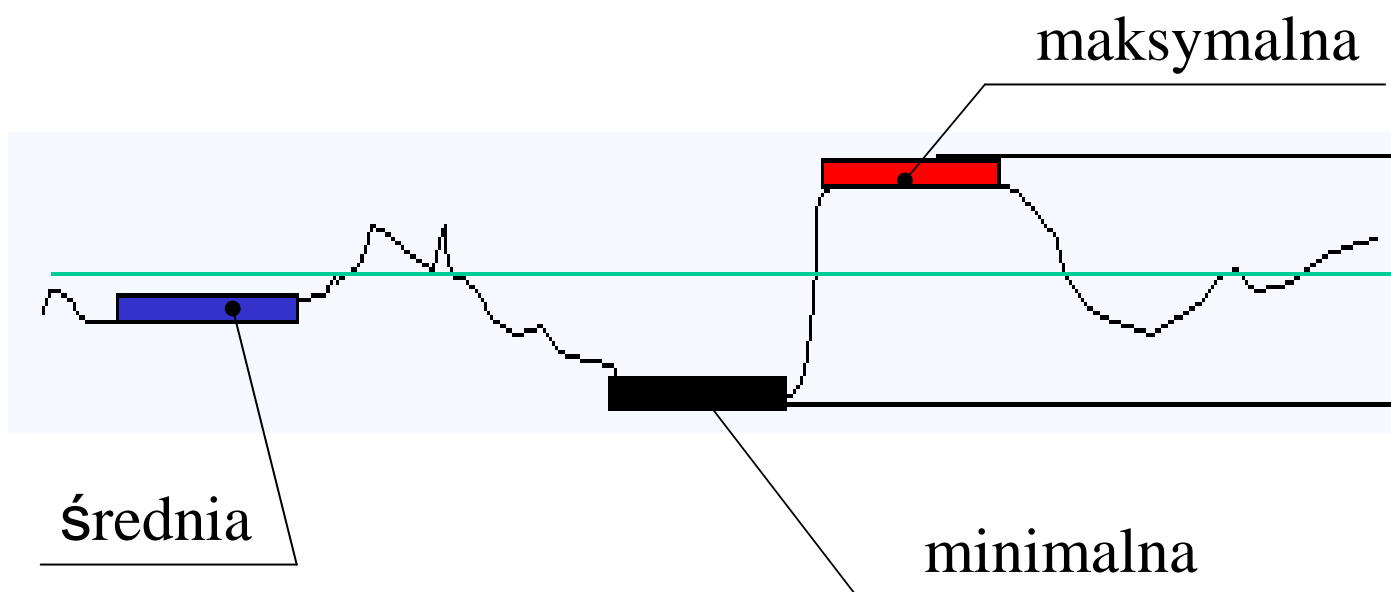
.....



# POMIAR NAPIĘCIA



$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$



$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

$$U_{rms-0,2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N u^2}{N}}$$

## Agregacja pomiarów

**przedział 3 s**

$$U_{rms-3s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} U_{rms-0,2s}^2}{15}}$$

**przedział 10 min**

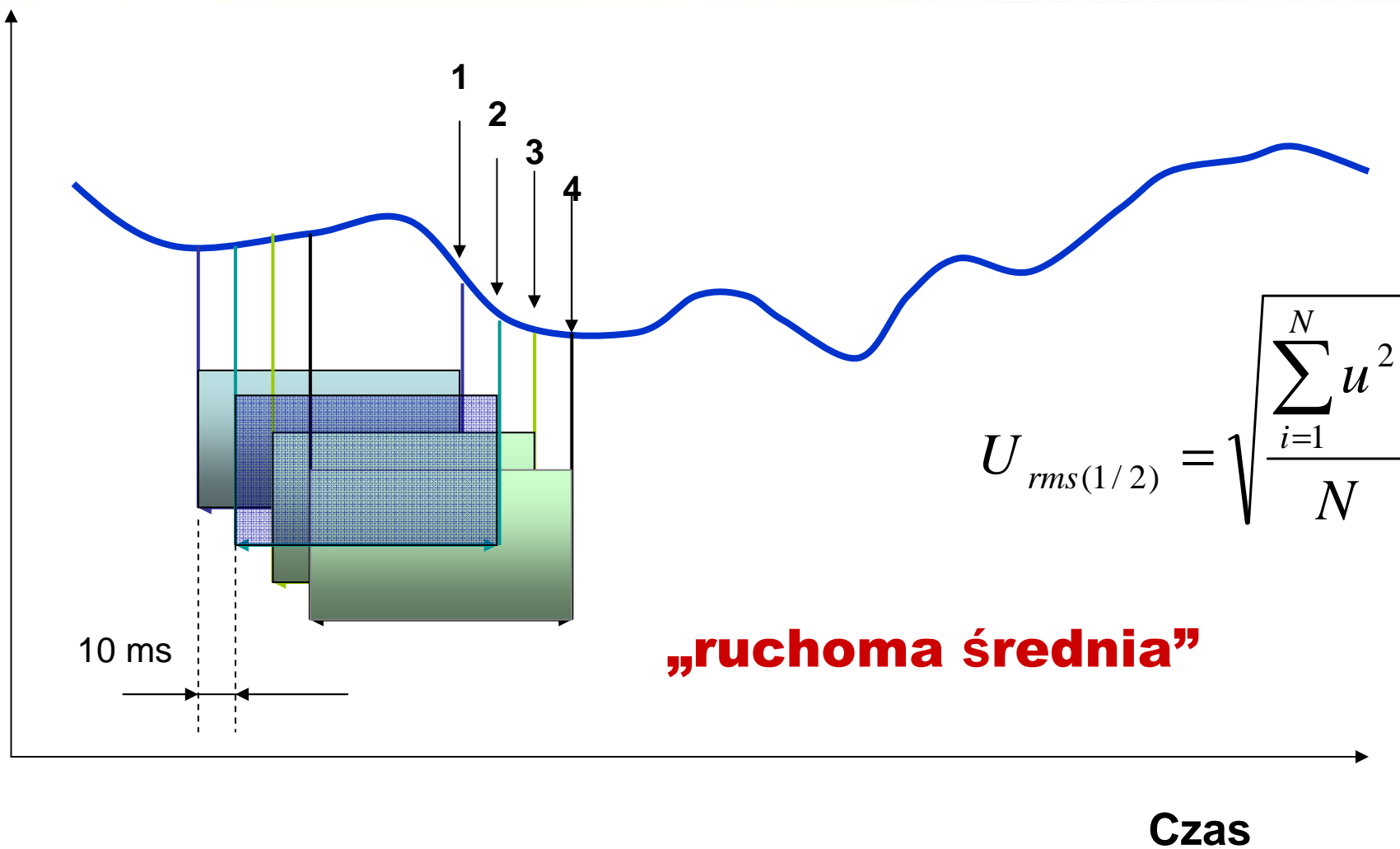
$$U_{rms-10min} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N U_{rms-0,2s}^2(i)}{k}}$$

**przedział 2 h**

$$U_{rms-2h} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} U_{rms-10min}^2}{12}}$$

gdzie:

$U_{rms-0,2}$  – wartość skuteczna zmierzona w oknie 10 okresowym,  
k – liczba próbek 10 okresowych w czasie 10 minut, dla 50 Hz k=3000,





**EN 61000-4-30: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), Część 4-30: Metody badań i pomiarów - Metody pomiaru jakości energii**

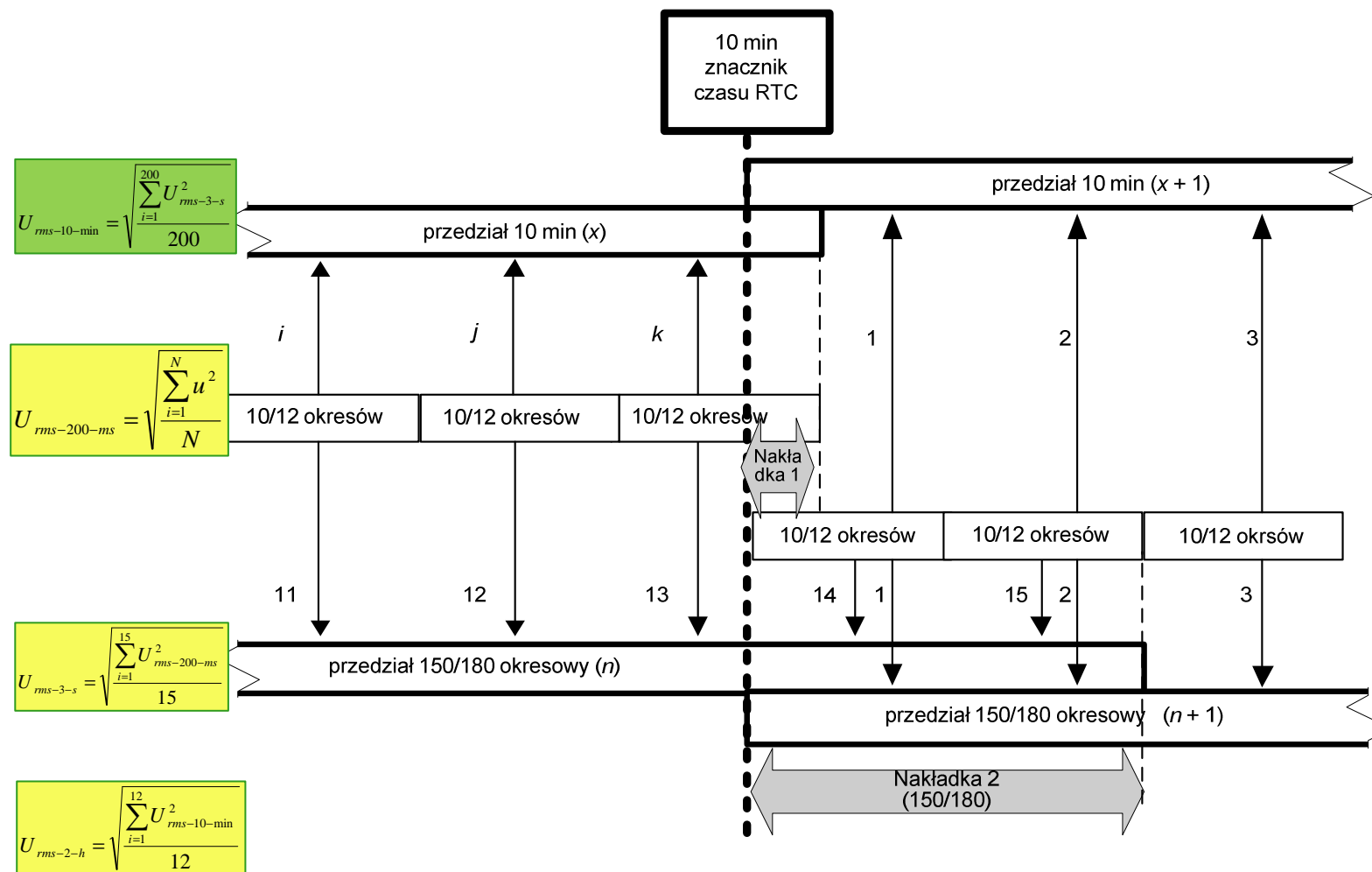


## Rodzaje mierników:

**klasa A** (wartość skuteczna uaktualniana co  $\frac{1}{2}$  okresu)

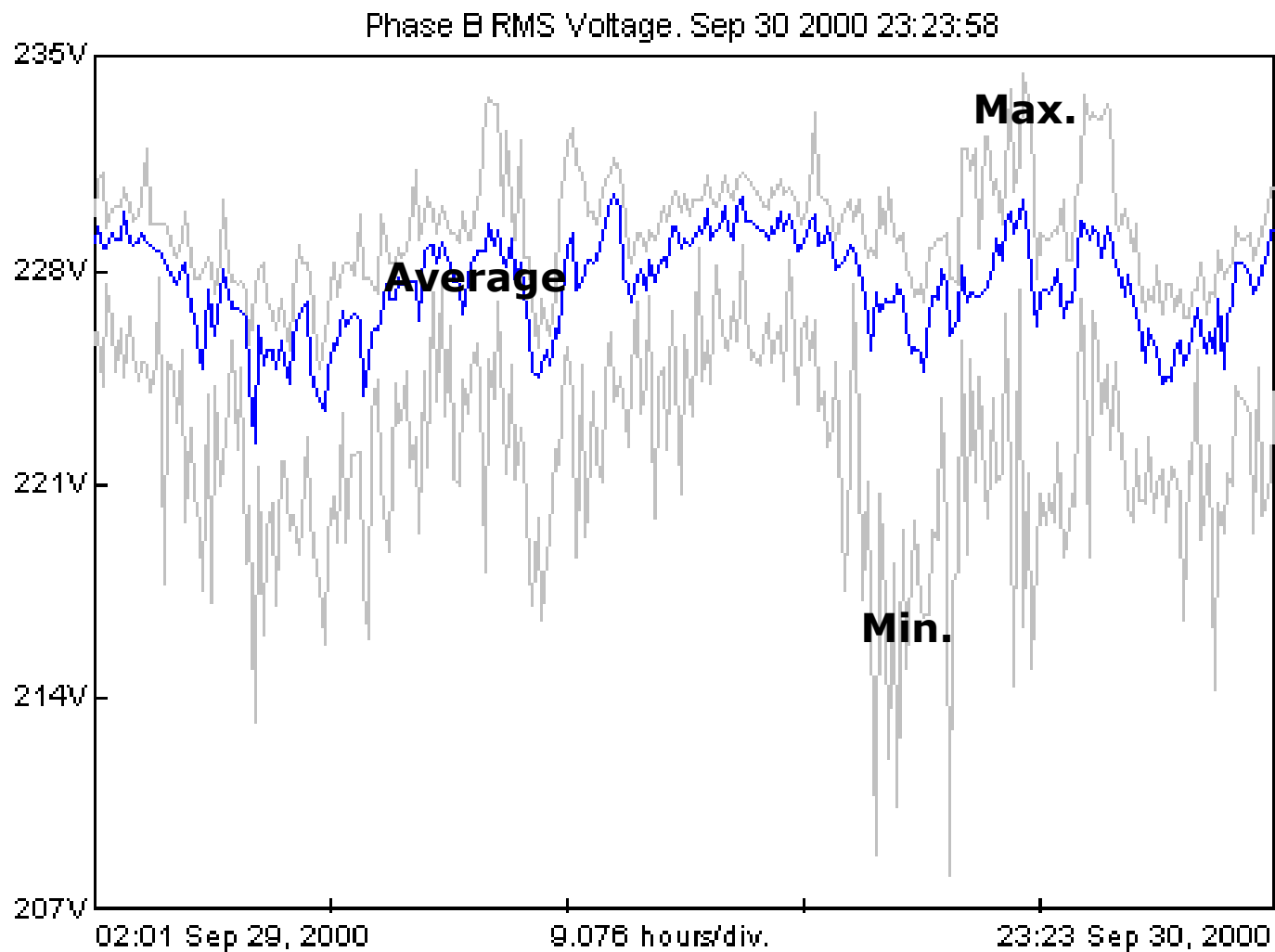
**klasa S** (wartość skuteczna uaktualniana co okres, mniejsze przedziały zmienności sygnałów wejściowych ...)

**klasa B**





# POMIAR NAPIĘCIA





**EN 50 160:**

**Parametry napięcia zasilającego  
w publicznych sieciach rozdzielczych**

## **Węgry**

**Zmiany napięcia powinny zawierać się w przedziale  $U_n \pm 7,5\%$  dla CP95 (10. minutowe wartości skuteczne)**

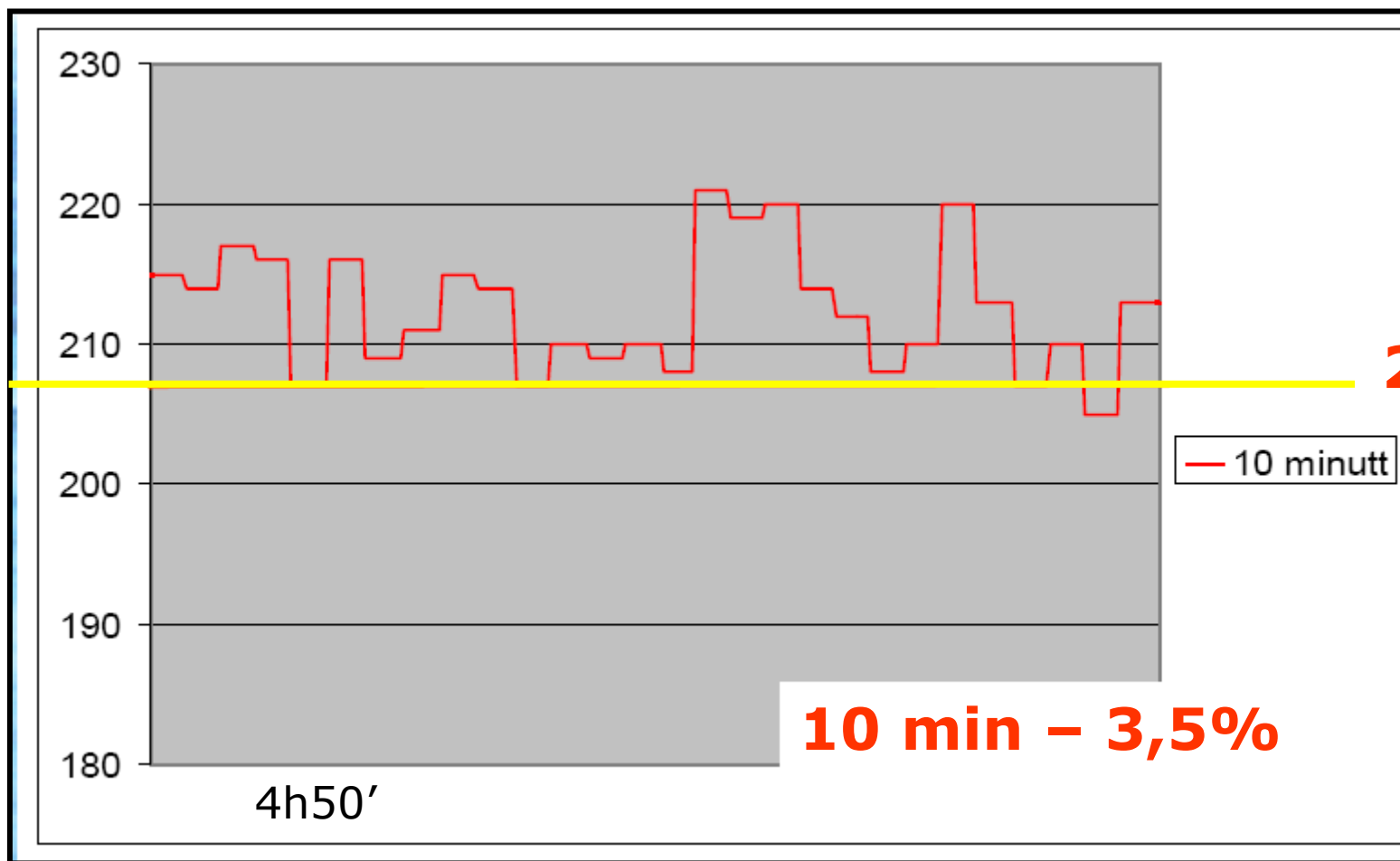
**Wszystkie 10. minutowe wartości skuteczne muszą być w przedziale  $+10\%$  i  $-15\%$  napięcia znamionowego**

**Powyższe wartości dopuszczalne dotyczą zarówno nN jak i SN**

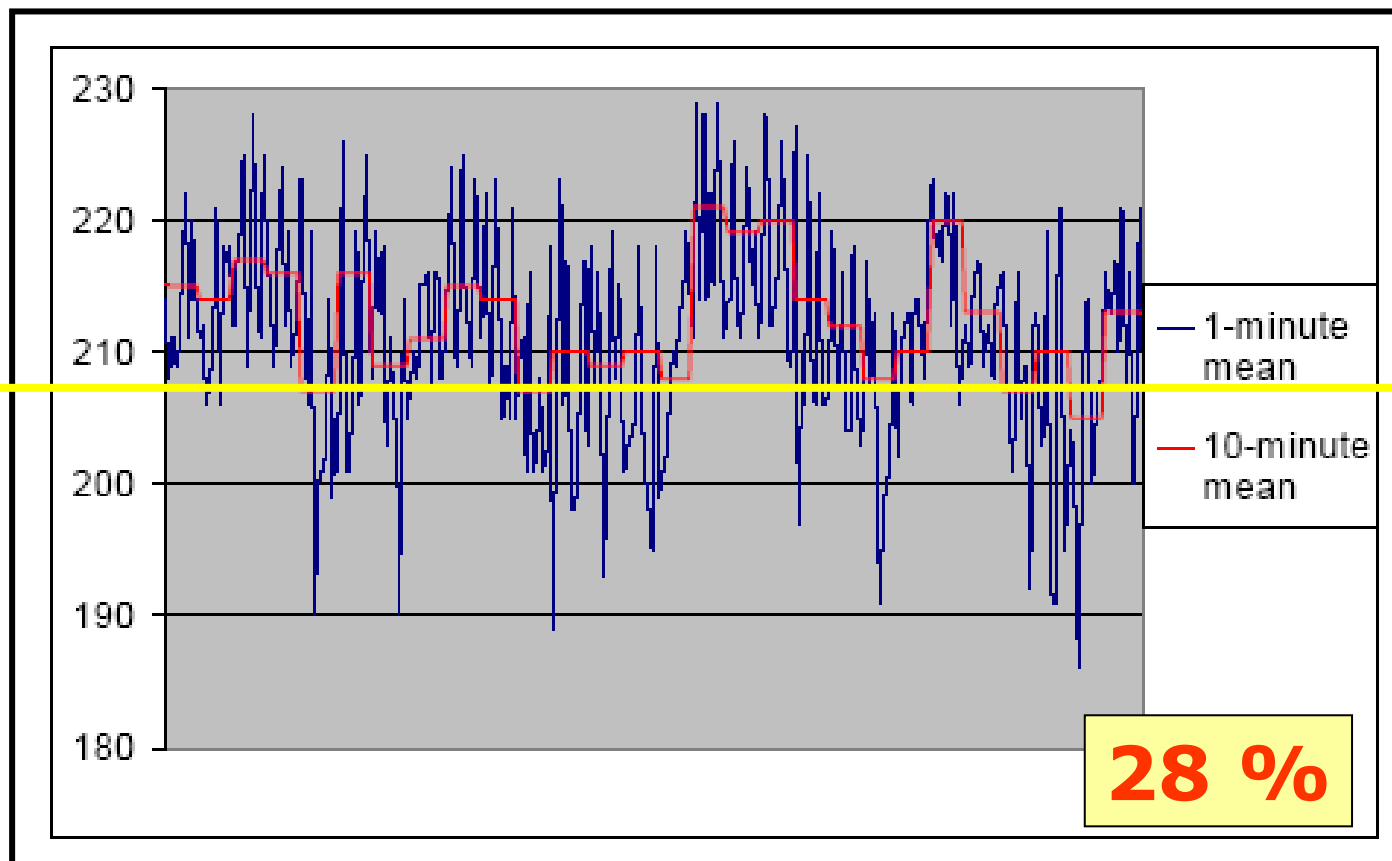




# POMIAR NAPIĘCIA



**207 V**



**10 min – 3,5% 1 min – 28,5%**



**EN 50 160:**

**Parametry napięcia zasilającego  
w publicznych sieciach rozdzielczych**

## **Węgry**

**Maksymalny poziom napięcia:  $U_n + 15\%$   
dla wartości średnich 1. minutowych**

**Powyższe wartości dopuszczalne dotyczą  
zarówno nN jak i SN**



# STABILIZACJA NAPIĘCIA

*autotransformatory lub transformatory z przełącznikami* zaczepów stosowane w wersji zarówno mechanicznej (od 15 do nawet 45s) jak i energoelektronicznej

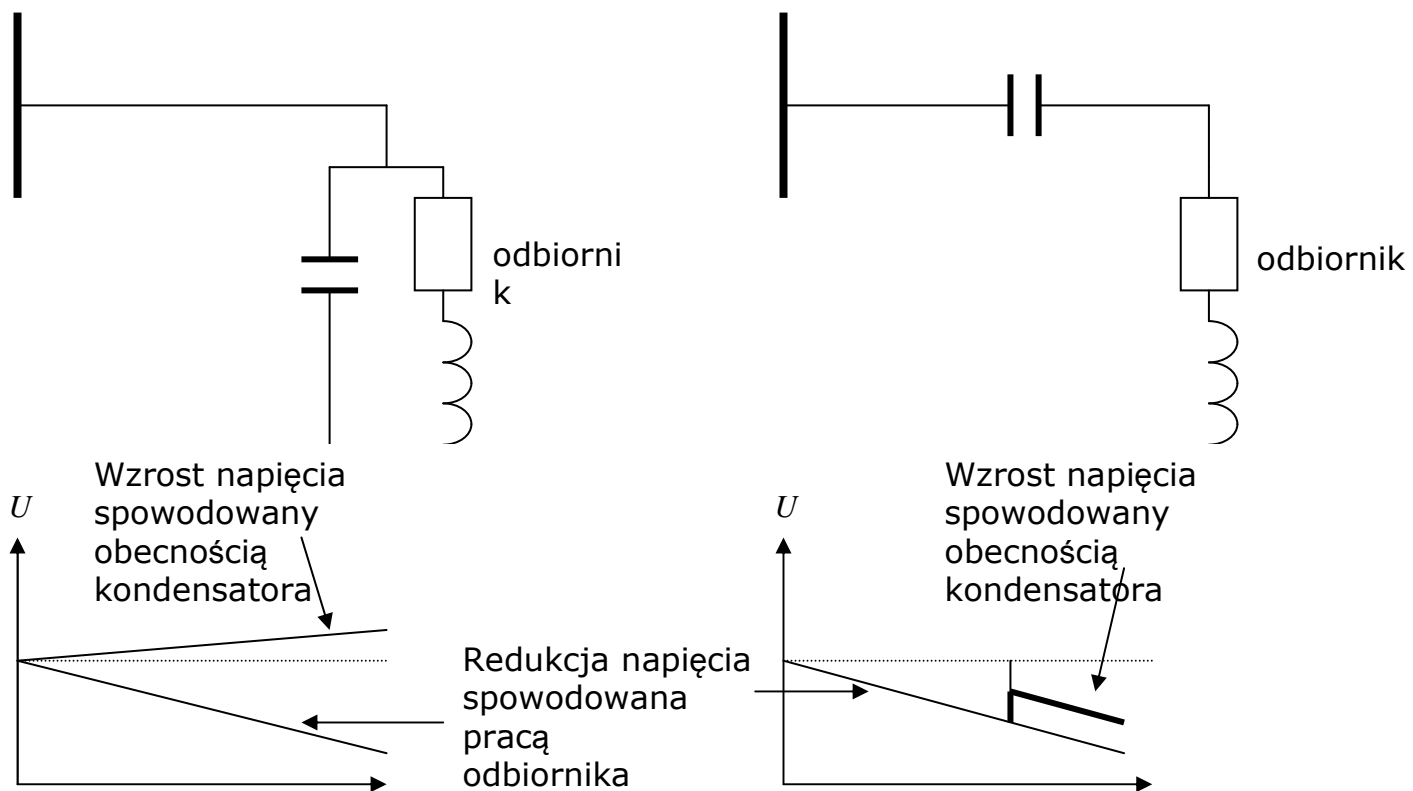
*skracanie obwodów sieci nN* przez zwiększanie liczby stacji transformatorowych  $SN/Nn$

*szeregowe transformatory regulacyjne* (jedno- lub trójfazowe)

*urządzenia regulacyjne* tj. UPS, transformatory ferorezonansowe, układy silnik-generator itp.

*regulacja napięcia poprzez zmianę rozptywu mocy biernej* (kondensatory: równoległe i szeregowy)

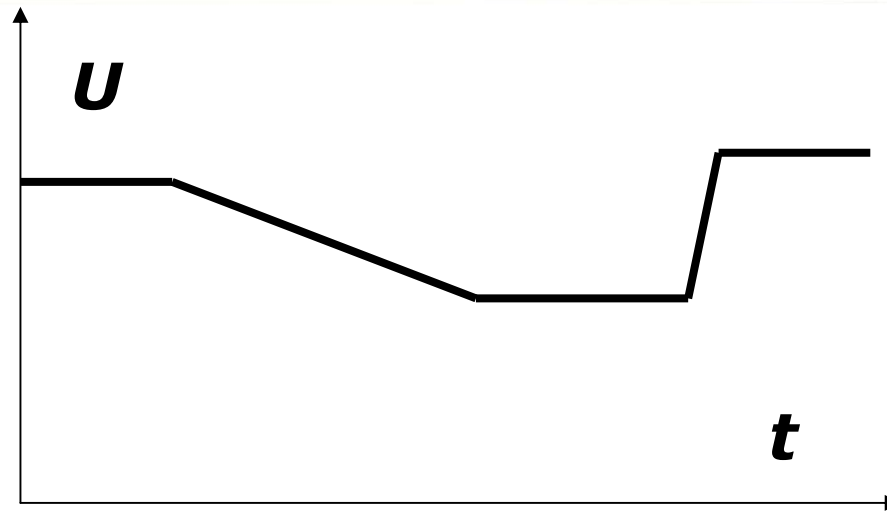
# STABILIZACJA NAPIĘCIA





# RODZAJE ZMIAN NAPIĘCIA

# RODZAJE ZMIAN NAPIĘCIA

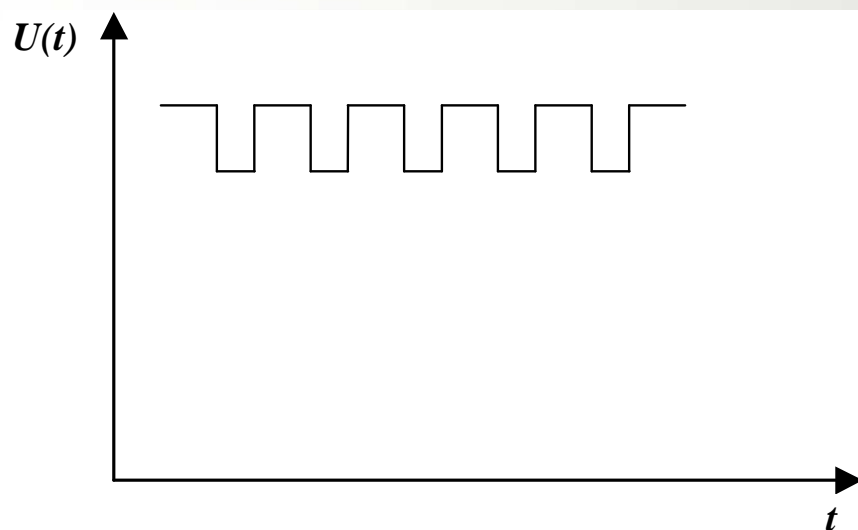


## Zmiany napięcia:

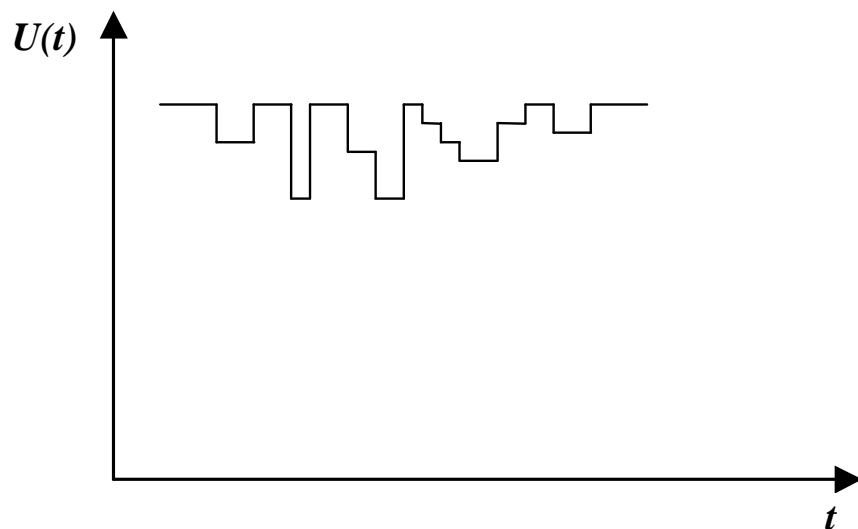
**wolne lub szybkie,  
pojedyncze lub powtarzalne,  
gwałtowne lub o skończonym czasie**

**Whania napięcia** – nagła zmiana napięcia o powtarzalnym charakterze

# RODZAJE ZMIAN NAPIĘCIA



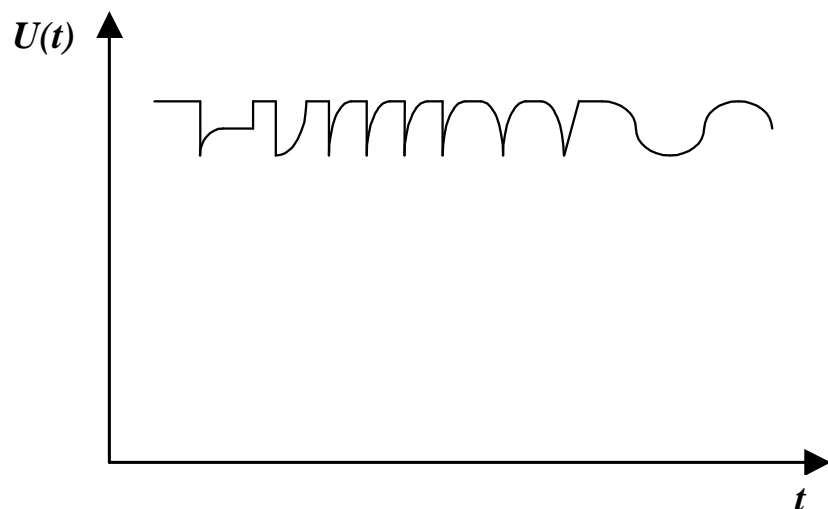
**Rodzaj a:** Prostokątne i okresowe o stałej amplitudzie (np. łączenie rezystancyjnego odbiornika, zgrzewarka oporowa itp.),



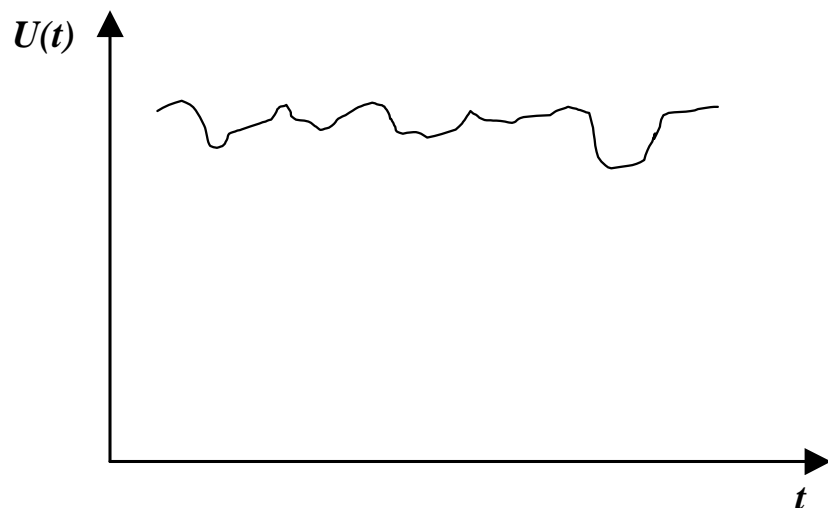
**Rodzaj b:** szeregi nieregularnych zmian napięcia o różnych amplitudach, i identycznych (lub nie) dolnych lub górnych wartościach



# RODZAJE ZMIAN NAPIĘCIA

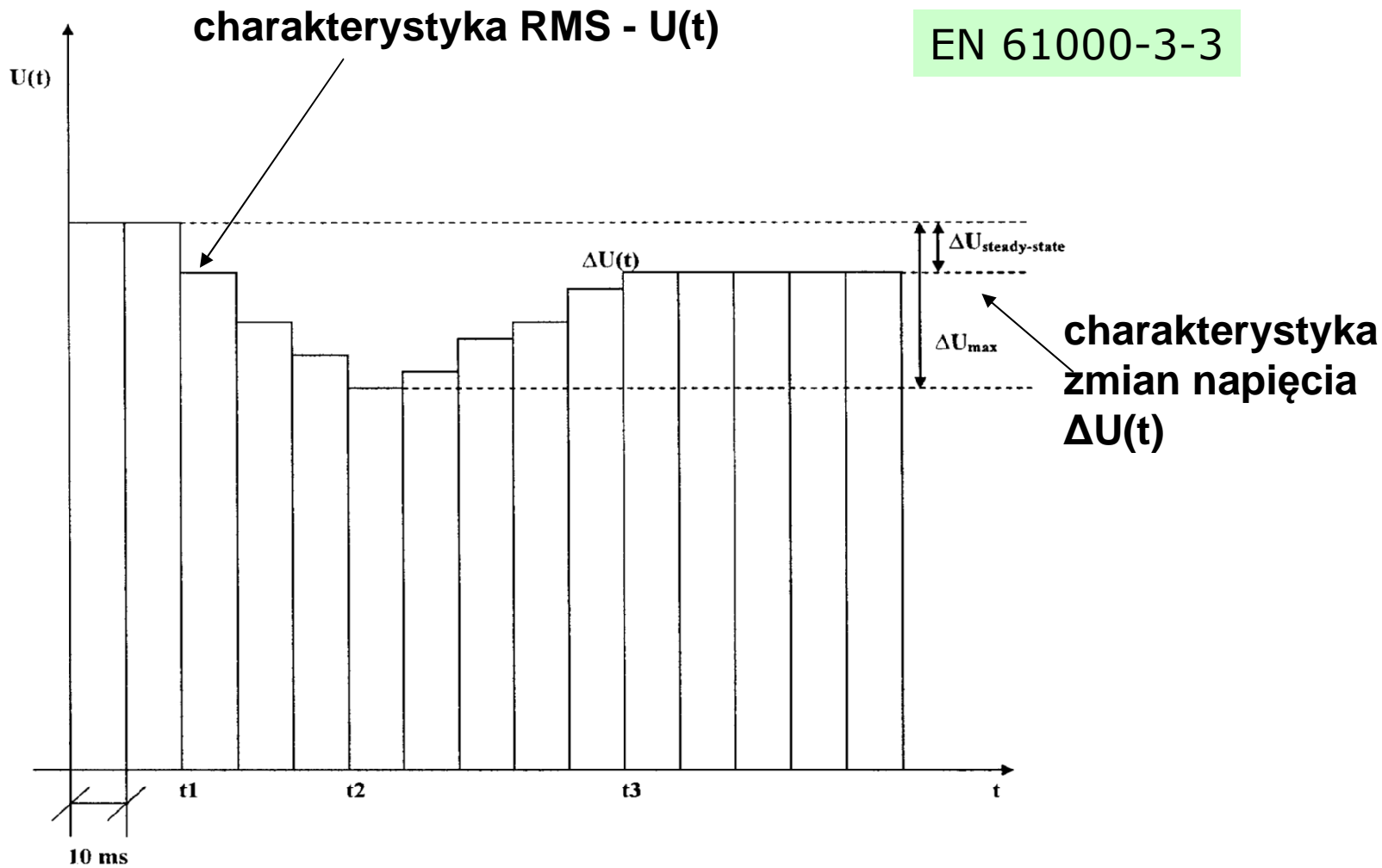


**Rodzaj c:** oddzielone zmiany napięcia, nie zawsze o gwałtownym charakterze (rozruchy silników, łączenie odbiorników nierezystancyjnych itp.)

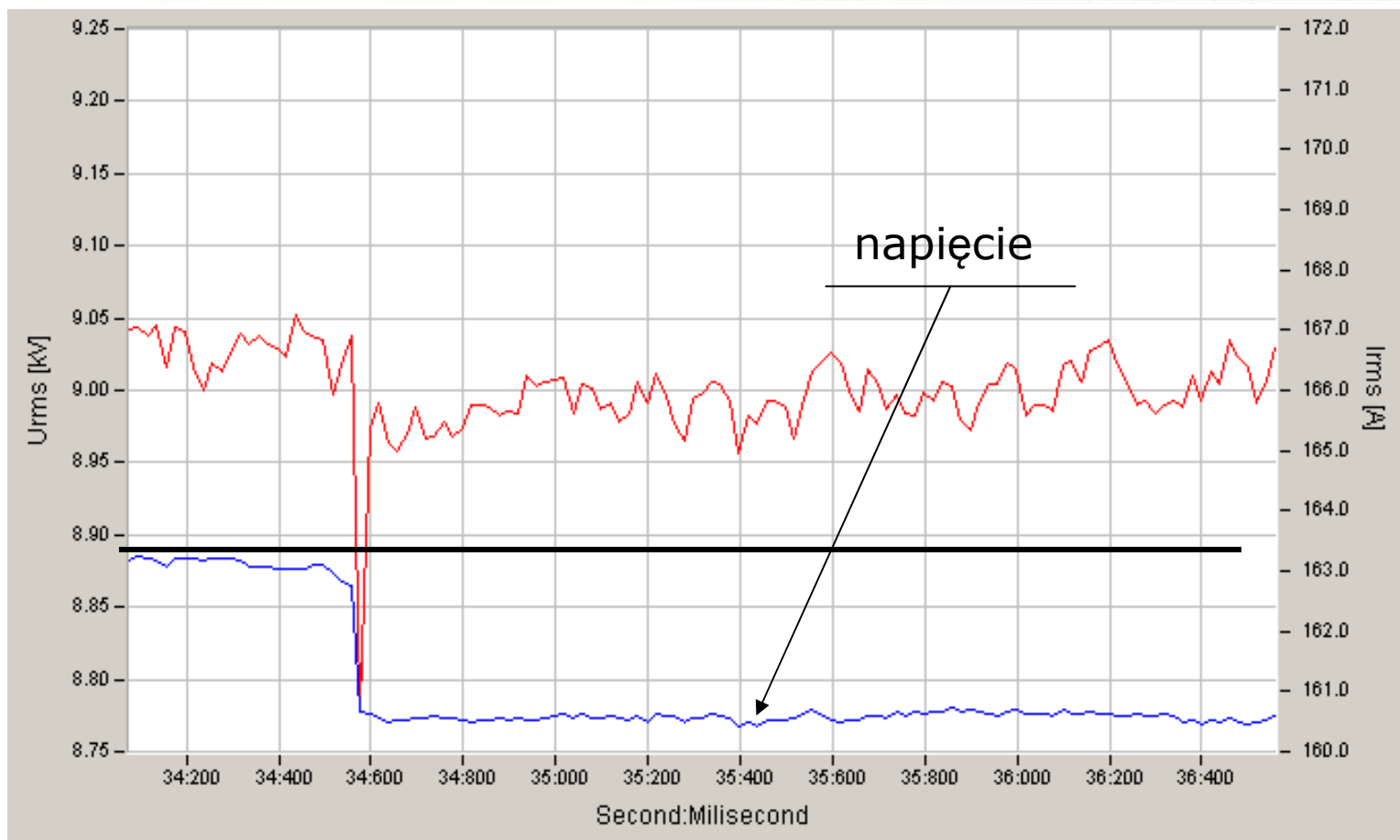


**Rodzaj d:** seria losowych zmian napięcia (np. praca pieca łukowego)

# ZMIANY NAPIĘCIA

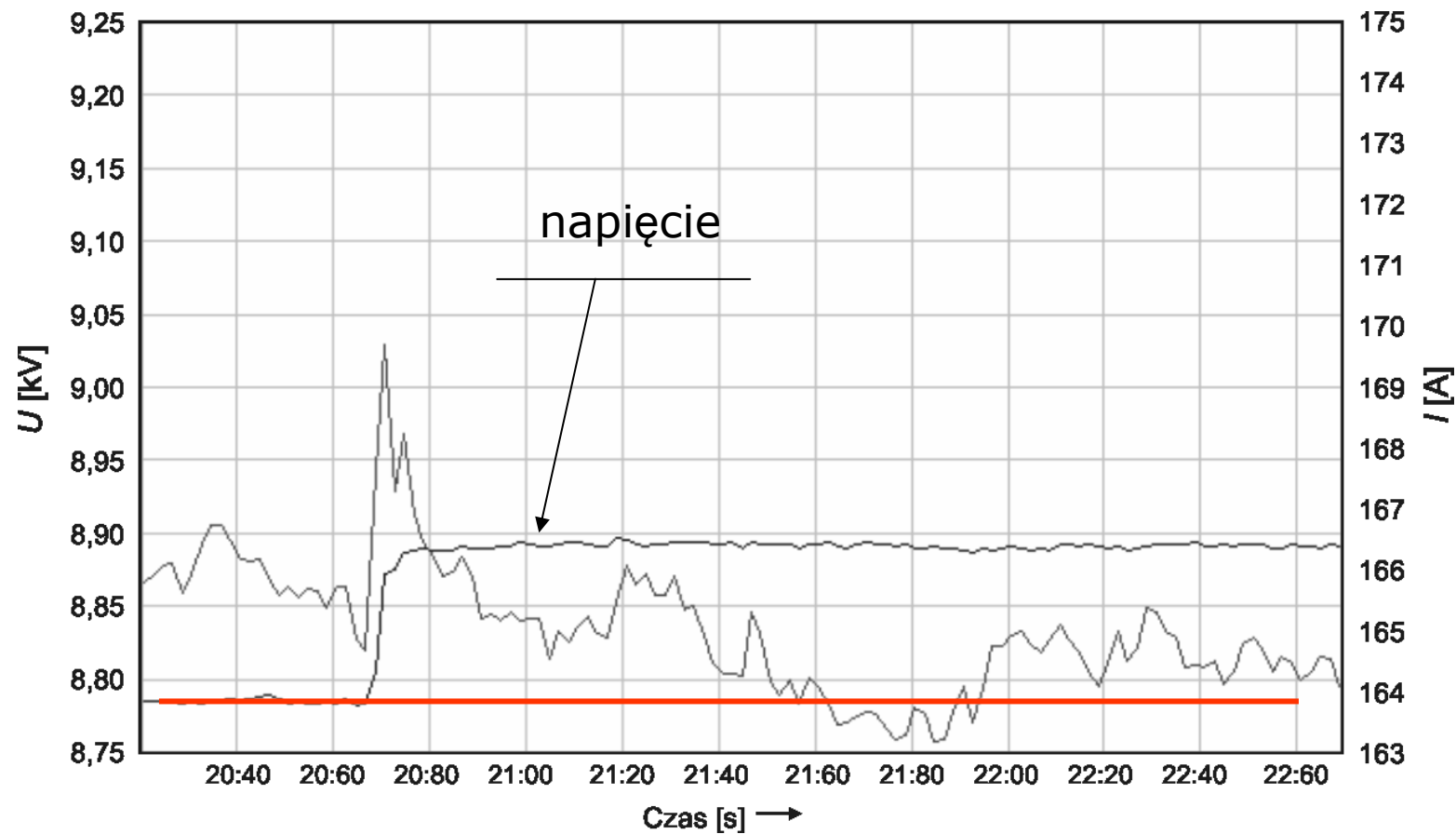


## SZYBKIE ZMIANY NAPIĘCIA



**Przykładowa zmiana wartości skutecznej napięcia i prądu podczas przełączania zaczeów transformatora WN/SN**

# SZYBKIE ZMIANY NAPIĘCIA





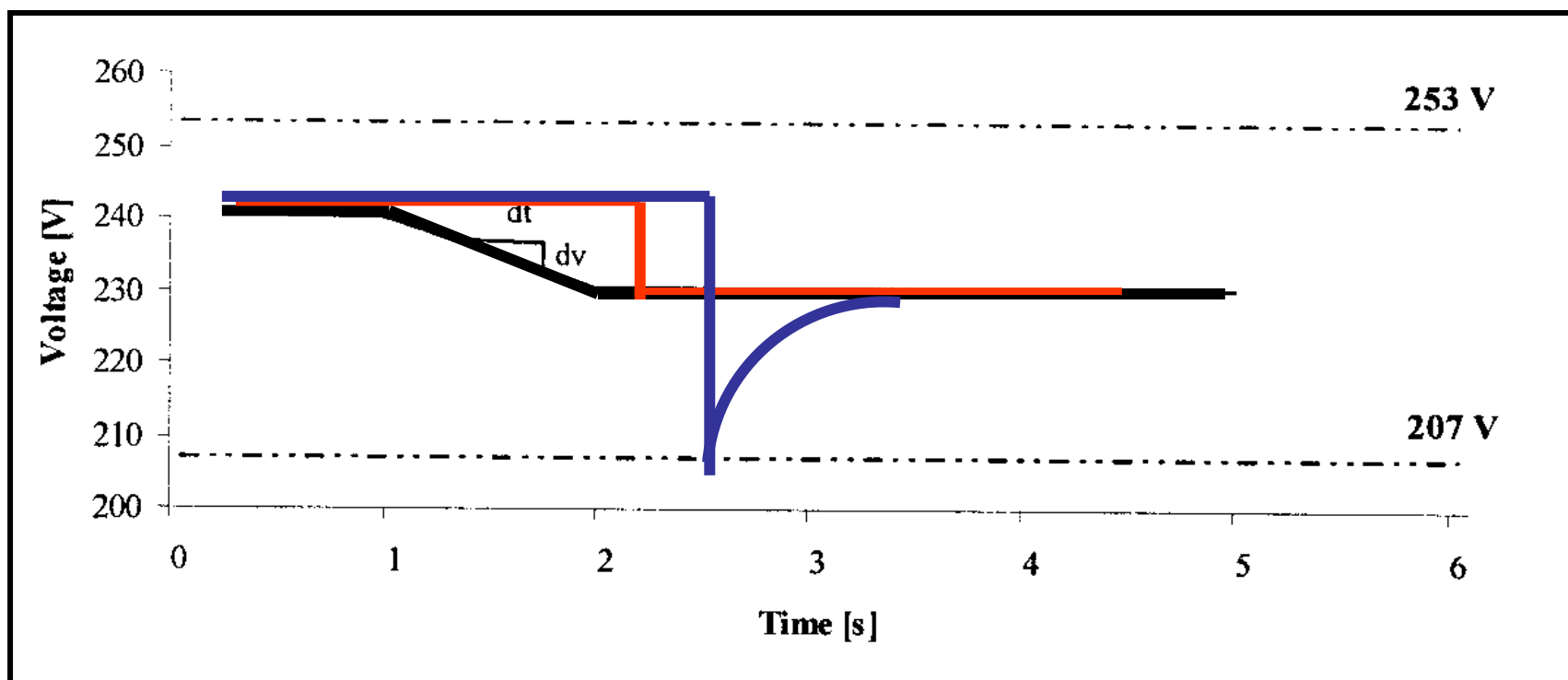
**EN 50 160:**

**Parametry napięcia zasilającego  
w publicznych sieciach rozdzielczych**



**Pojedyncza, szybka zmiana wartości skutecznej napięcia pomiędzy dwoma kolejnymi jego poziomami, które utrzymują się przez skończony, lecz nie określony przedział czasu**

- **Minimalna wartość ( $du/dt$ )**
- **Minimalny czas trwania warunków ustalonych**
- **Wartość zmiany napięcia: maksymalna i/lub ustalona**
- **Które napięcie przyjmuje się za napięcie referencyjne**
- **...**



**Ustalona zmiana napięcia - 10 V.**



AGH

**EN 50 160:**

**Parametry napięcia zasilającego**

**w publicznych sieciach rozdzielczych**



Polski Komitet  
Normalizacyjny

**Zmiana skutecznej wartości napięcia występująca w przedziale  $\pm 10\%$  napięcia znamionowego/deklarowanego, o szybkości zmian większej niż  $0,5\%$  napięcia znamionowego/deklarowanego **na sek.****

**Szybkie zmiany napięcia są opisane poprzez **wartość ustalonej i maksymalnej** zmiany napięcia.**



**EN 50 160:**

**Parametry napięcia zasilającego  
w publicznych sieciach rozdzielczych**



## Szybkie zmiany napięcia:

1. Brak definicji i miar liczbowych zaburzenia
  - $nN$ :  $5\%U_N$ , rzadko  $10\%U_N$
  - $SN$ :  $4-6\%U_c$





**EN 50 160:**

**Parametry napięcia zasilającego  
w publicznych sieciach rozdzielczych**



***„...W normalnych warunkach pracy szybkie zmiany napięcia nie przekraczają z reguły 4 %  $U_c$ , jednakże w pewnych okolicznościach, kilka razy w ciągu dnia, mogą wystąpić zmiany napięcia o krótkim czasie trwania, osiągające wartość do 6 %  $U_c$ ...”***



# UKŁADY STABILIZACJI NAPIĘCIA

**autotransformatory lub transformatory z przełącznikami zaczepów**

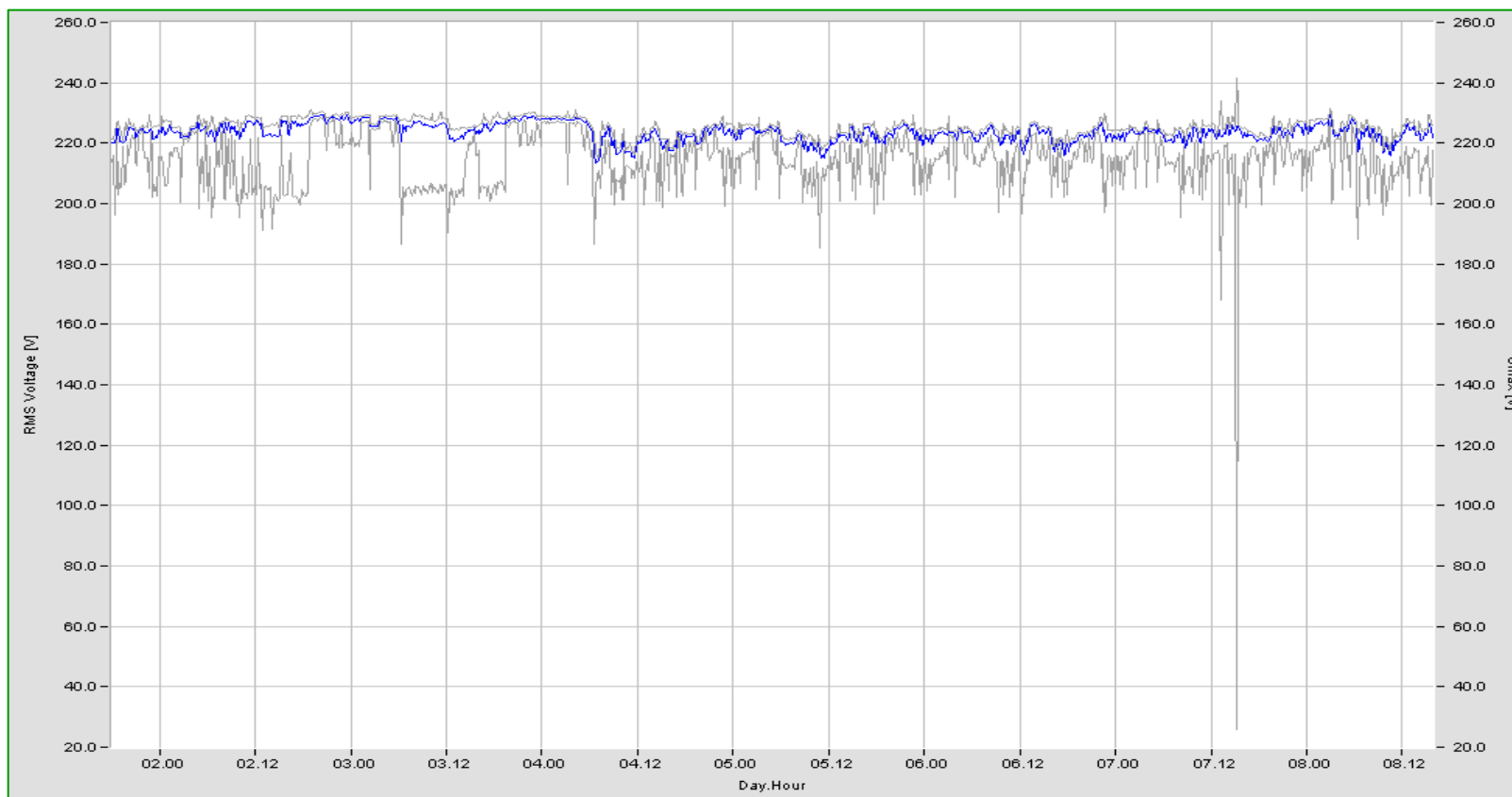
**szeregowe transformatory dodawcze**

**urządzenia regulacyjne**

**kondensatory równoległe i szeregowo**



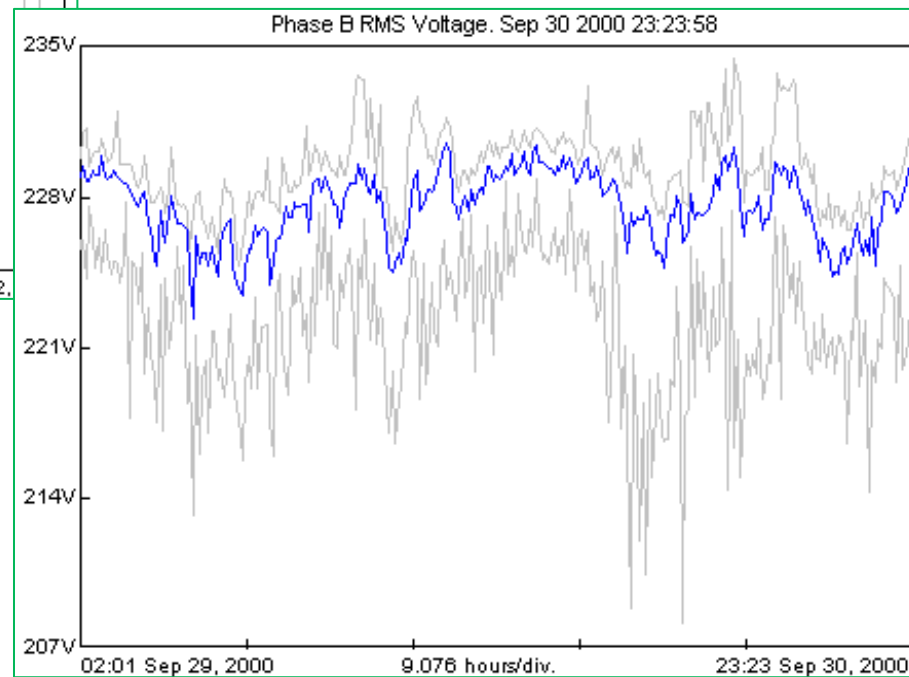
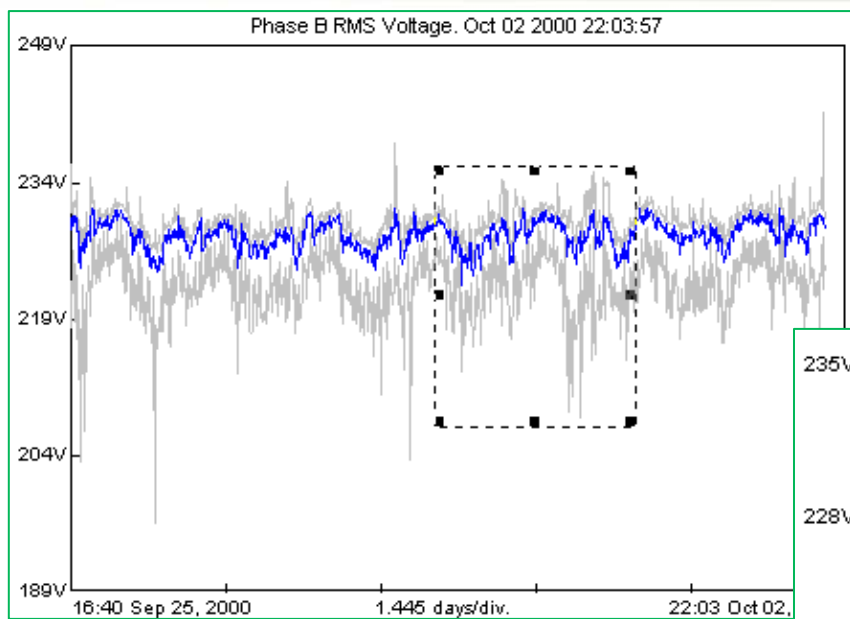
# **WAHANIA NAPIĘCIA**



**Przykład zmian wartości skutecznej napięcia w sieci komunalnej**

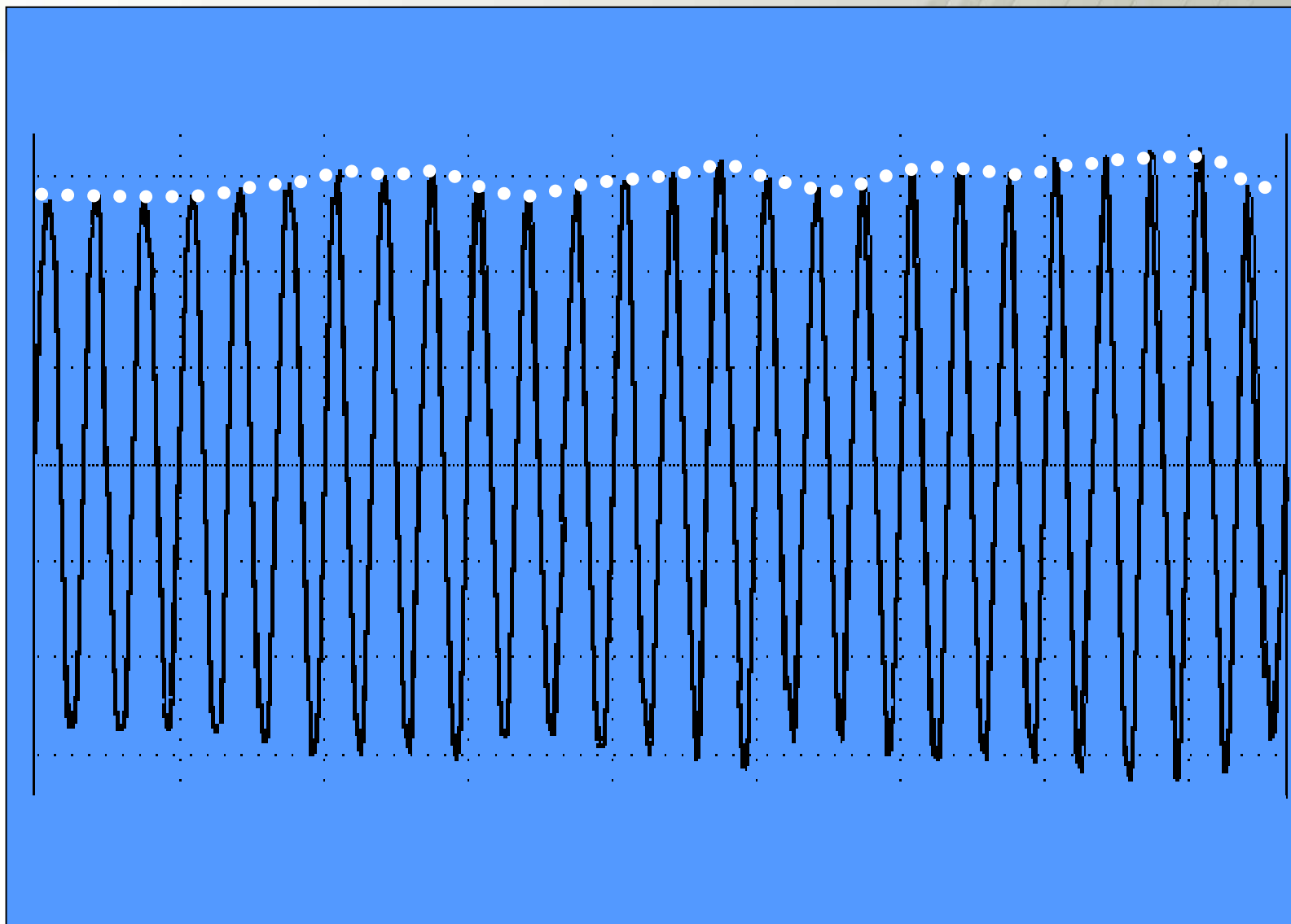


# WAHANIA NAPIĘCIA





# WAHANIA NAPIĘCIA





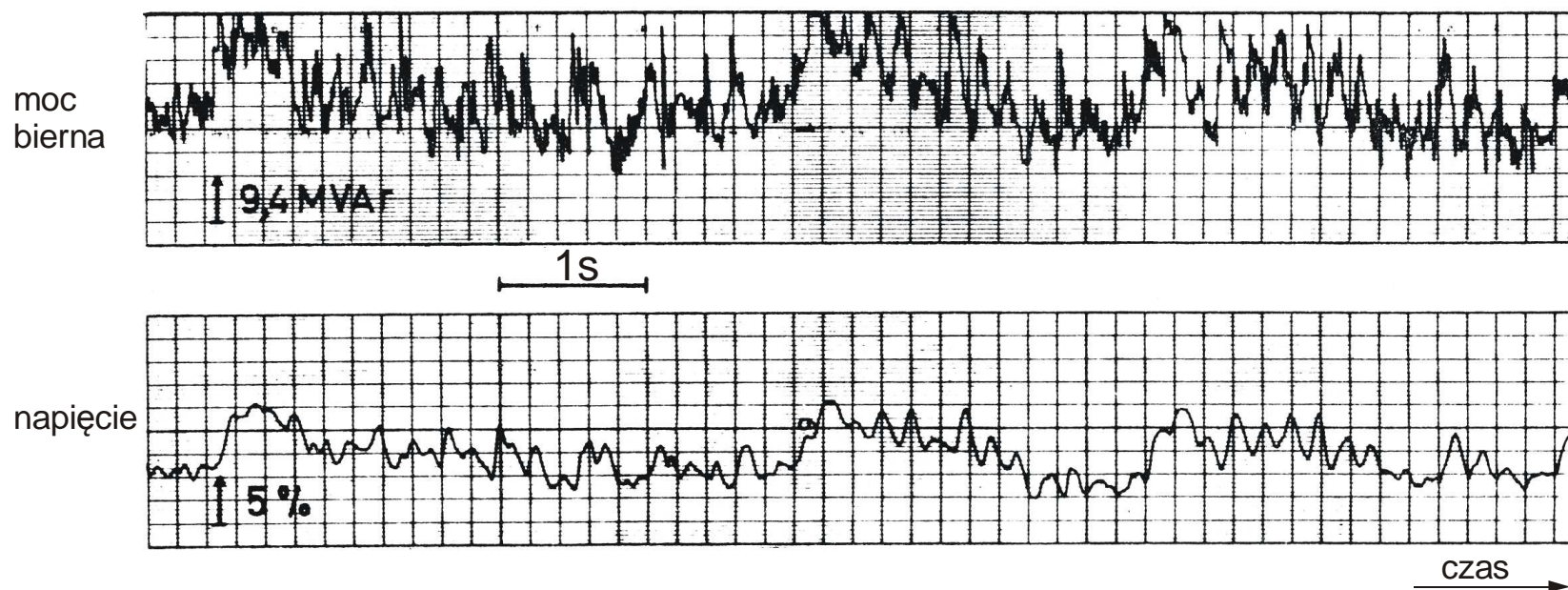
# ŹRÓDŁA WAHAŃ NAPIĘCIA

**Zmiana mocy biernej odbiorników niespokojnych np. piece łukowe, walcownie, maszyny wyciągowe itp.**

**Łączenie baterii kondensatorów, praca przełącznika zacze­pów transformatora, rozruchy silników, spawarki, odbiorniki elektrotermiczne, regulatory mocy, młoty, pompy, kompresory, dźwigi, windy – odbiorniki o dużych zmianach mocy w relacji do mocy zwarcia w punkcie przyłączenia,**

**Interharmoniczne napięcia.**

# ŹRÓDŁA WAHAŃ NAPIĘCIA

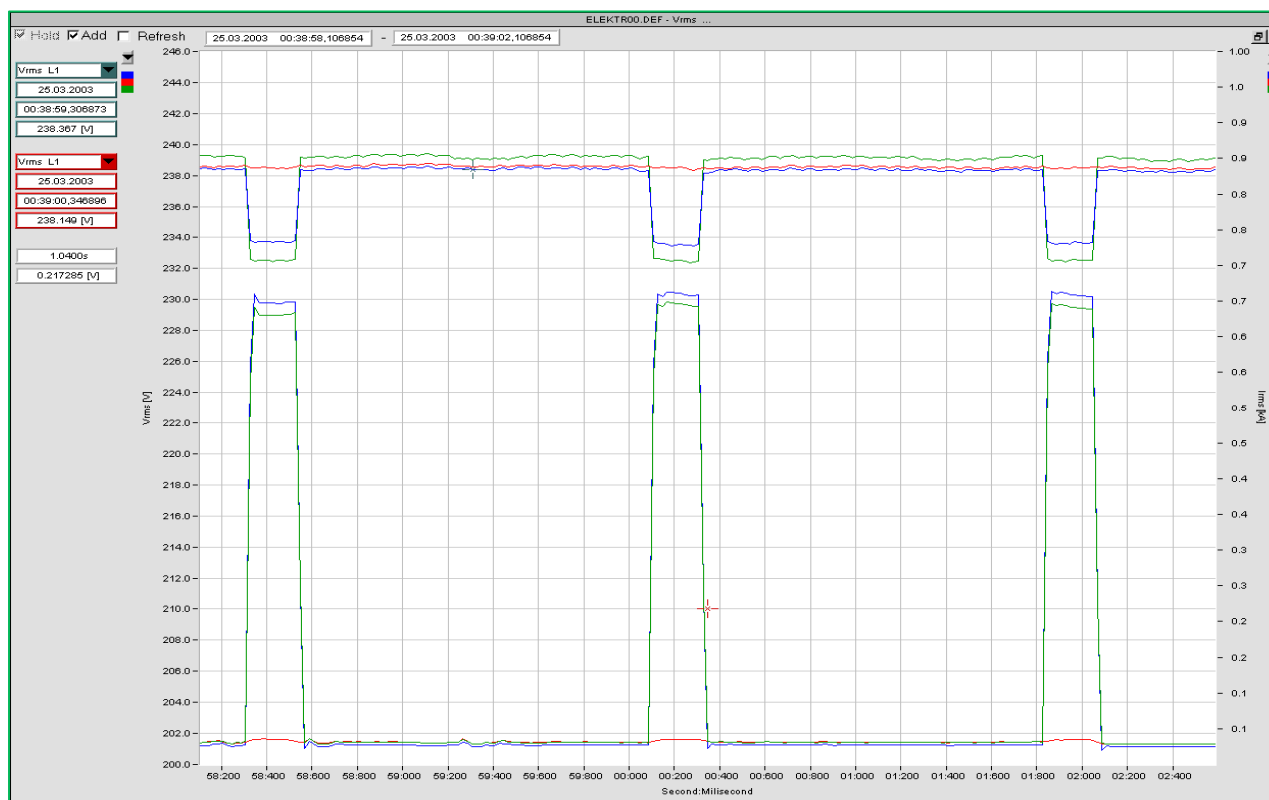


**Piec łukowy**





# ŹRÓDŁA WAHAŃ NAPIĘCIA



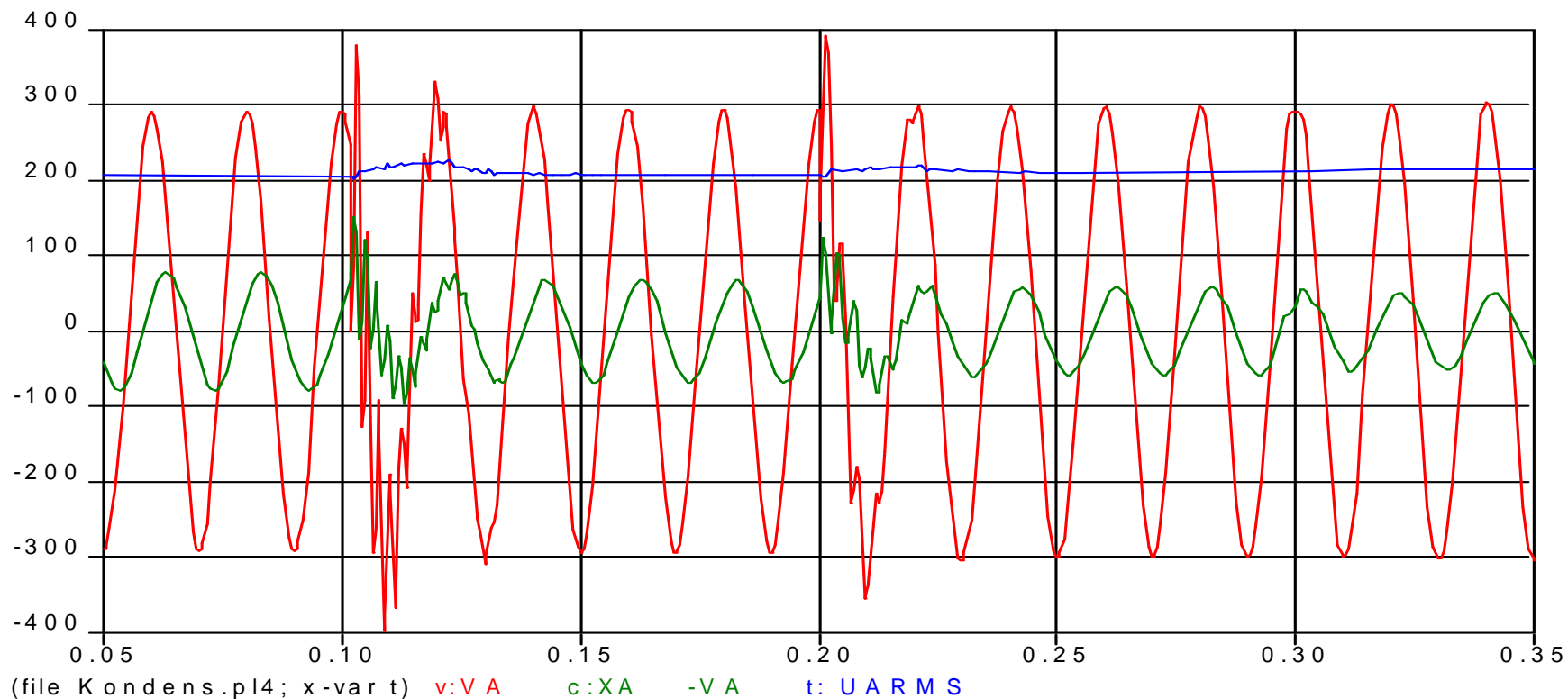
Zgrzewarka



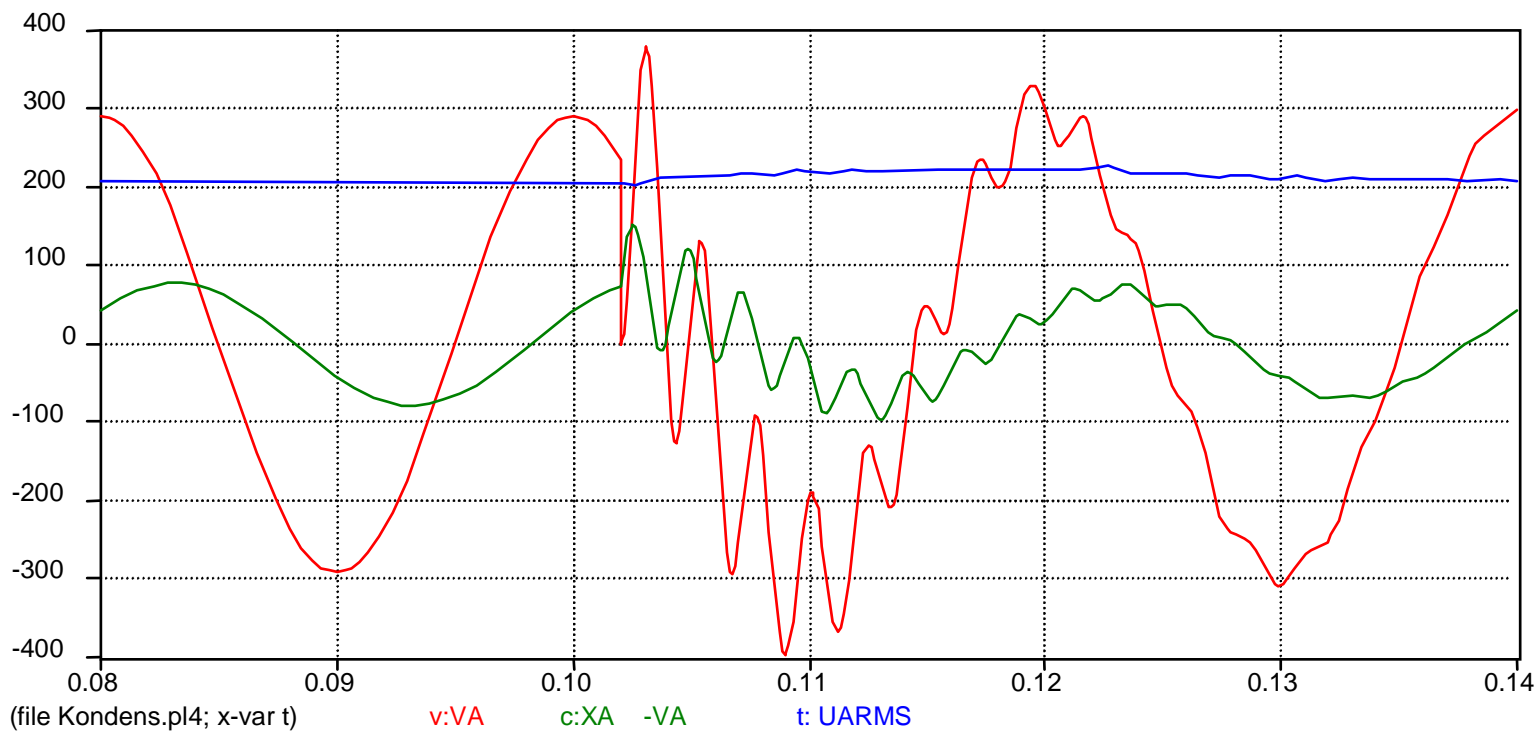
**Spawarka**



# ŹRÓDŁA WAHAŃ NAPIĘCIA

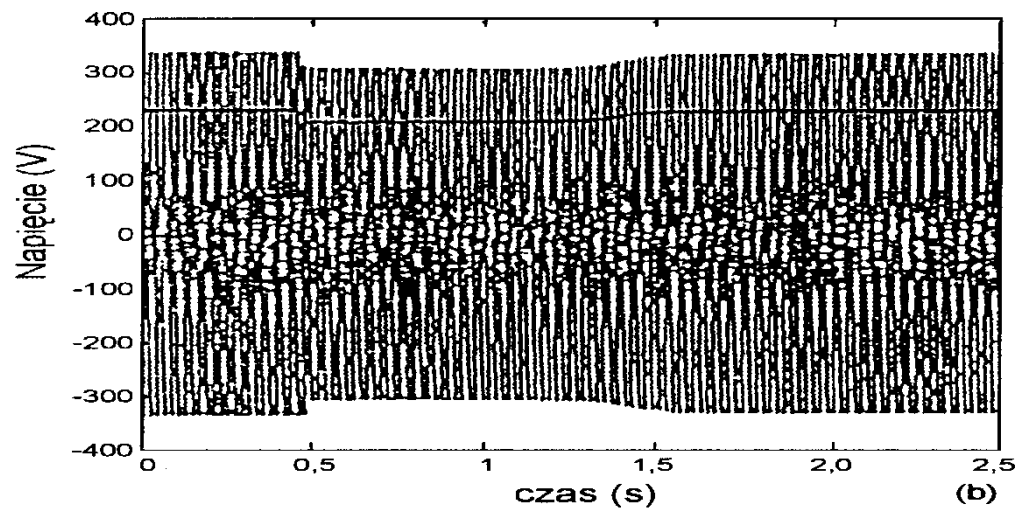
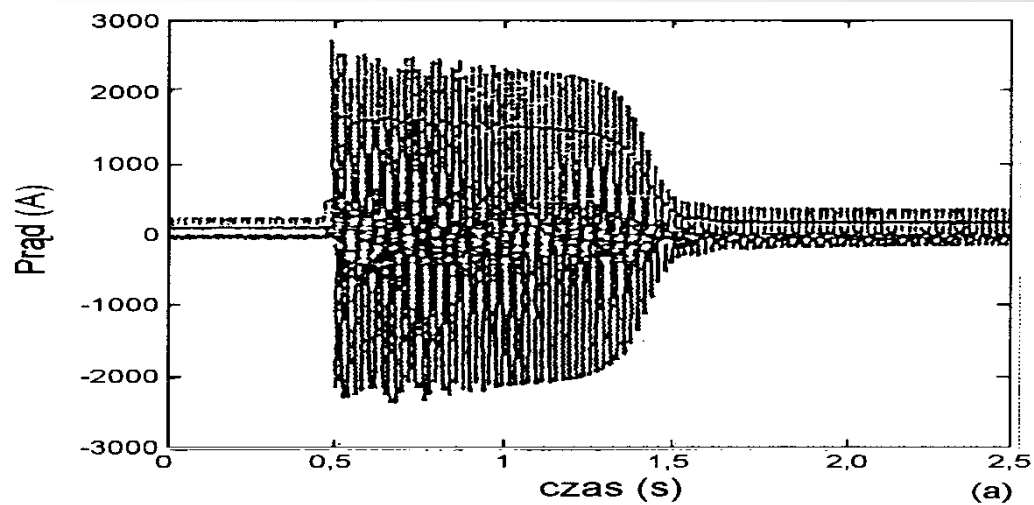


# ŹRÓDŁA WAHAŃ NAPIĘCIA



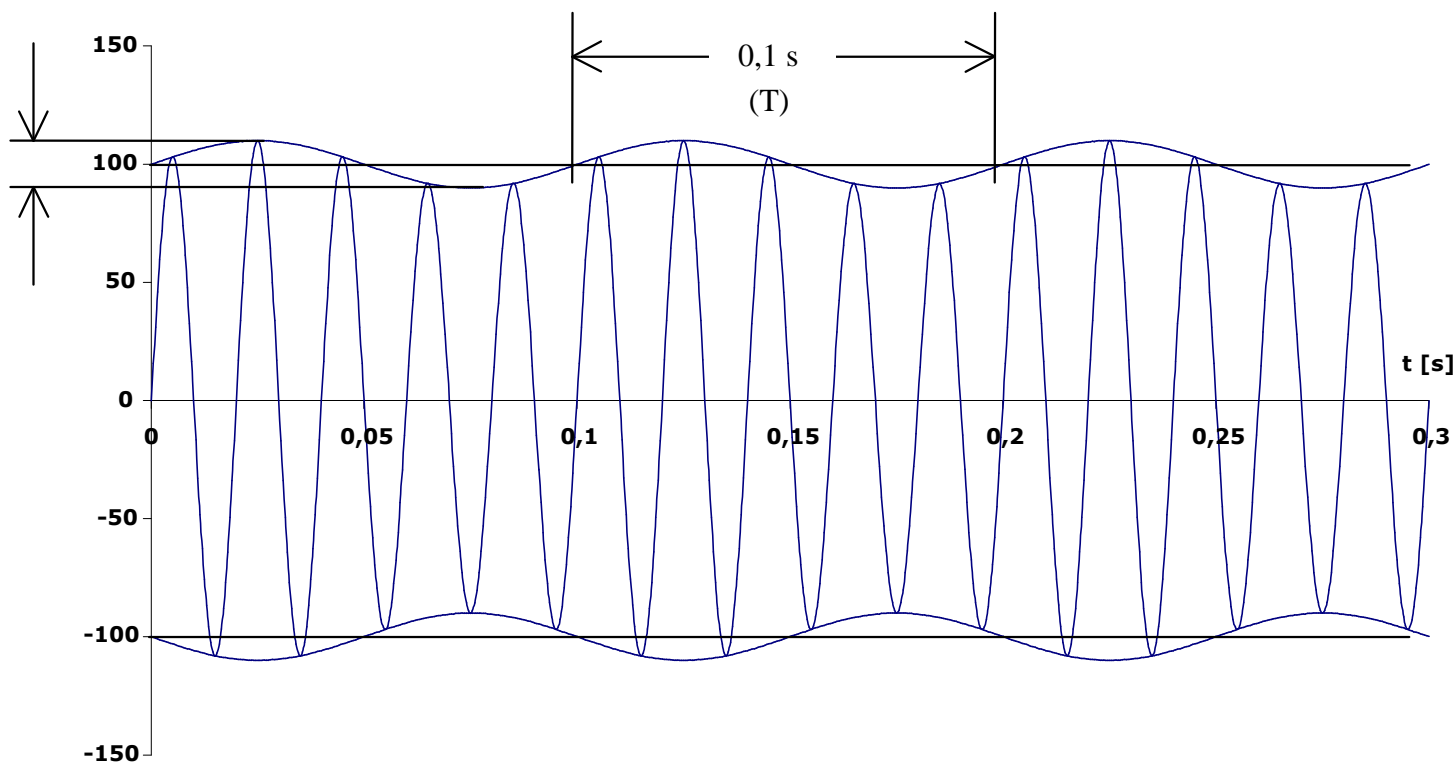
$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{Q_C}{S_{sc}}$$

# ŹRÓDŁA WAHAŃ NAPIĘCIA



**Rozruch silnika**

# ŹRÓDŁA WAHAŃ NAPIĘCIA



$$u(t) = U_m (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t$$

## ŹRÓDŁA WAHAŃ NAPIĘCIA

$$u(t) = U_m (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t$$

$\omega$  pulsacja (=  $2\pi \times 50$  (60) Hz)

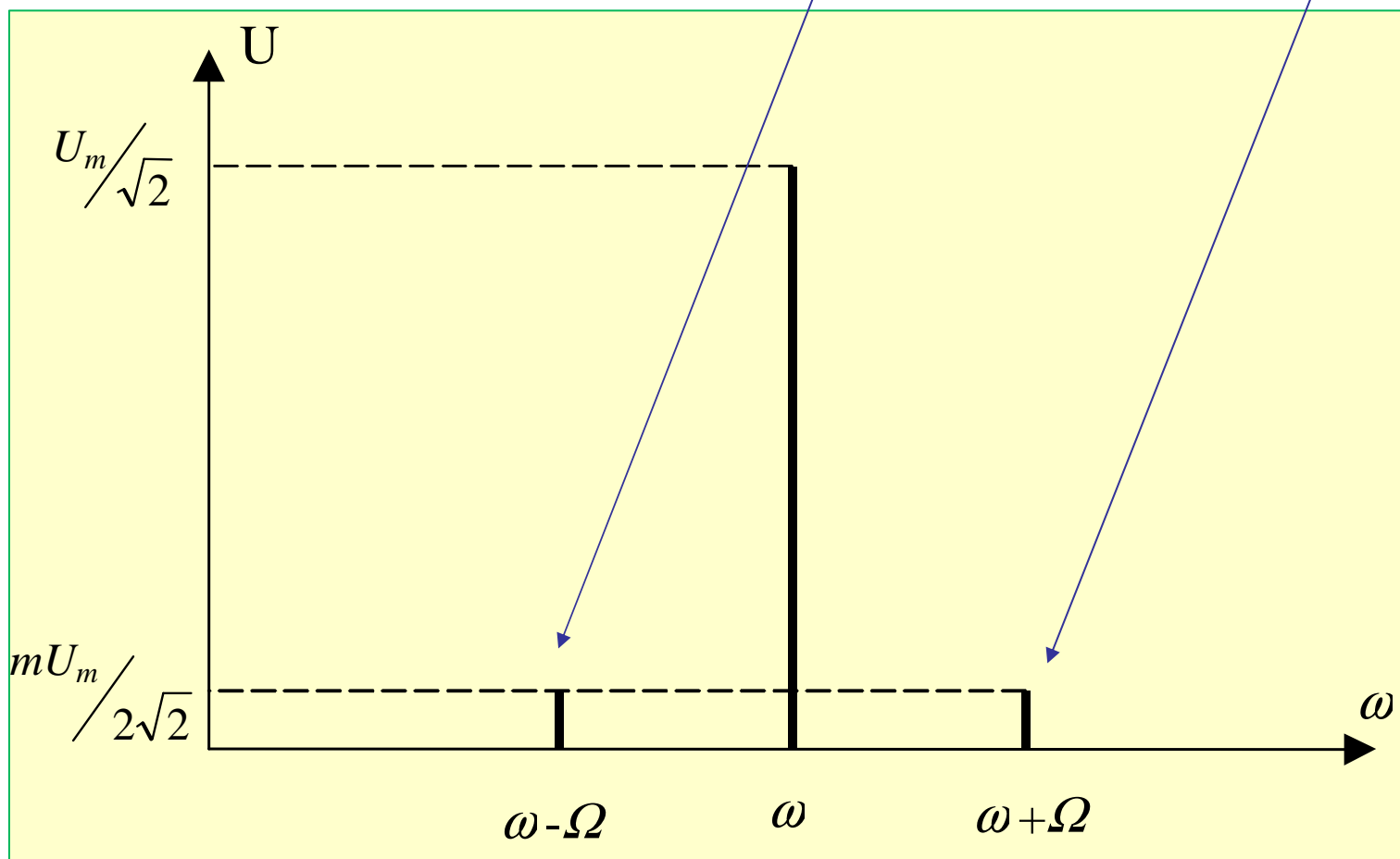
$\Omega$  pulsacja modulacji

$m$  =  $\Delta U / 2U$  gdzie  $\Delta U$  jest różnicą pomiędzy min. i max. wartością skuteczną napięcia;  $U$  jest skuteczną wartością napięcia wyznaczoną np. za pomocą filtru o stałej czasowej równej 1 min.

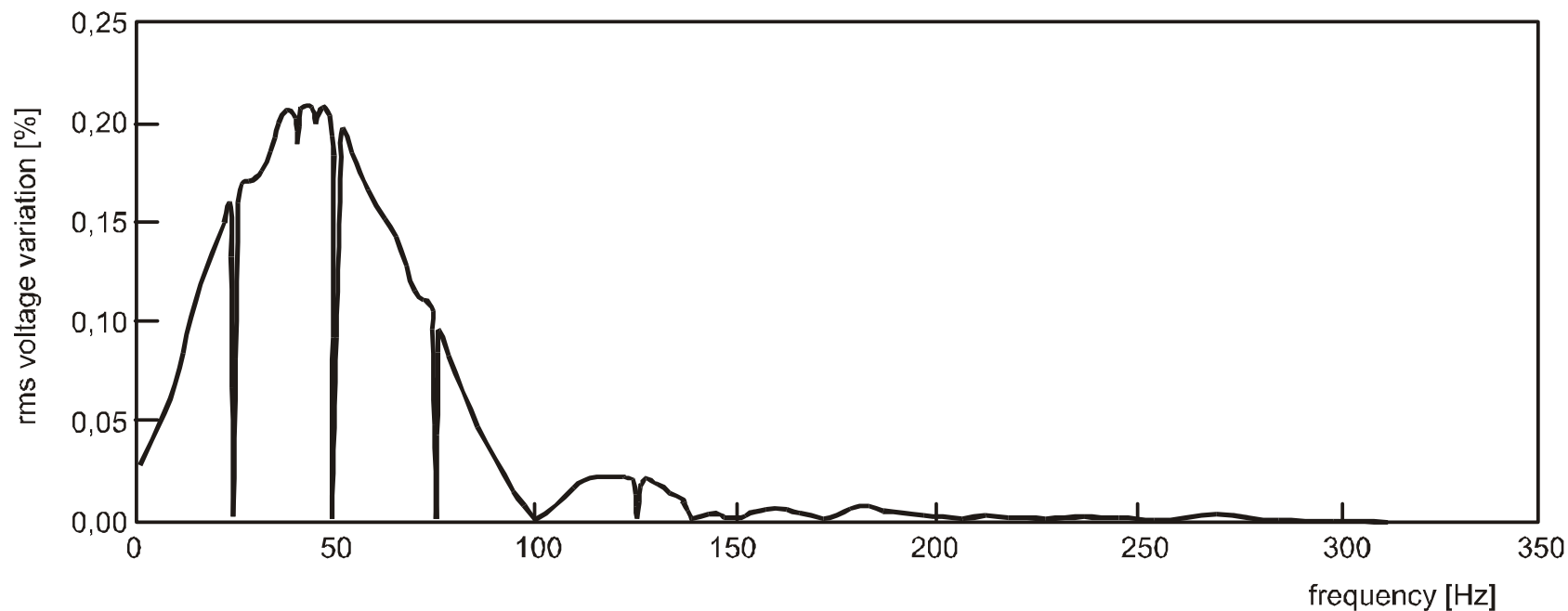
$$u(t) = U_m \cos(\omega t) + \frac{U_m}{2} [\cos(\omega - \Omega)t + \cos(\omega + \Omega)t]$$

# ŹRÓDŁA WAHAŃ NAPIĘCIA

$$u(t) = U_m \cos(\omega t) + \frac{U_m}{2} [\cos(\omega - \Omega)t + \cos(\omega + \Omega)t]$$



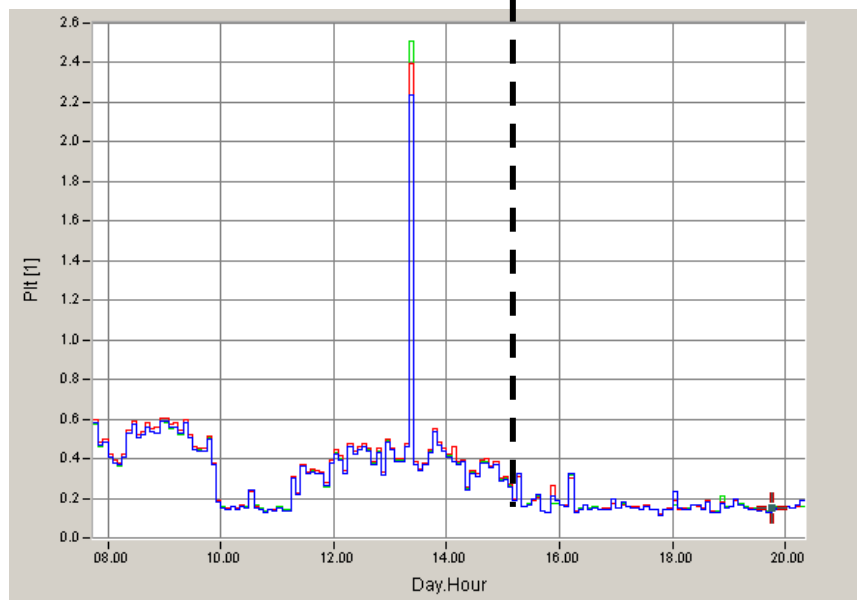
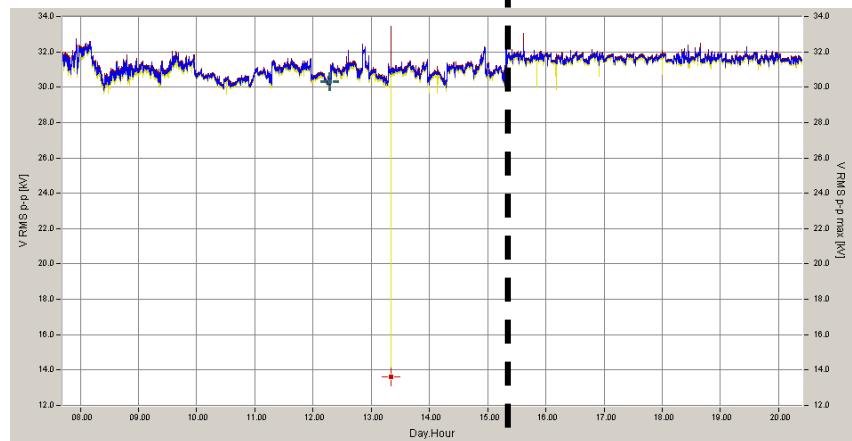




**Zależność max. skutecznej wartości zmian napięcia od częstotliwości interharmonicznej o stałej amplitudzie (0.2% składowej podstawowej)**

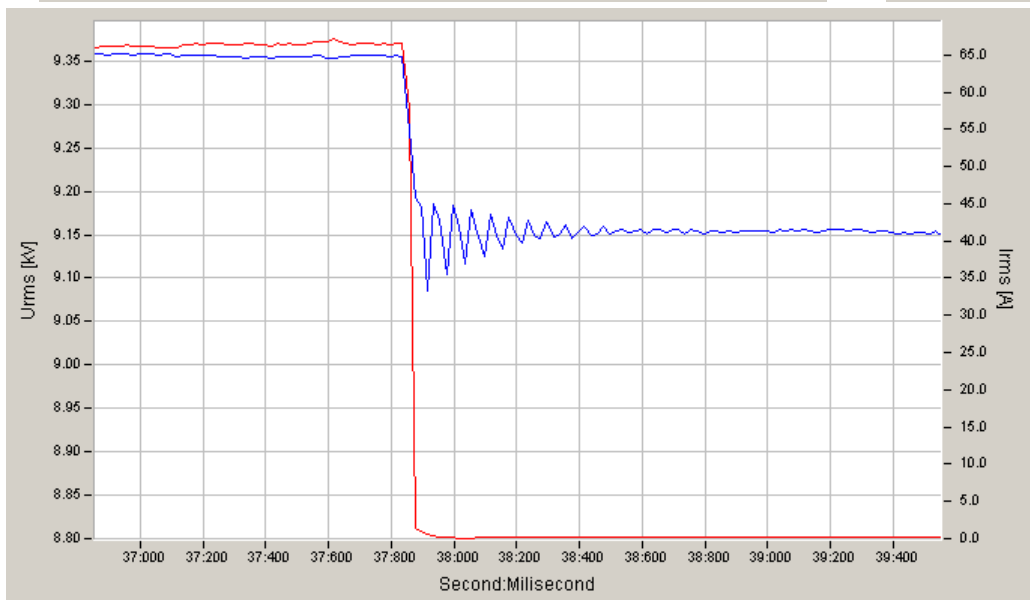
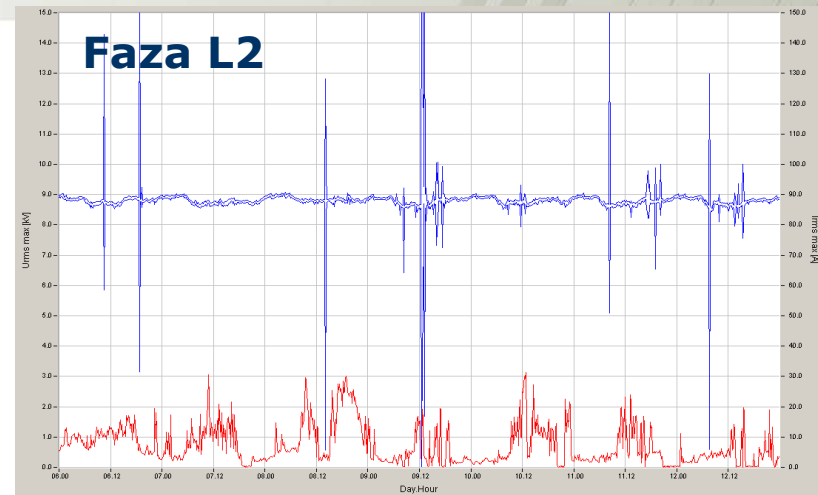
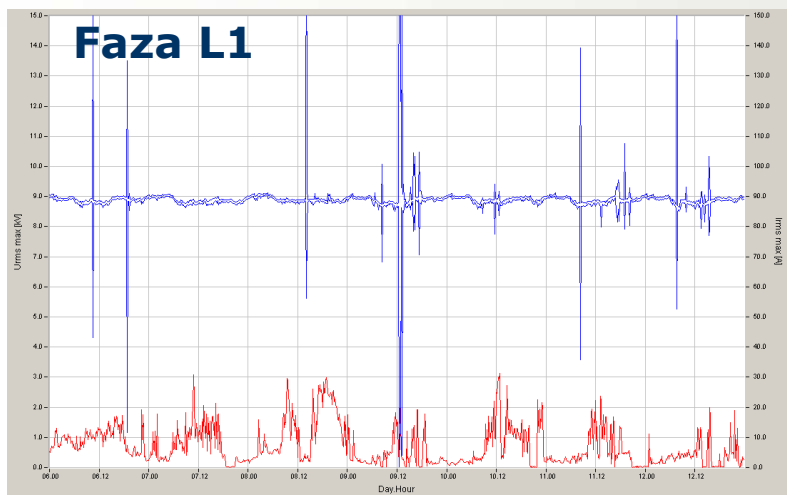


# ŹRÓDŁA WAHAŃ NAPIĘCIA





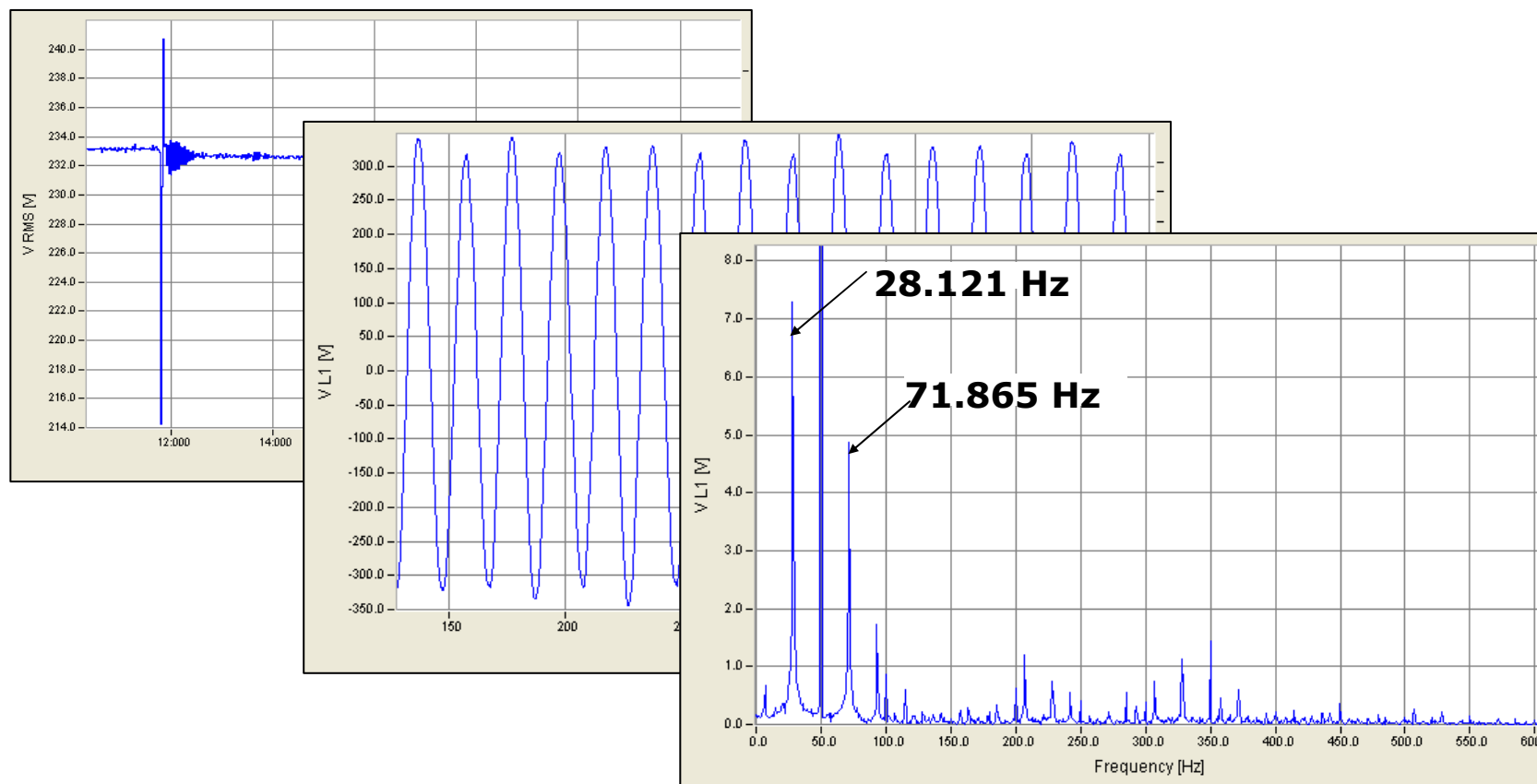
# ŹRÓDŁA WAHAŃ NAPIĘCIA



**Prąd i napięcie  
podczas  
rozruchu  
turbiny  
wiatrowej**



## Przebiegi napięcia na wyjściu UPS

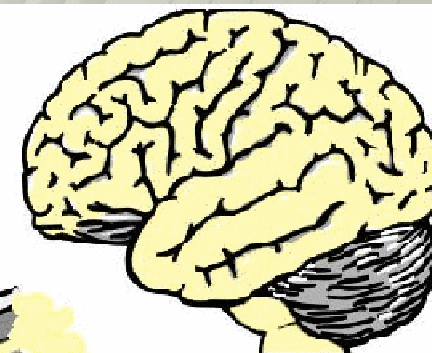
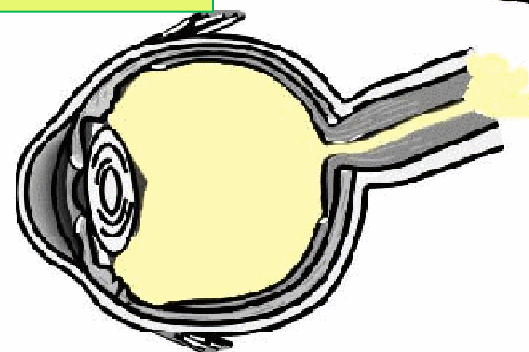
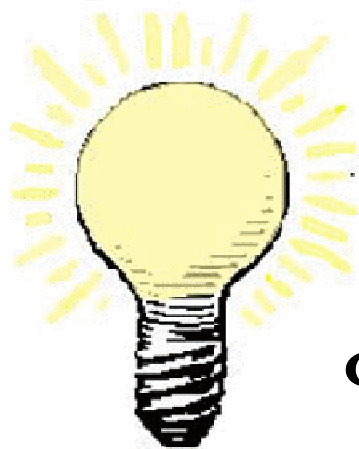




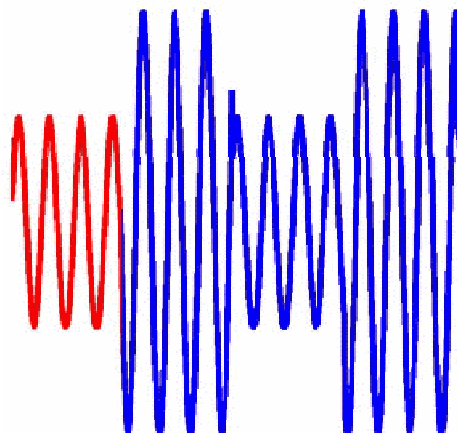
# SKUTKI WAHAŃ NAPIĘCIA

# SKUTKI WYHAŃ NAPIĘCIA

$$\Phi \sim U^\gamma$$

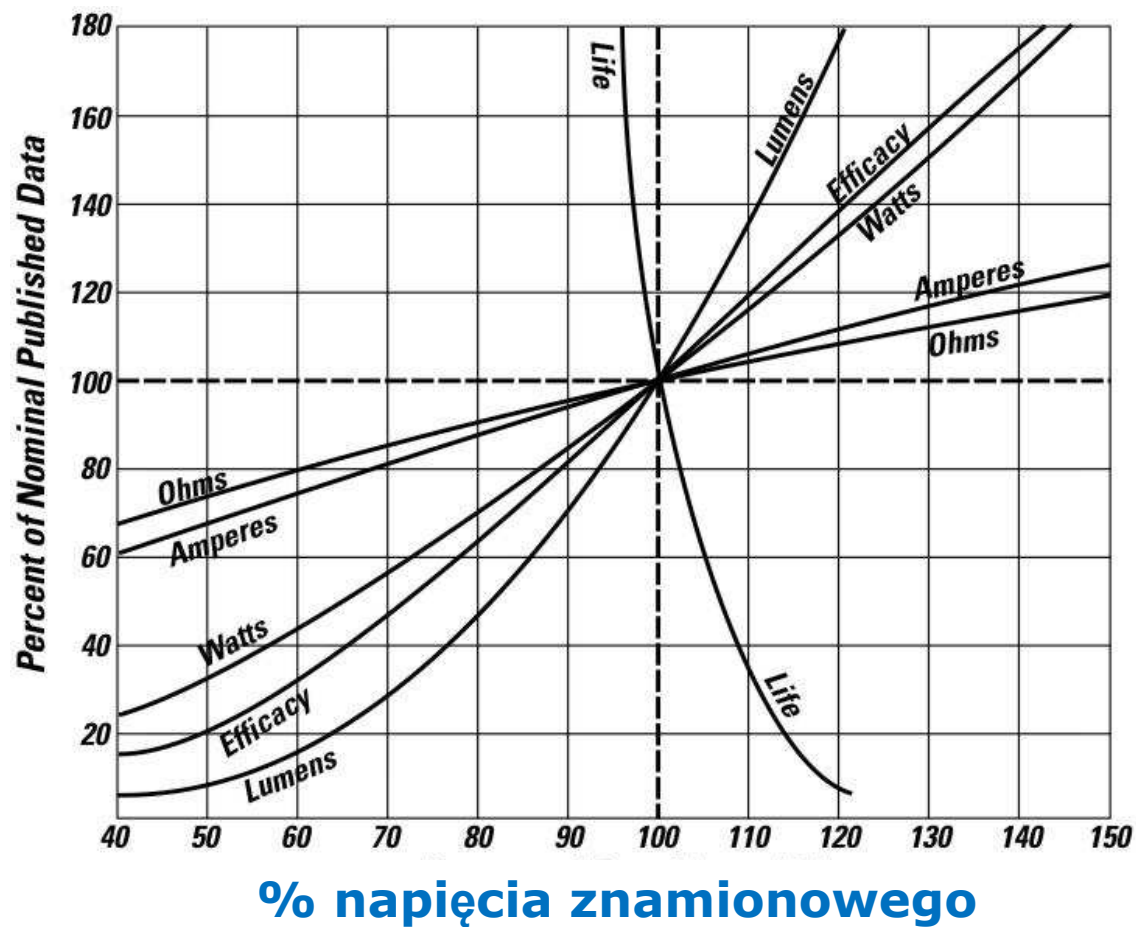


$$\Phi \approx U^{3,1 \div 3,7}$$

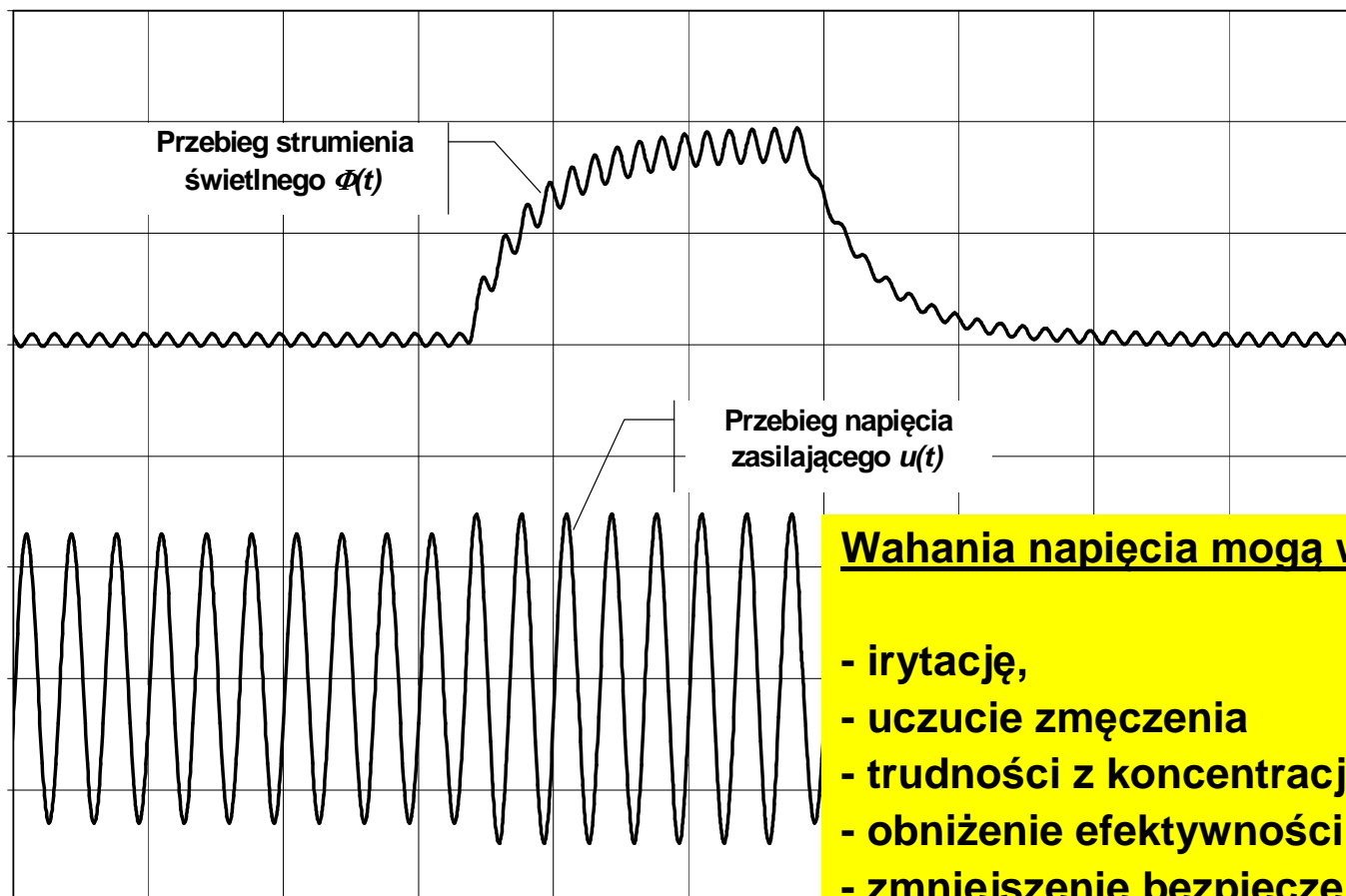


Lampy fluorescencyjne: 1.3-1.7

# SKUTKI WAHAŃ NAPIĘCIA



# SKUTKI WAHAŃ NAPIĘCIA



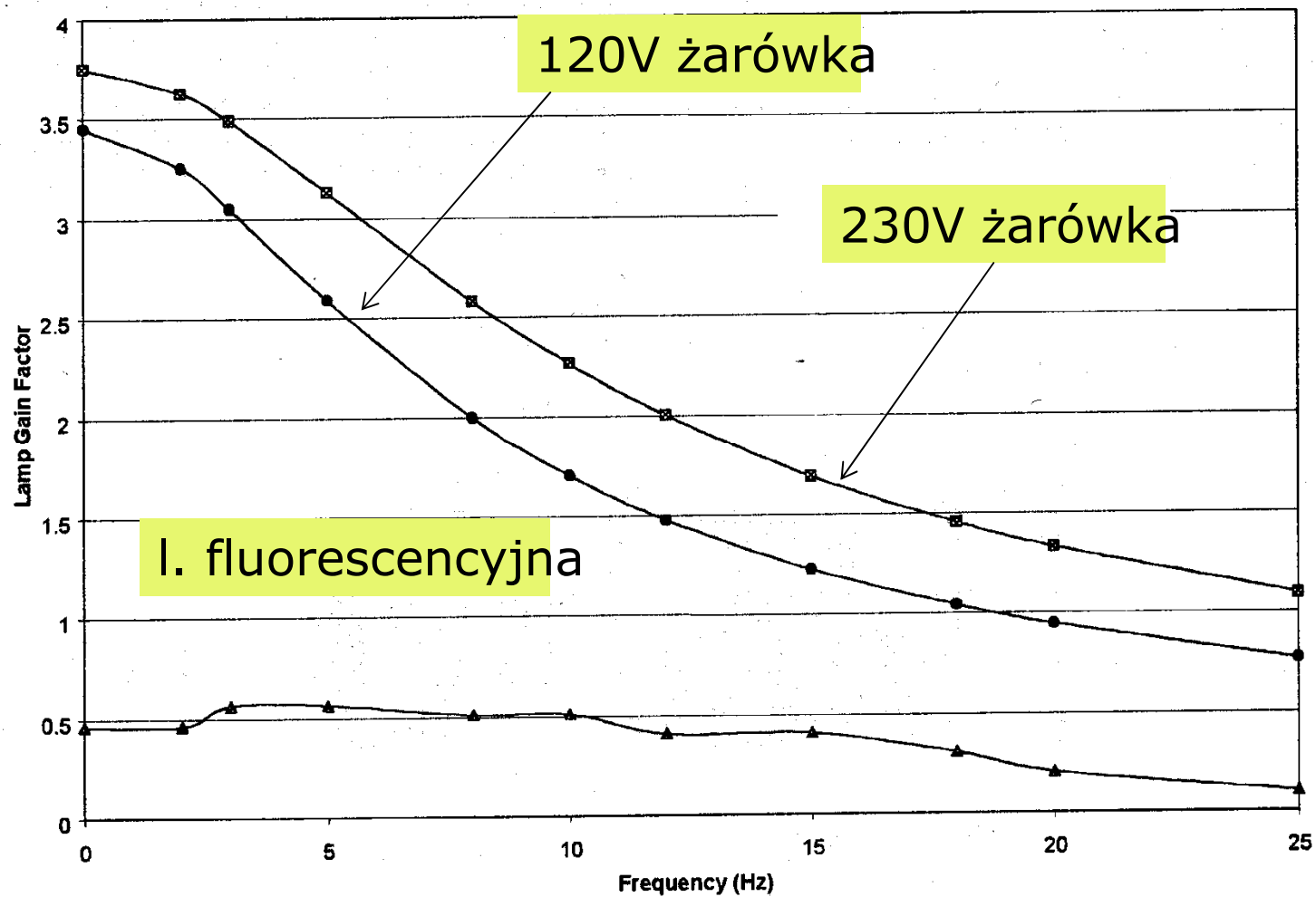
## Wahania napięcia mogą wywołać:

- irytację,
- uczucie zmęczenia
- trudności z koncentracją,
- obniżenie efektywności pracy i jej jakości
- zmniejszenie bezpieczeństwa pracy.

Czytanie i oglądanie TV



# SKUTKI WAHAŃ NAPIĘCIA





# SKUTKI WAHAŃ NAPIĘCIA

**Ograniczone pasmo postrzegania (0.05-35 Hz).**

**Zależność od częstotliwości (granica postrzegania i irytacji).**

**Częstotliwość rezonansowa (8-9 Hz).**

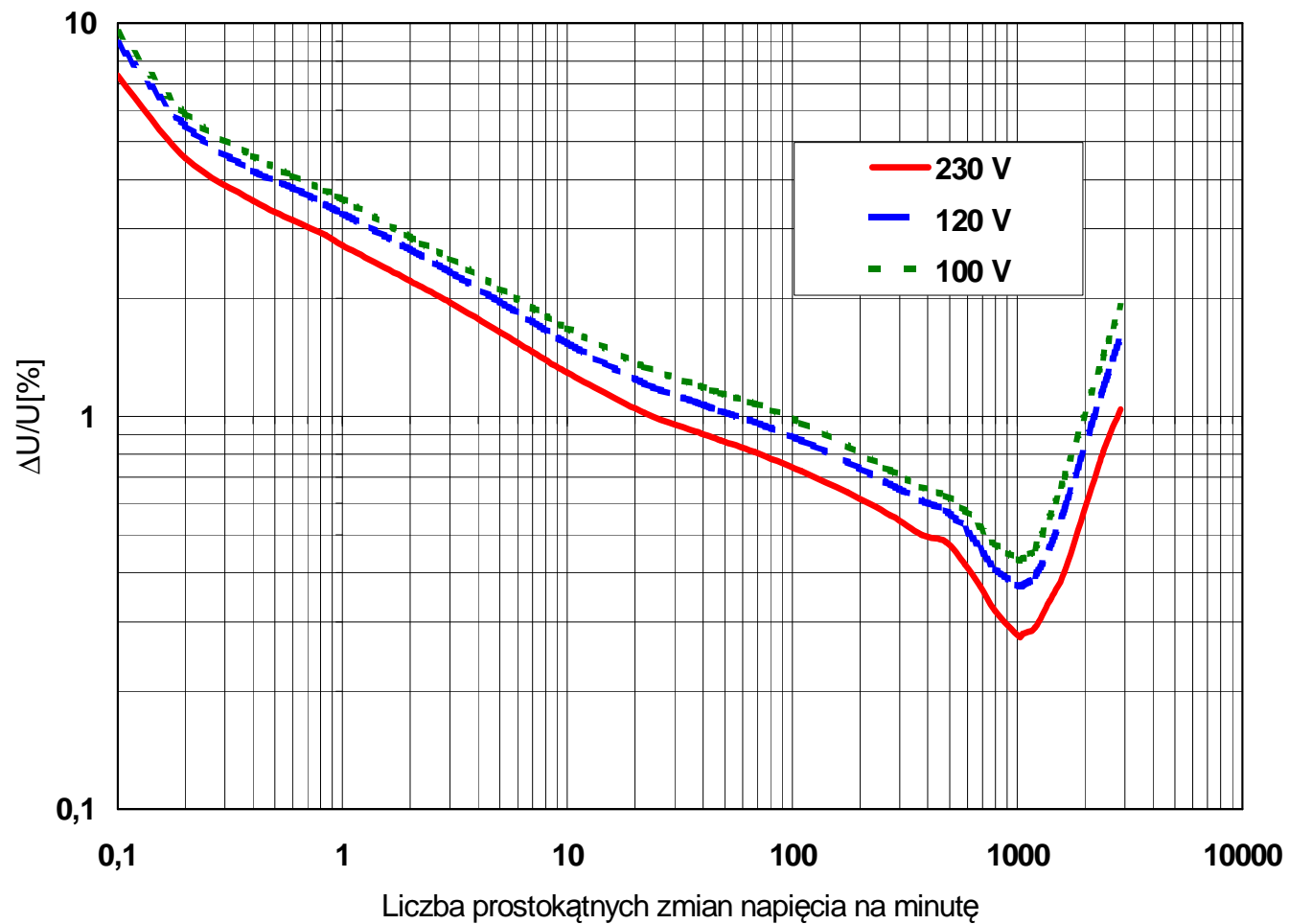
**Efekt psychofizyczny – zależny od amplitudy, częstotliwości, czasu trwania zaburzenia, powtarzalności.**

**Problemy epileptyczne**

**Testy pilotów**



# CHARAKTERYSTYKA CENELEC





# SKUTKI WAHAŃ NAPIĘCIA

**Przekształtniki statyczne**

**Proces elektrolizy**

**Urządzenia elektrotermiczne**

**Silniki elektryczne**

**Styczniki i przekaźniki**

**Piece łukowe**



## Silniki elektryczne

Wahania napięcia mogą być przyczyną powstawania składowej zmiennej momentu elektromagnetycznego powodującego dodatkowe drgania mechaniczne silnika. Skutkiem tego zjawiska może być szybsze zużywanie się elementów mechanicznych (np. łożysk) i znaczne zmniejszenie się okresu eksploatacji silnika pomiędzy remontami.

Straty ekonomiczne w tym przypadku wynikają z kosztów dodatkowych remontów oraz z zwiększonego czasu przestoju napędzanego urządzenia technologicznego.

## Odbiorniki elektrotermiczne

### Piece łukowe



Wahania napięcia utrudniają optymalne wykorzystanie mocy transformatora piecowego wymuszając dodatkowe procesy regulacyjne związane z utrzymaniem właściwej długości łuku elektrycznego.

Najczęściej wydłuża to czas wytopu stali, a w konsekwencji zmniejsza wydajność pieca i w związku z tym powoduje straty ekonomiczne.

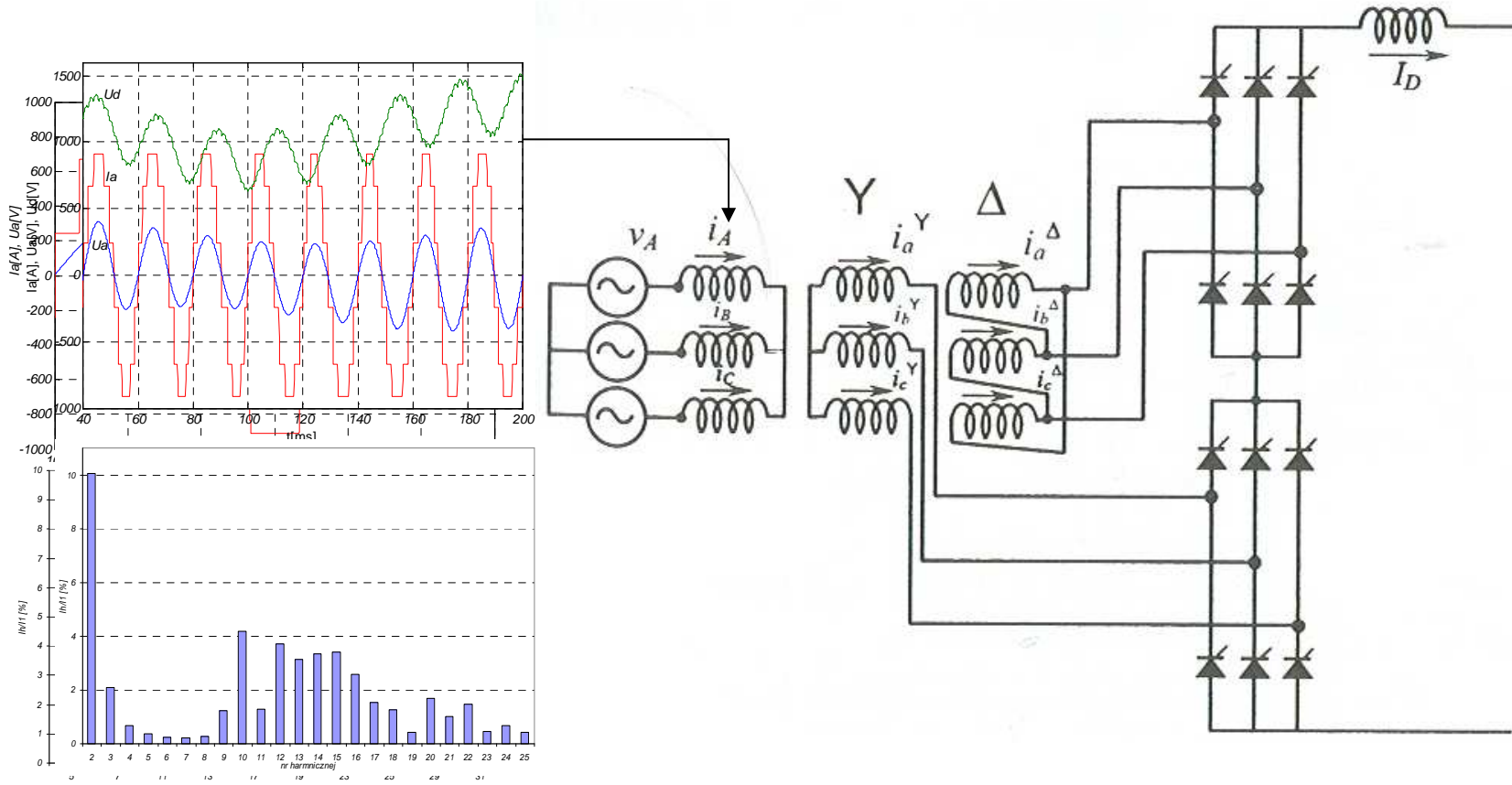


# SKUTKI WAHAŃ NAPIĘCIA

## Aparatura stycznikowo-przełącznikowa

Wahania napięcia mogą powodować zakłócenia w pracy styczników i przełączników powodując często zbędne wyłączenia urządzeń, a nawet procesów technologicznych oraz błędne zadziałania zabezpieczeń.

Skutki finansowe takich awarii mogą być znaczne.



Nie-zmodyfikowane napięcie  
Zmodyfikowane napięcie





# POMIAR WAHAŃ NAPIĘCIA



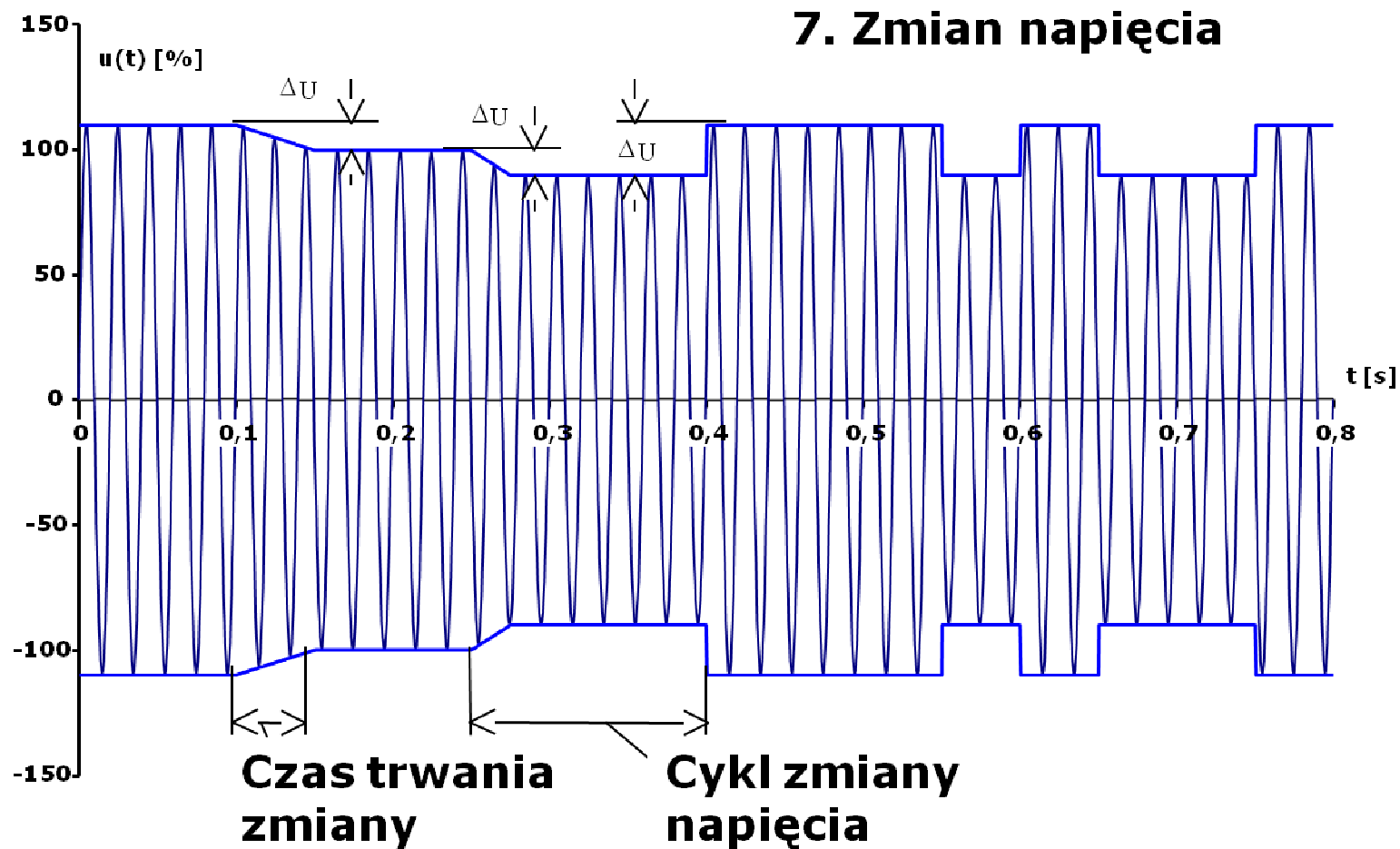
# POMIAR WAHAŃ NAPIĘCIA

**Względna zmiana napięcia**

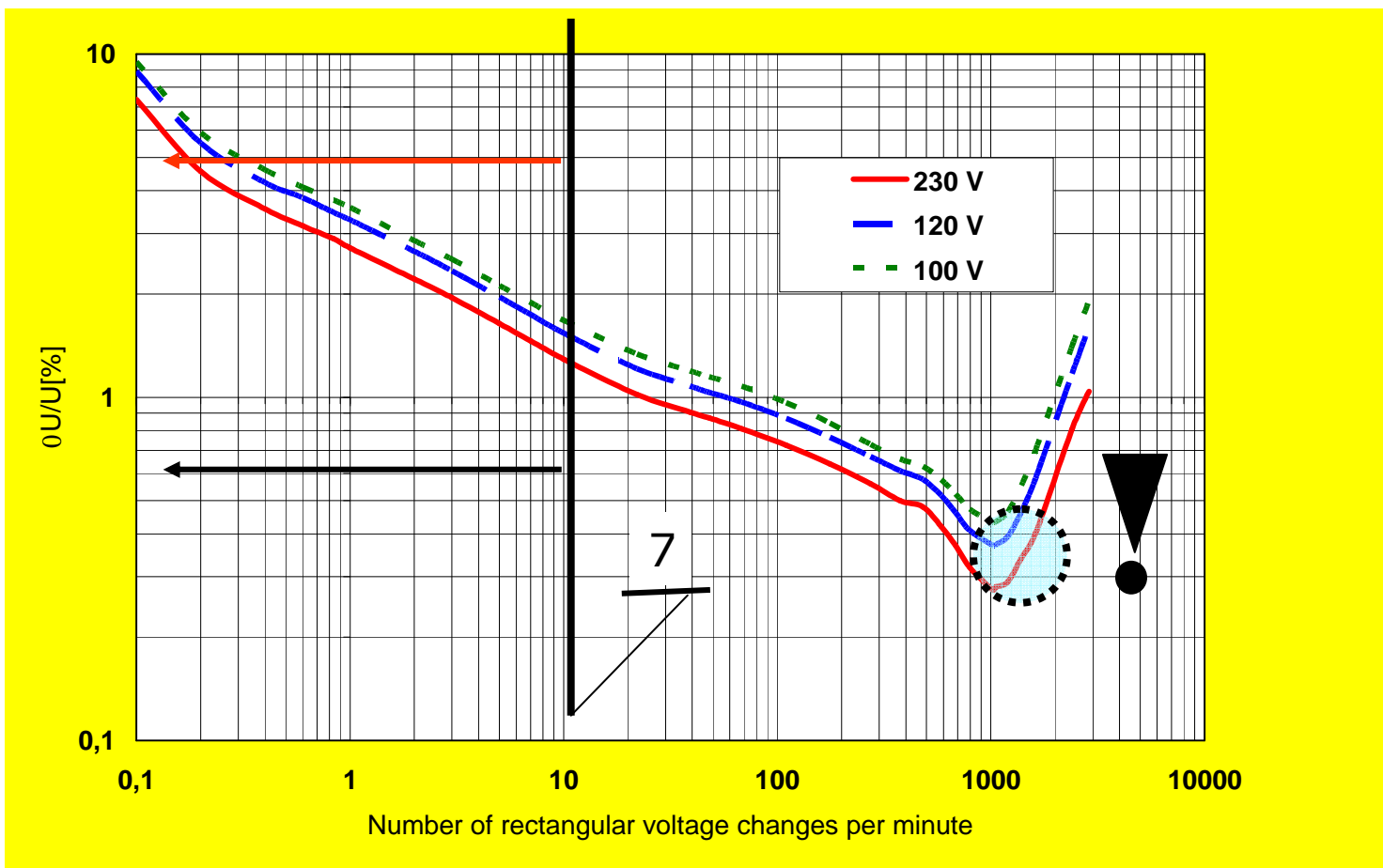
**$d = \Delta U / U_N$  [%] i częstotliwość**

**Współczynniki wahań napięcia  
(migotania światła)  $P_{st}$  i  $P_{lt}$**

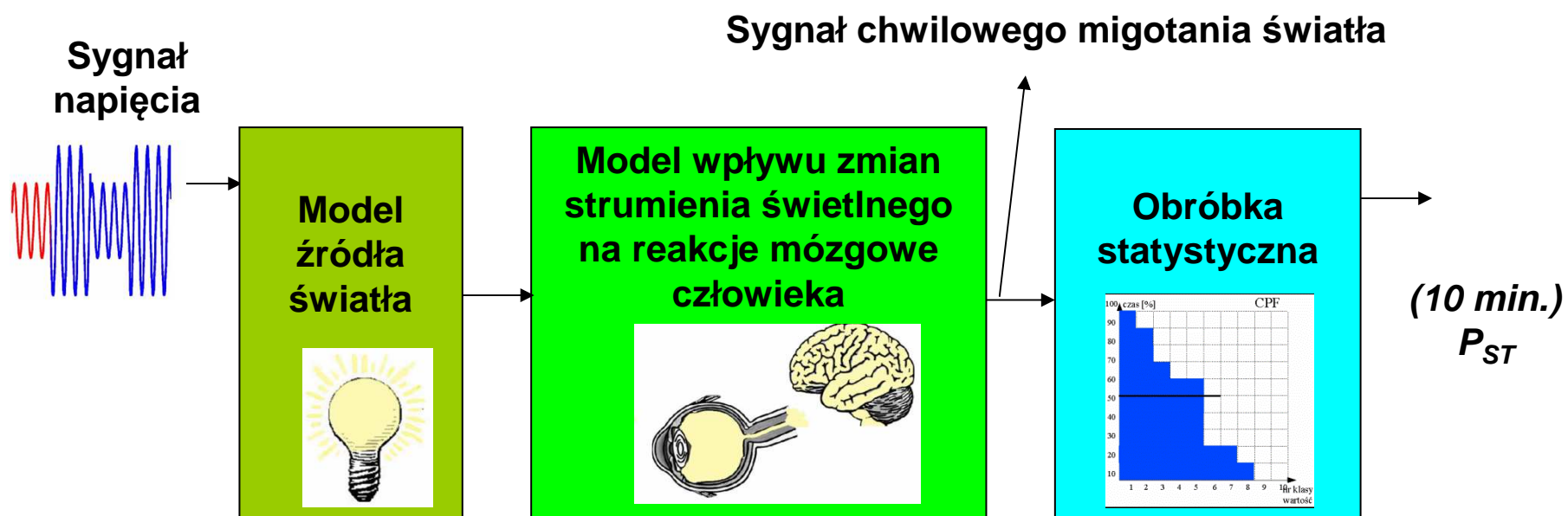
## 7. Zmian napięcia



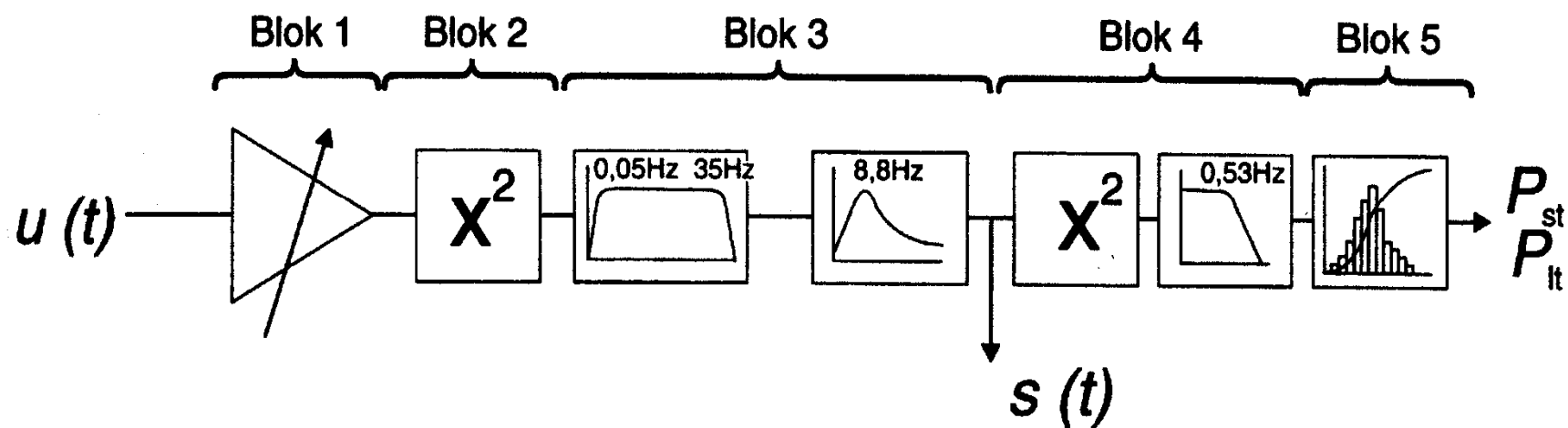
# POMIAR WAHAŃ NAPIĘCIA



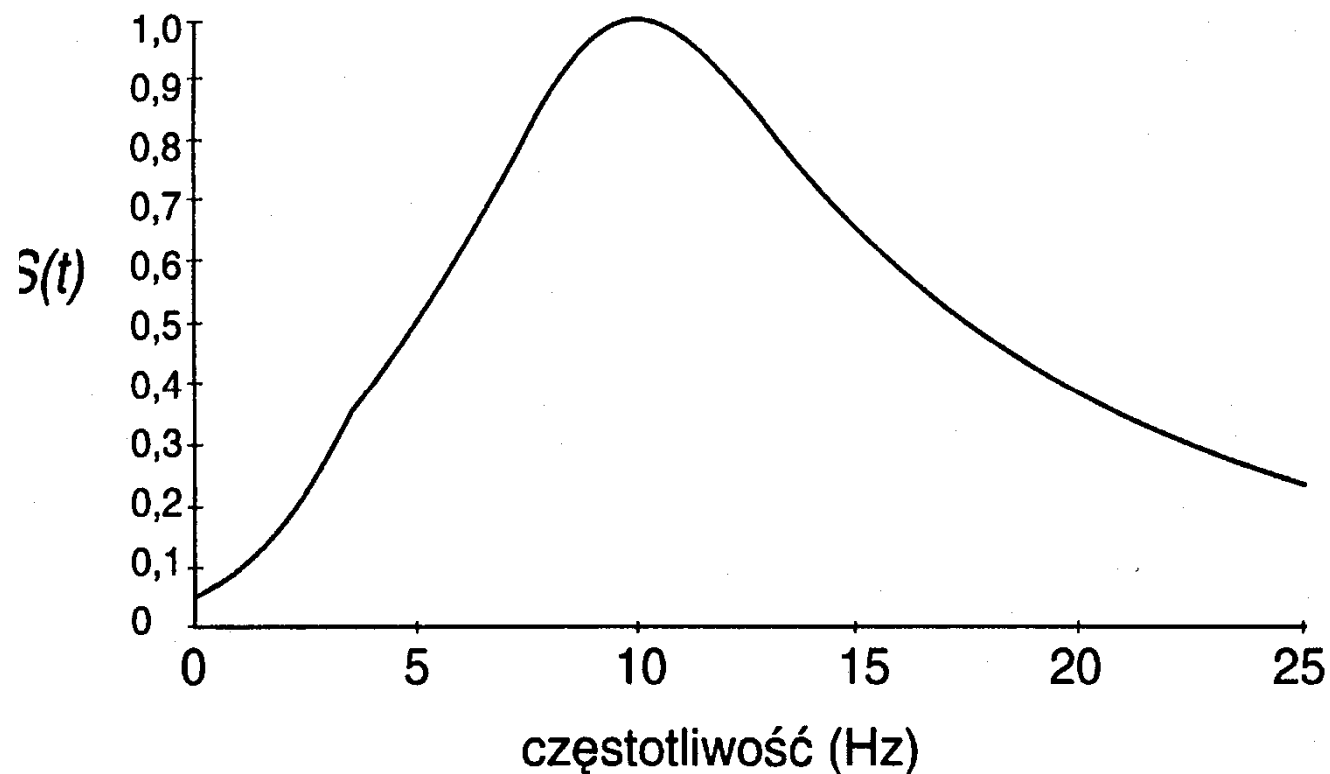
# POMIAR WAHAŃ NAPIĘCIA



# POMIAR WAHAŃ NAPIĘCIA

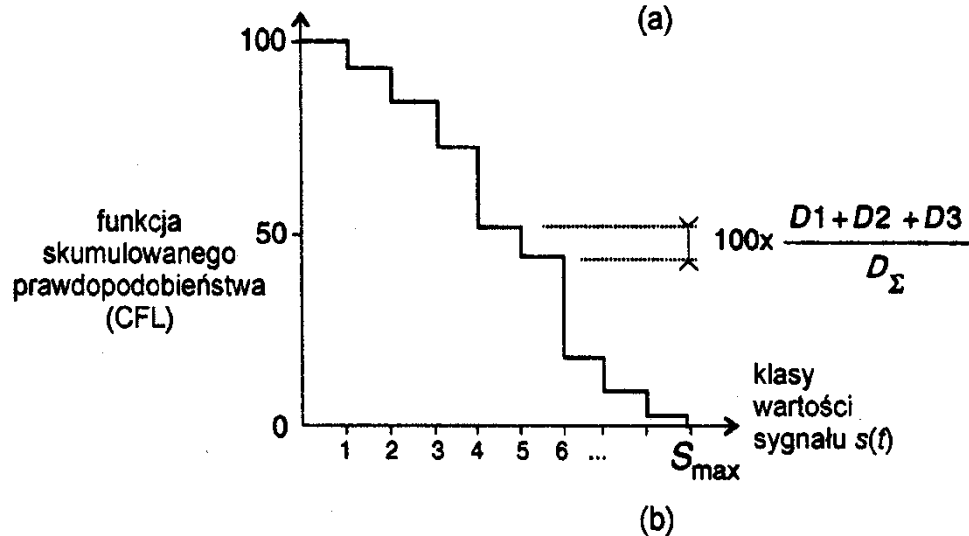
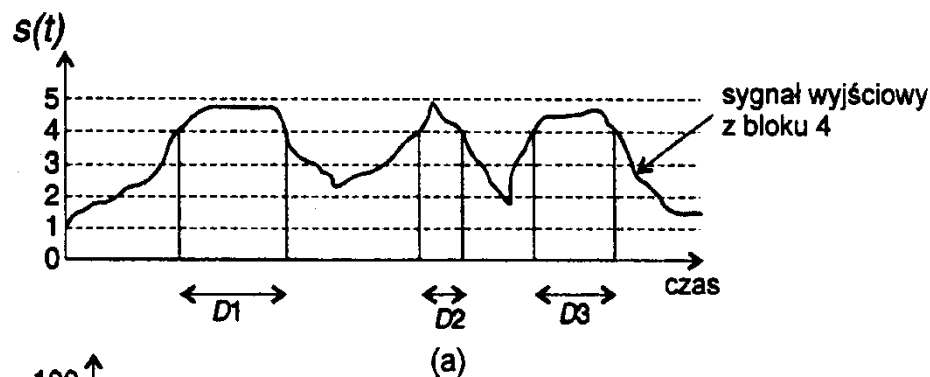


**Schemat blokowy miernika migotania światła UIE**



**Charakterystyka częstotliwościowa filtru ważonego miernika migotania światła UIE**

# POMIAR WAHAŃ NAPIĘCIA



**ilustracja sposobu  
wyznaczania czasu  
występowania  
migotania na różnych  
poziomach wartości**





# WSPÓŁCZYNNIKI CHARAKTERYZUJĄCE WAHANIA NAPIĘCIA

Krótkoterminowy współczynnik migotania światła

$$P_{st} = \sqrt{0.0314 P_{0,1} + 0.0525 P_{1s} + 0.0657 P_{3s} + 0.28 P_{10s} + 0.08 P_{50s}}$$

**$P_{st}$  10 min**

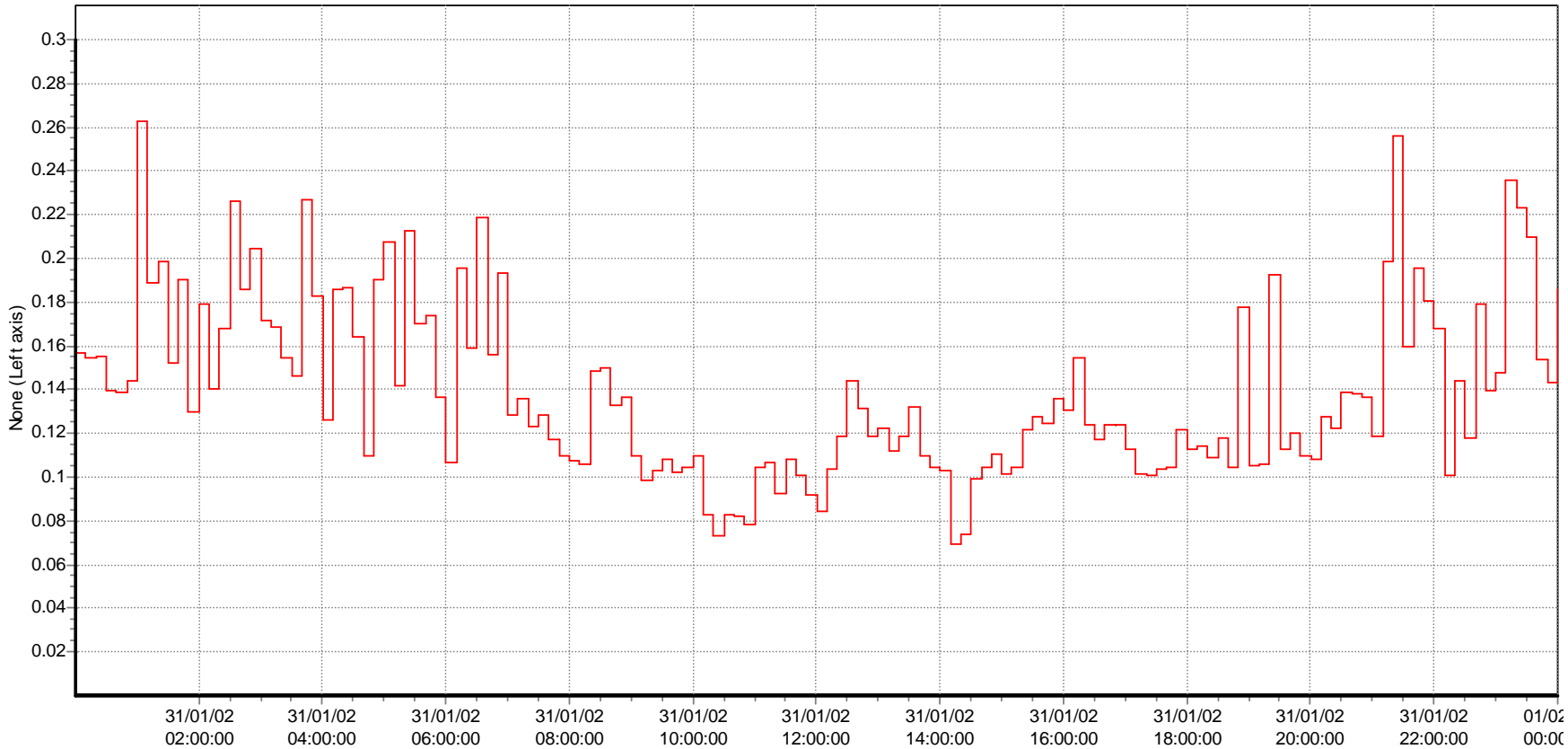
**$P_{lt}$  2h**

$$P_{LT} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{STi}^3}{N}}$$



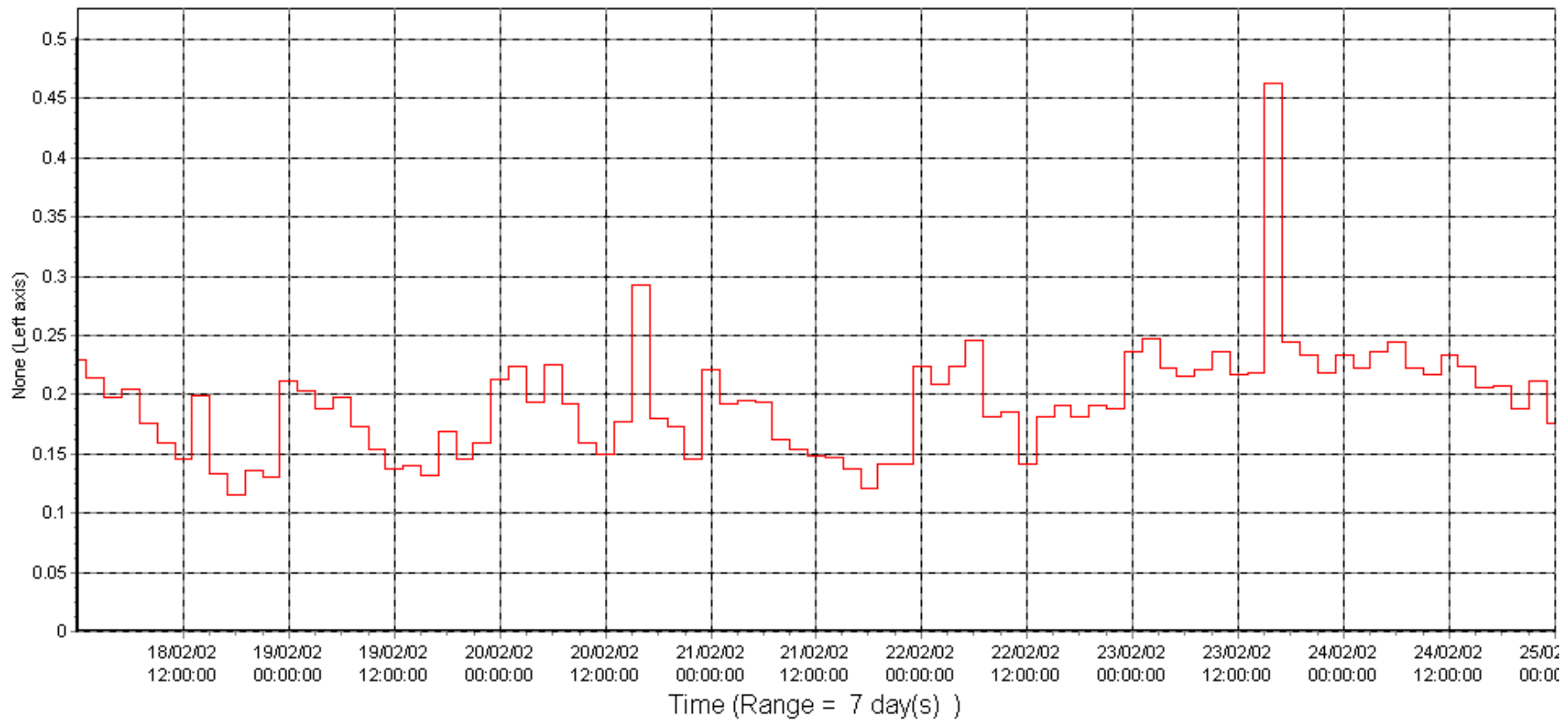
# WSPÓŁCZYNNIK Pst

Permanent recording graph



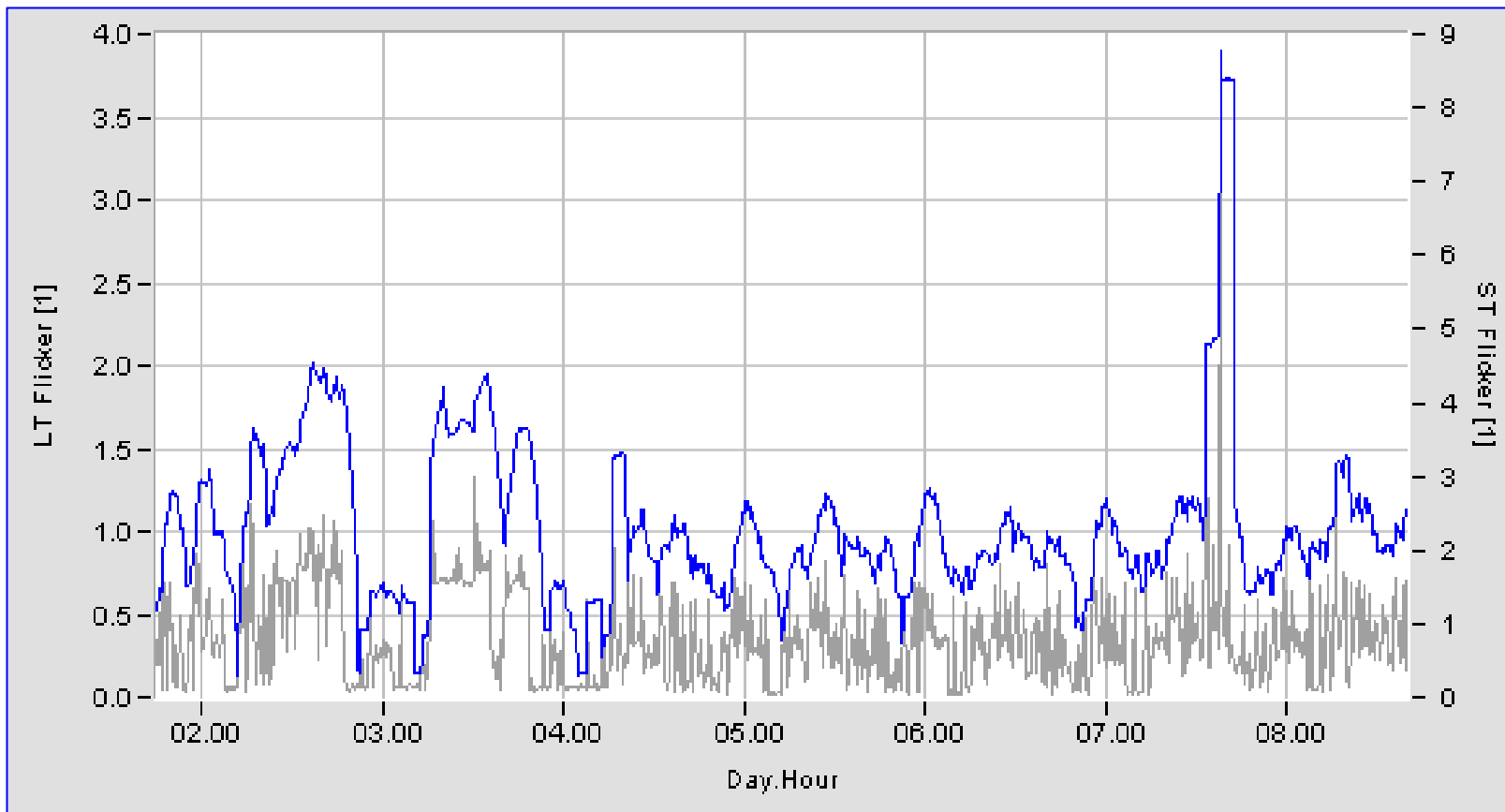


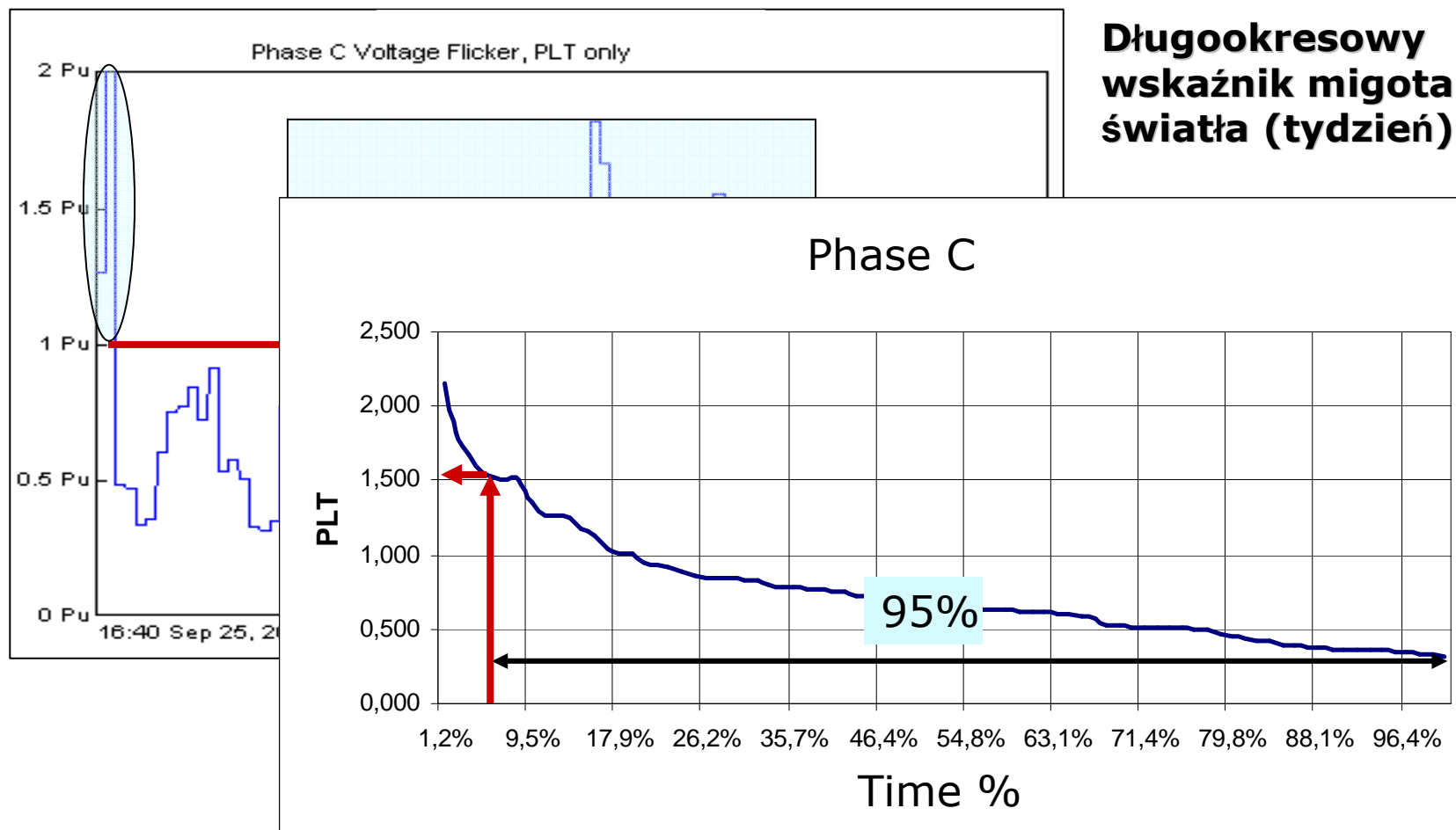
# WSPÓŁCZYNNIK PIt





# WSPÓŁCZYNNIK Pst i Plt

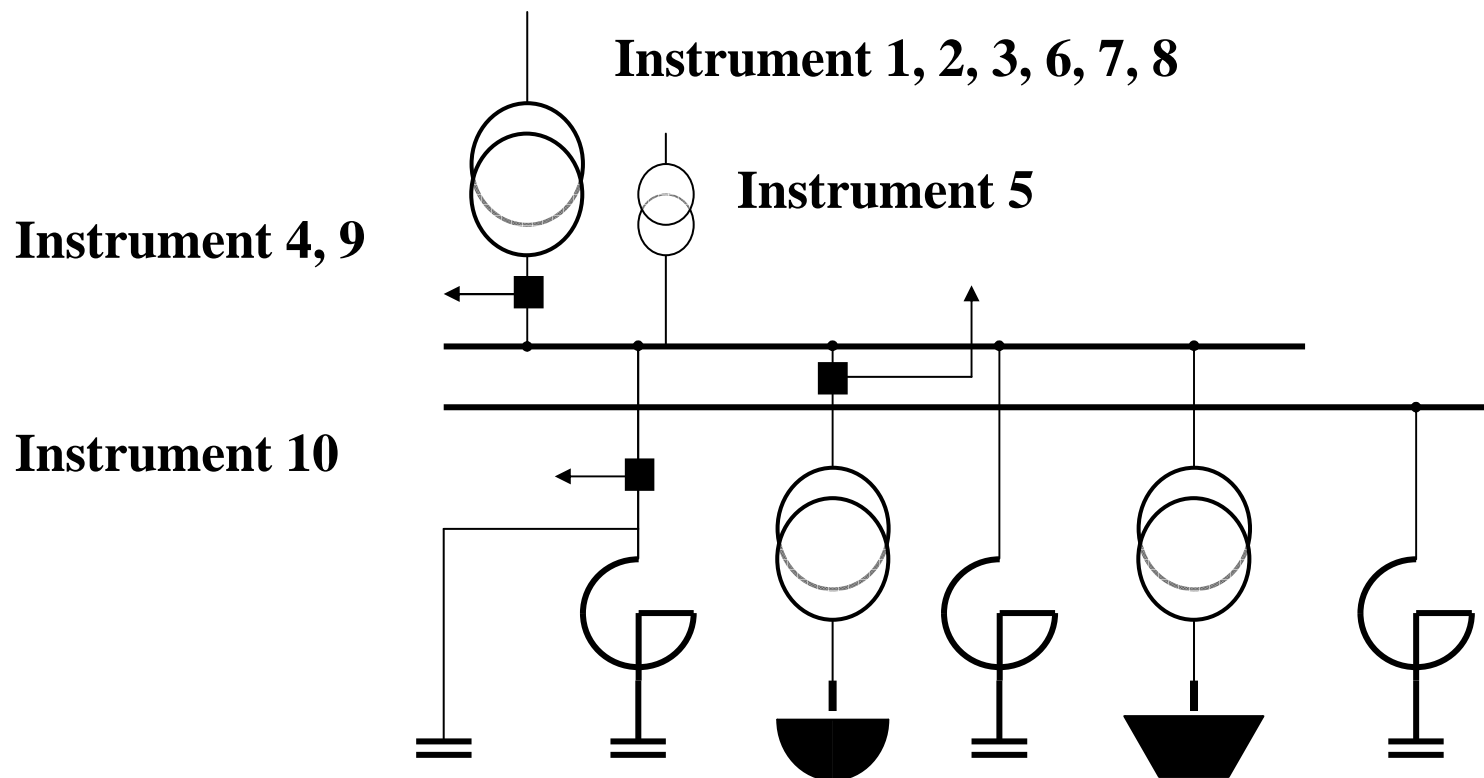




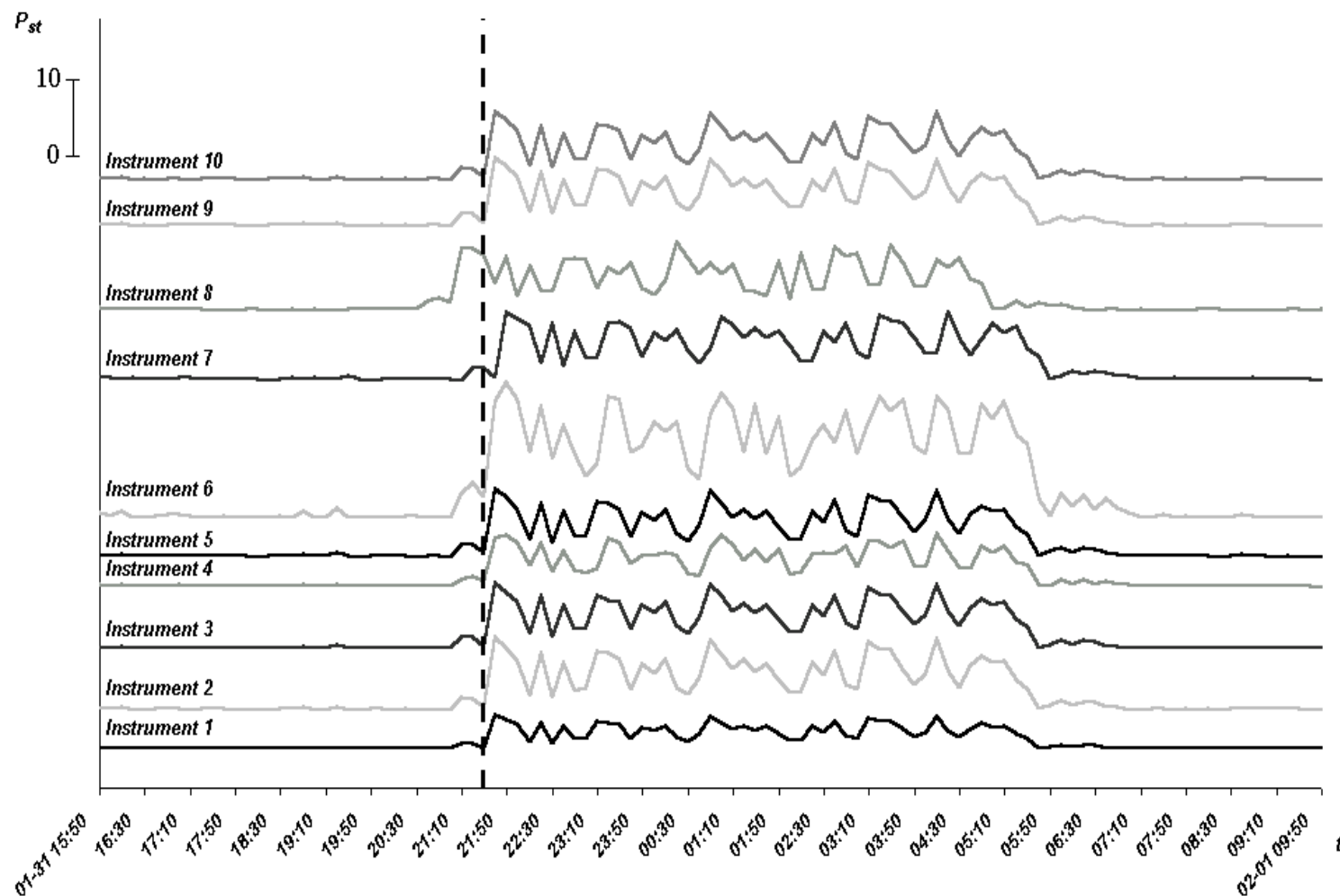
**Długookresowy  
wskaźnik migotania  
światła (tydzień) *Plt***

**Charakterystyka uporządkowana *Plt* będąca podstawą wyznaczania wartości *P95***

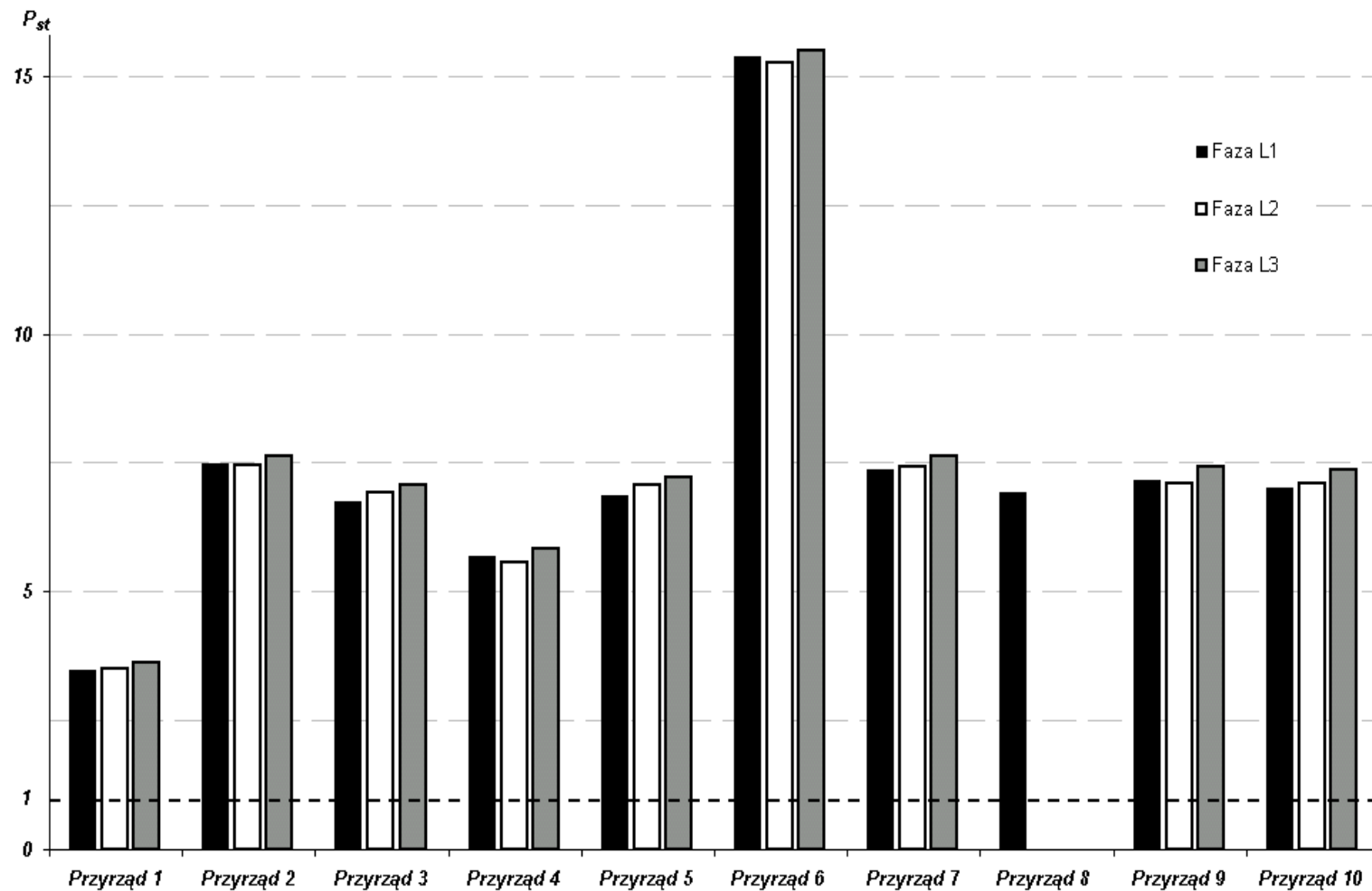
# POMIAR WAHAŃ NAPIĘCIA



# POMIAR WAHAŃ NAPIĘCIA



# POMIAR WAHAŃ NAPIĘCIA







# **NORMALIZACJA**





**EN 61000-4-30: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), Część 4-30: Metody badań i pomiarów - Metody pomiaru jakości energii**



**IEC 61000-4-15: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), Metody badań i pomiarów - Miernik migotania światła - Specyfikacja funkcjonalna i projektowa**

**IEC 61000-3-7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems**



AGH

## POZIOMY ODPORNOŚCI

### IEC 61000-4-14: Voltage fluctuation Immunity test

**Klasa 1** - dotyczy urządzeń szczególnie wrażliwych na zmiany (wahania) napięcia, dla których poziomy kompatybilności są niższe niż przyjęte dla sieci publicznych. Dla tych urządzeń należy stosować specjalne sposoby zasilania z wykorzystaniem różnego rodzaju filtrów, układów UPS, itp.

**Klasa 2** - dotyczy urządzeń przyłączonych do punktu wspólnego przyłączenia (PWP) zarówno w sieci publicznej jak i przemysłowej.

**Klasa 3** - dotyczy urządzeń przeznaczonych do pracy w środowisku przemysłowym, dla których poziomy kompatybilności są wyższe niż dla urządzeń klasy 2.



AGH

# CHARAKTERYSTYKI NAPIĘCIA

## PN EN 50 160

### POZIOMY PLANOWANE

	POZIOMY PLANOWANE		
	nN	SN	WN i NN
$P_{st}$	1,0	0,9 (1,0)	0,8 (0,8)
$P_{lt}$	0,7	0,7	0,6

W nawiasach podano wartości rekomendowane przez UIE



# Wymagania jakościowe różniące się od EN 50 160

Supply voltage variations	ES, FR*, HU, NO, PT (only for EHV-HV customers)
Rapid voltage changes	NO
Flicker severity	NO, PT (only for EHV-HV customers)
Voltage dips	FR* (customised engagement on request only for MV and HV customers)
Temporary or transient overvoltages	FR*
Voltage unbalance	FR*, NO
Harmonic distortion of voltage waveform	FR*, NO, PT
Interharmonic voltage	None
Mains signalling voltage	None

(\*) In France the voltage quality limits are set in the contracts between the customer and the distribution/transmission operator; the regulator surveys the contracts but does not set standards.



# Wahania napięcia

## Wartości graniczne wahań napięcia przyjęte Norwegii

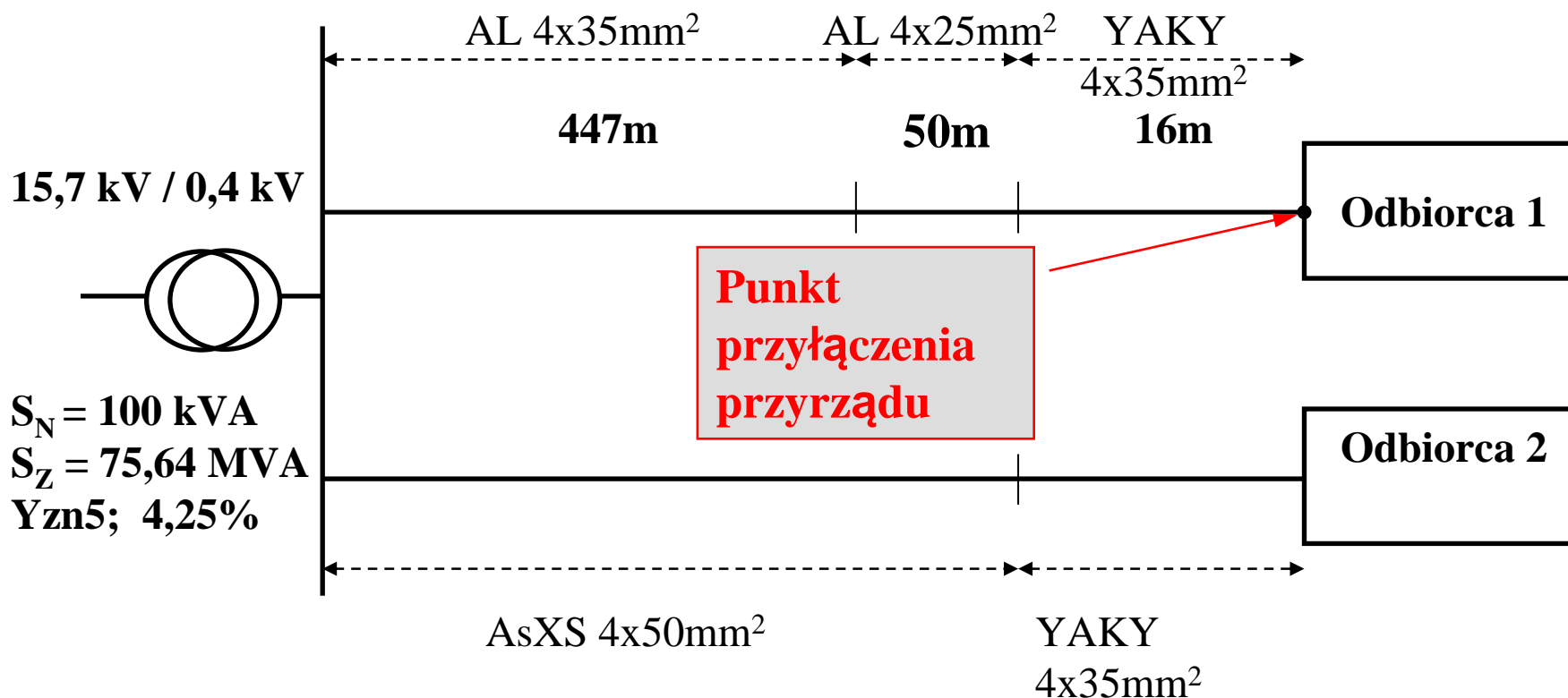
Wskaźnik	$0,23 \leq U_N \leq 35 \text{ kV}$	$35 \text{ kV} < U_N$	Przedział czasu
$P_{ST}$	1,2	1,0	95% tygodnia
$P_{LT}$	1,0	0,8	100% tygodnia

**Rodzaj zasilania:**

**3-fazy, 4-przewody**

**Napięcie znamionowe:**

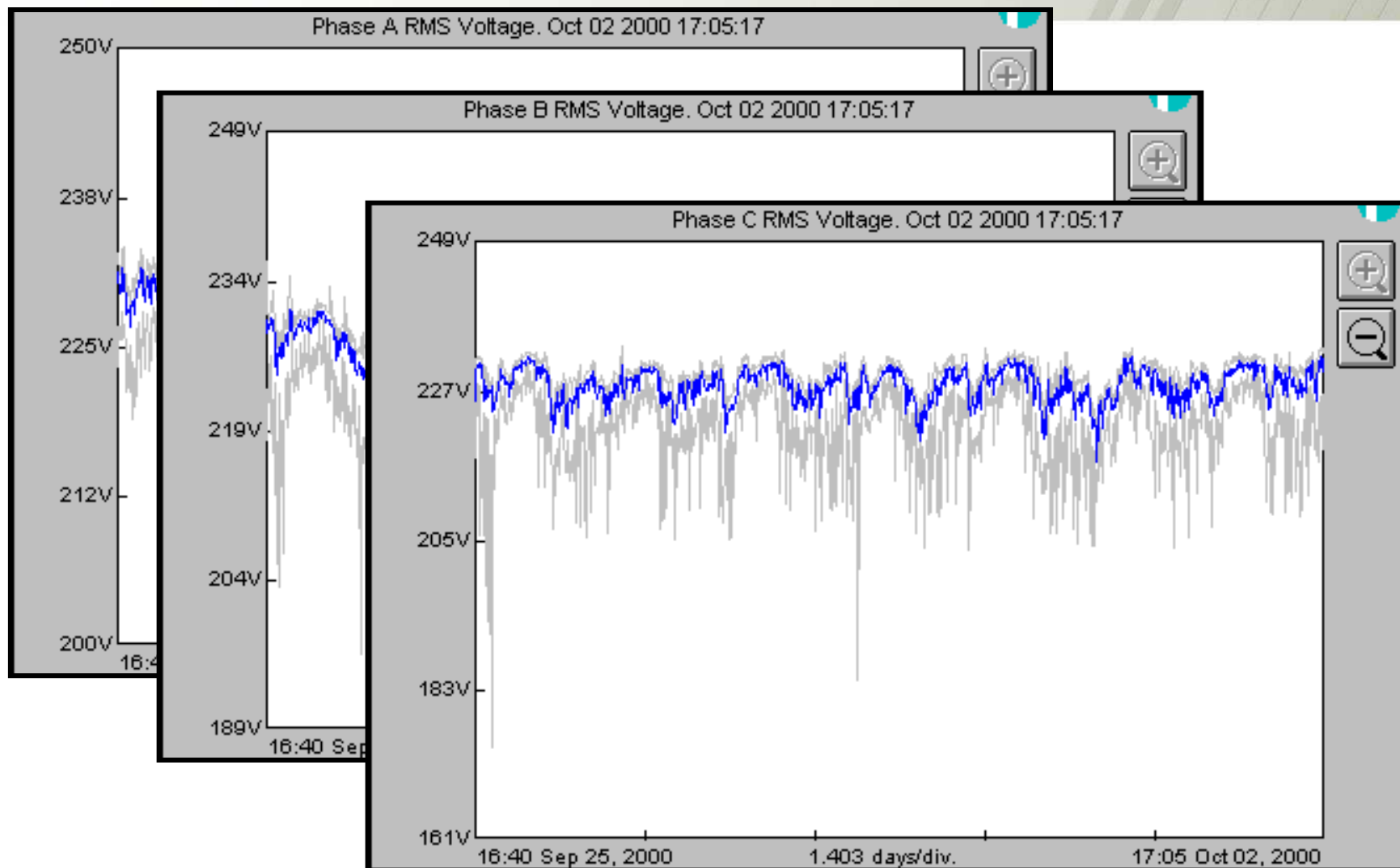
**230V**





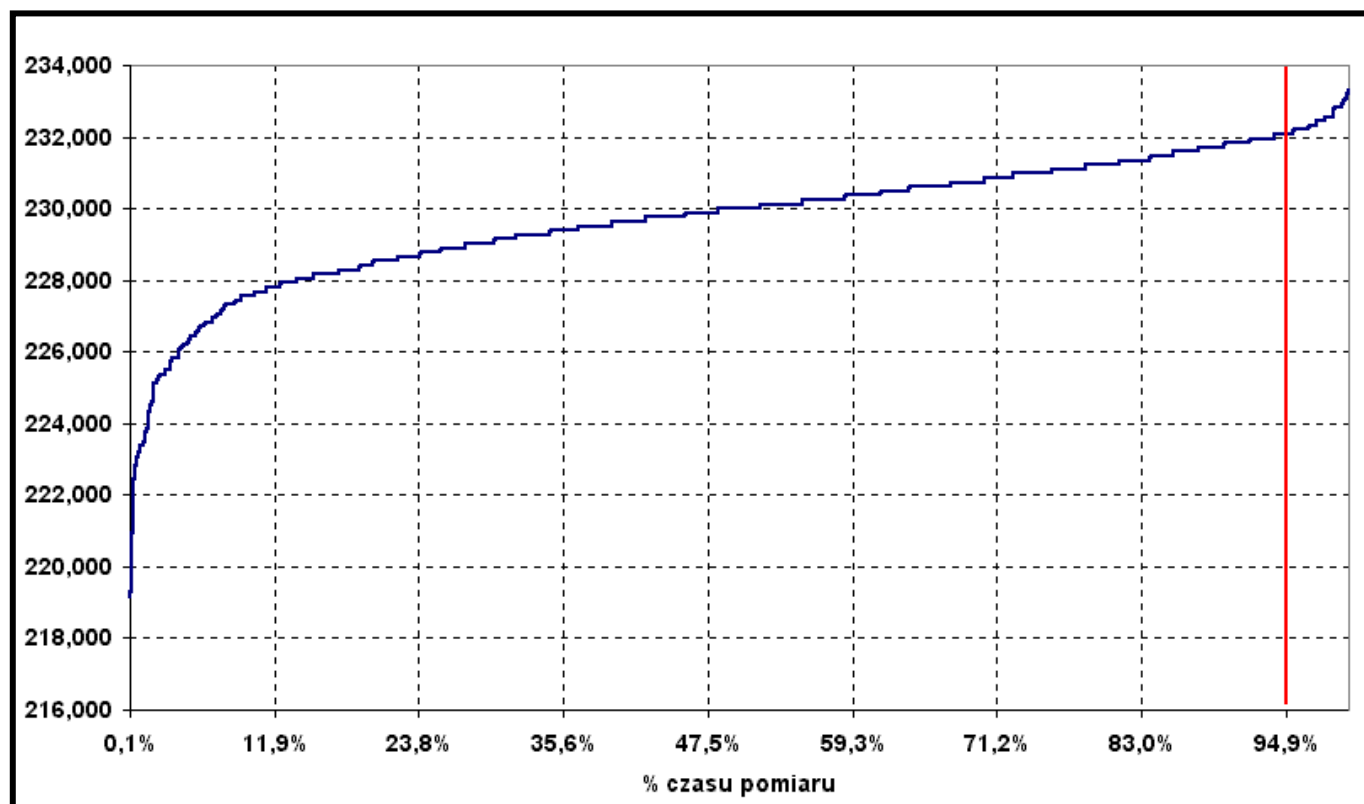
AGH

# PRZYKŁAD – Warunki zasilania odbiorcy komunalnego





## PRZYKŁAD – Warunki zasilania odbiorcy komunalnego

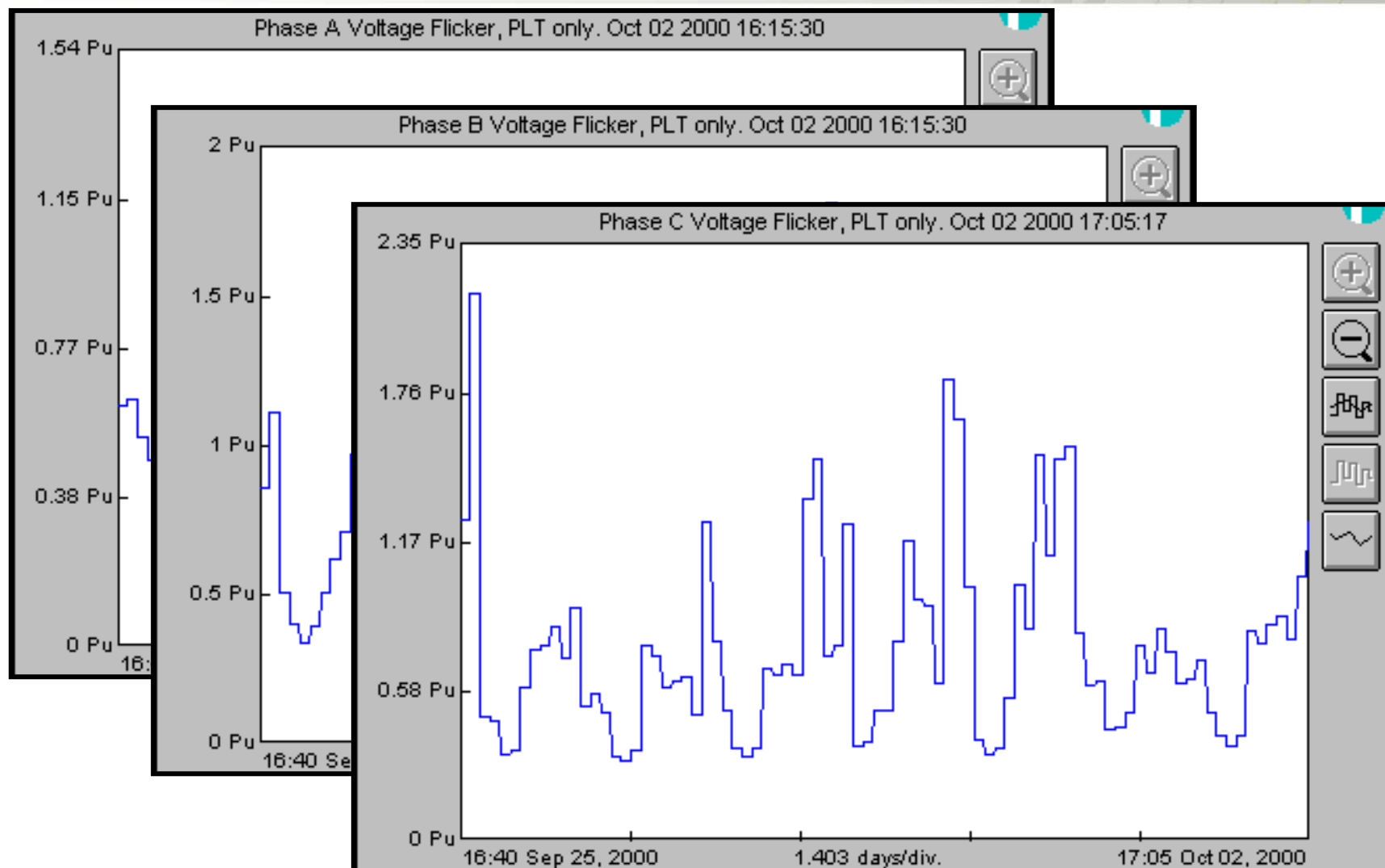


**Kwantyl 95% -  $U_{A95} = 232.2V$**

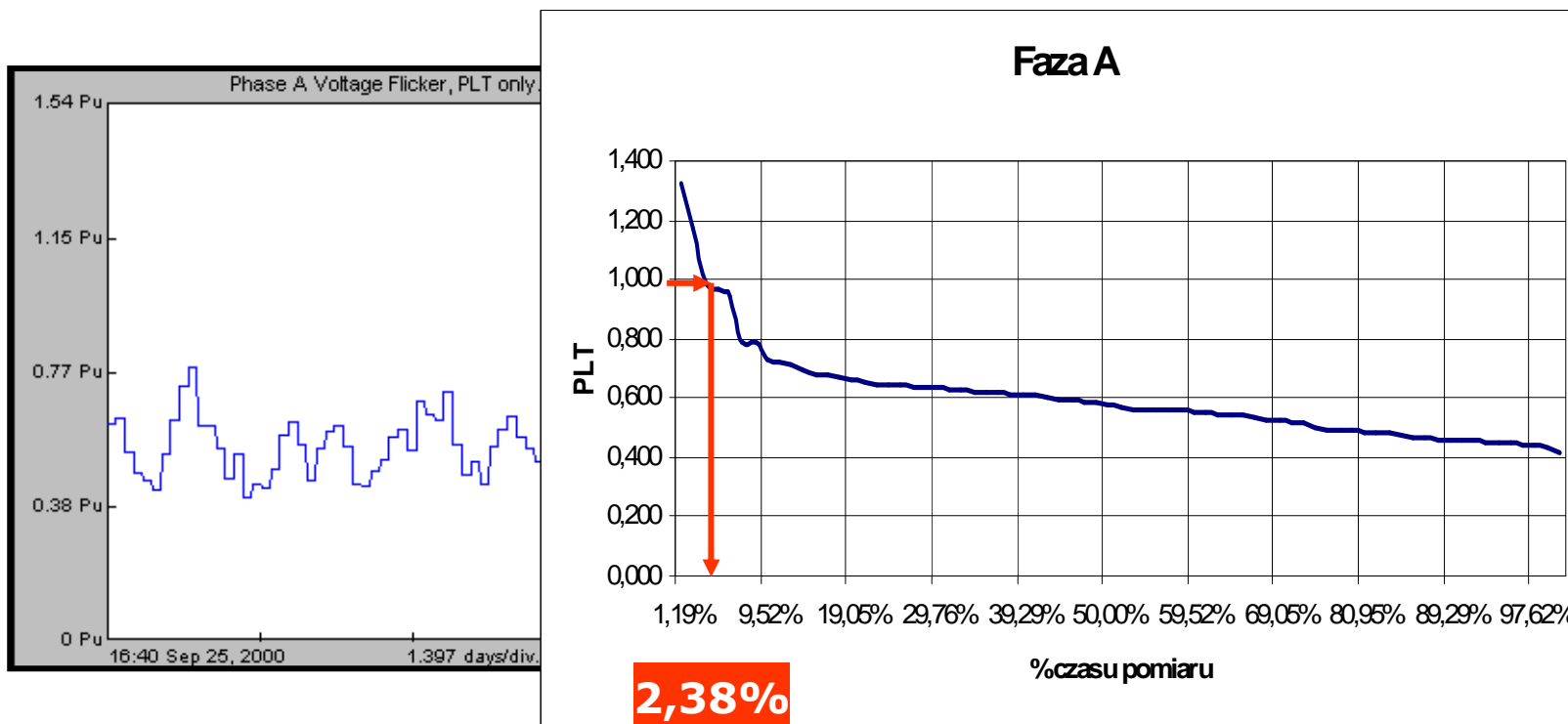


AGH

# PRZYKŁAD – Warunki zasilania odbiorcy komunalnego

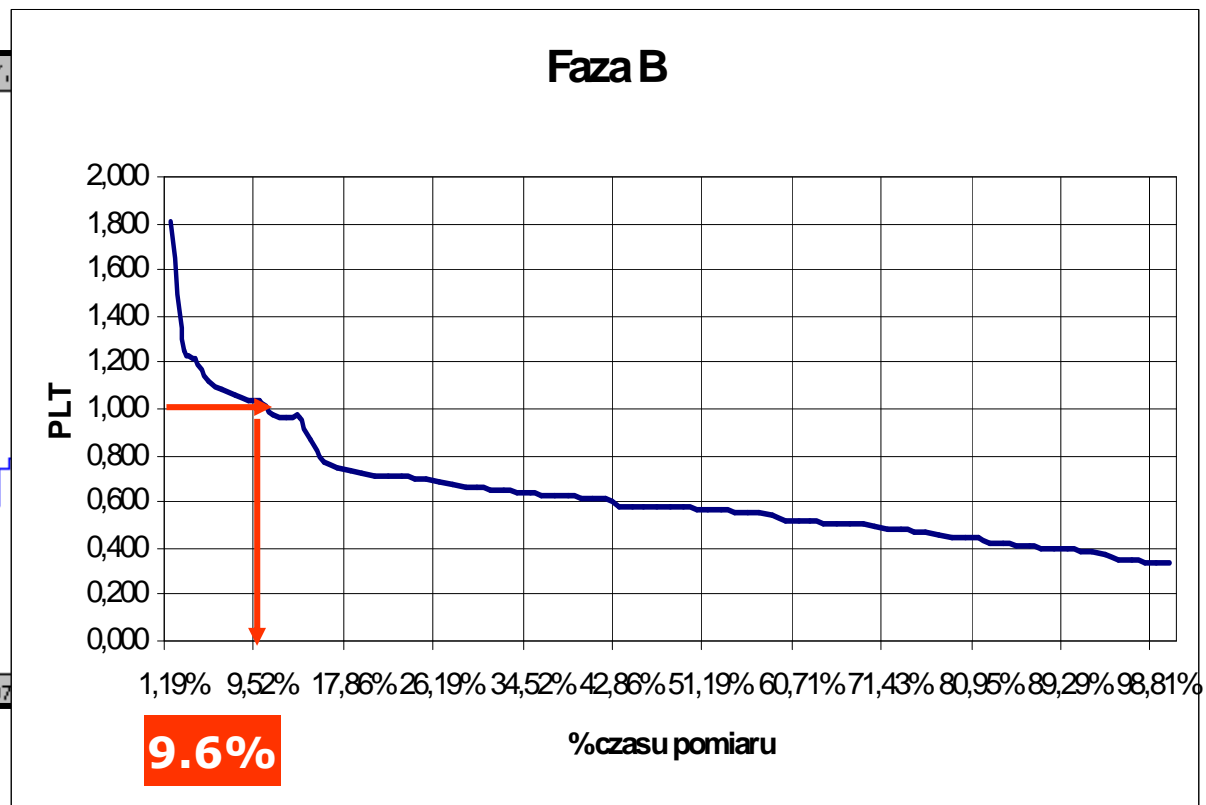
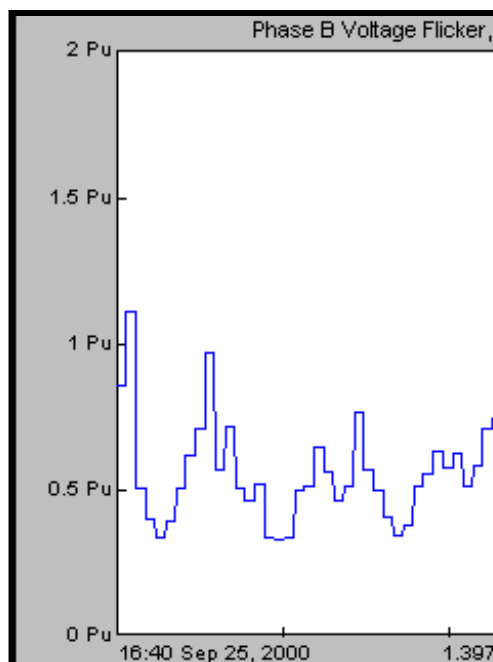


# PRZYKŁAD – Warunki zasilania odbiorcy komunalnego



Procent czasu tygodnia podczas którego, w fazie A, wartość współczynnika  $P_{lt}$  przekracza 1 – **2,38%**.

# PRZYKŁAD – Warunki zasilania odbiorcy komunalnego

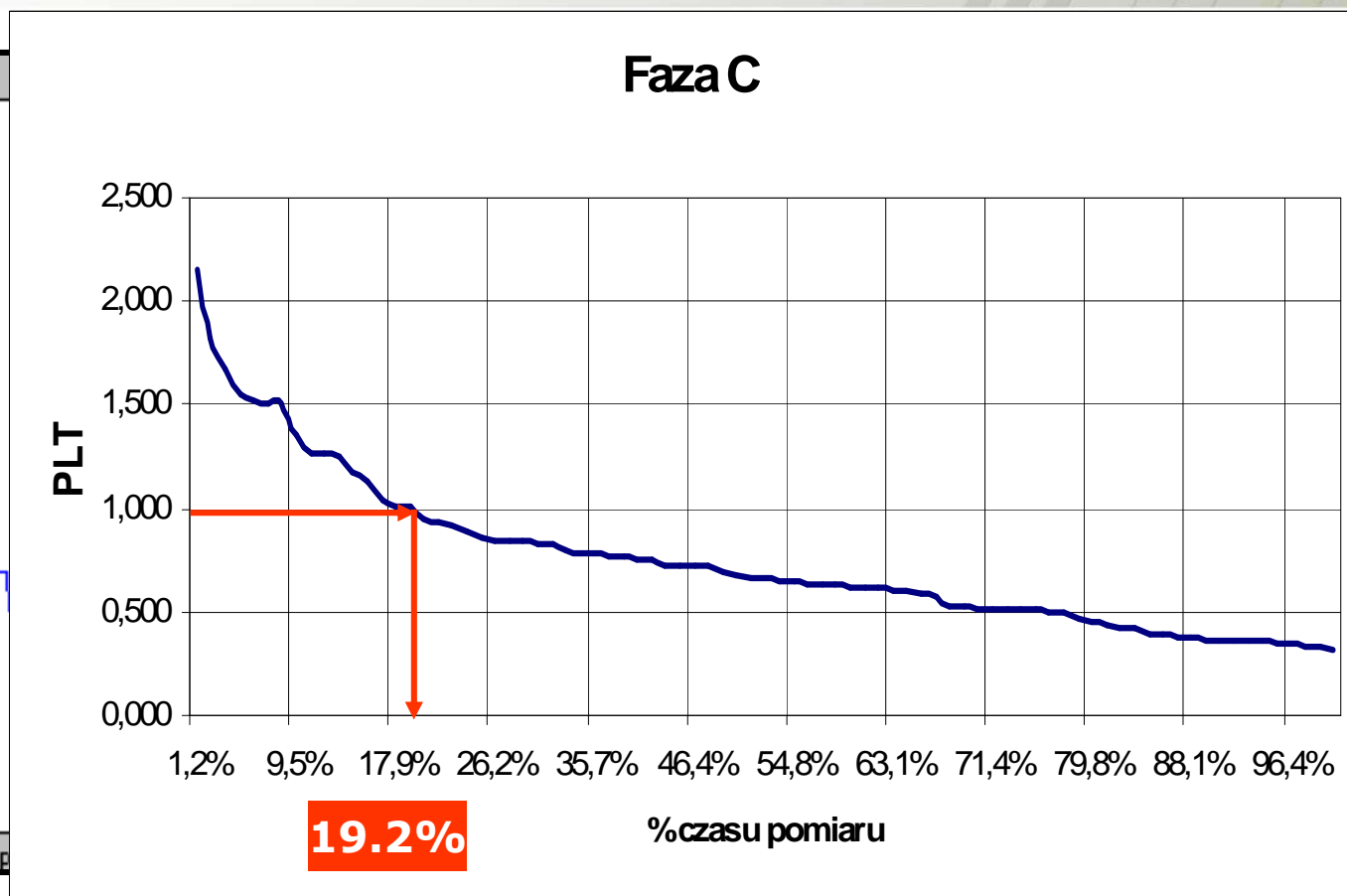
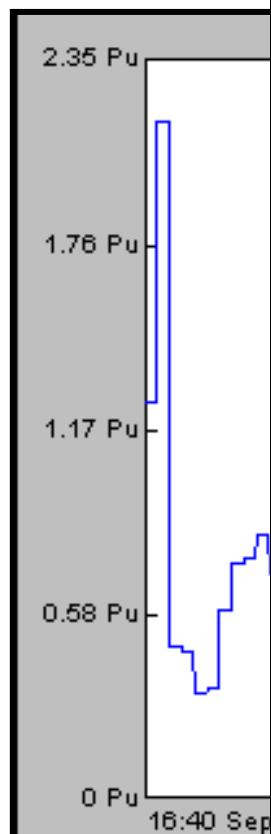


Procent czasu tygodnia podczas którego, w fazie B, wartość współczynnika  $Plt$  przekracza 1 – **9,6%**.



AGH

## PRZYKŁAD – Warunki zasilania odbiorcy komunalnego

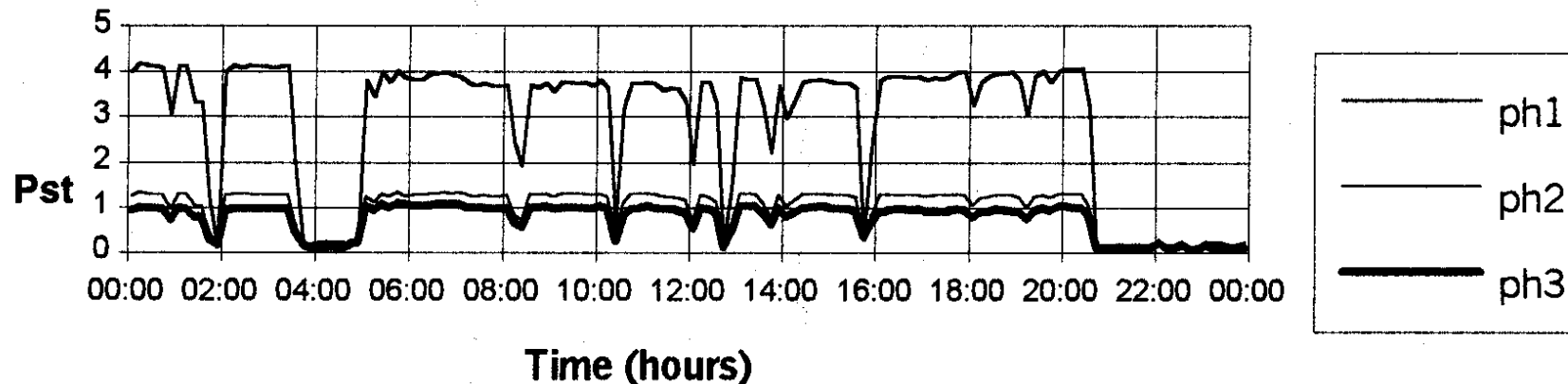


Procent czasu tygodnia podczas którego, w fazie C, wartość współczynnika *Plt* przekracza 1 – **19,2%**.

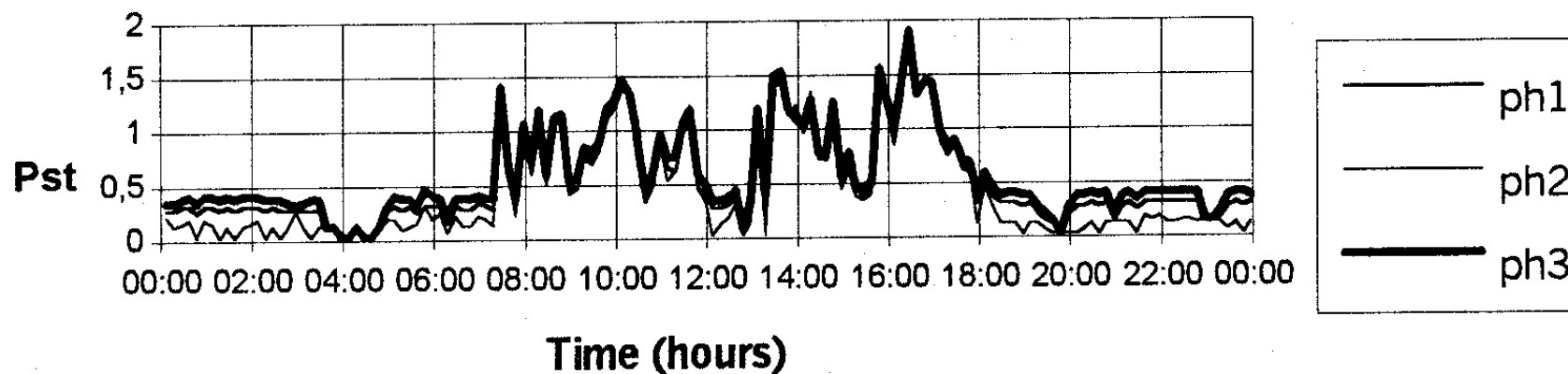


# PRZYKŁAD – Warunki zasilania odbiorcy komunalnego

AGH



## Jednofazowa spawarka



## Trójfazowa spawarka



# **SPOSOBY REDUKCJI I ELIMINACJI SKUTKÓW WAHAŃ NAPIĘCIA**



# SPOSOBY REDUKCJI WAHAŃ NAPIĘCIA

**Zwiększenie mocy zwarciowej w punkcie zasilania odbiorników niespokojnych można uzyskać poprzez:**

**zastosowanie do zasilania odbiorników transformatora o większej mocy znamionowej i mniejszym napięciu zwarcia,**

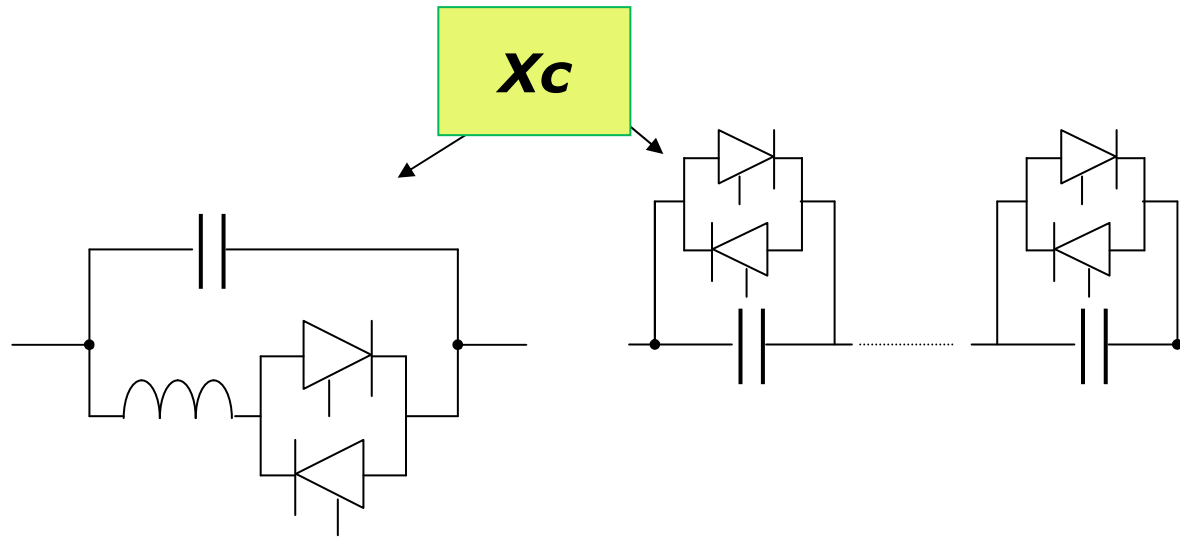
**przyłączenie odbiorników niespokojnych do sieci o wyższym napięciu znamionowym (poprzez odpowiedni transformator),**

**zasilanie odbiorników niespokojnych o dużych mocach za pomocą specjalnych (adresowanych) linii bezpośrednio ze stacji wysokiego napięcia energetyki zawodowej,**

**zastosowanie kondensatorów szeregowych w układzie zasilającym (także szeregowych kondensatorów)**



# SPOSOBY REDUKCJI WAHAŃ NAPIĘCIA



$$X = X_L - X_C = \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}$$



# SPOSOBY REDUKCJI WAHAŃ NAPIĘCIA

**Piec łukowy – szeregowo dławiki, właściwa praca automatyki posuwu elektrod, wstępne przygotowanie wsadu, itp.**

**Spawarki – zasilanie z oddzielnych transformatorów, stosowanie agregatów trójfazowych, przytłaczanie do fazy nie obciążonej odbiornikami oświetleniowymi itp.**

**Układy złagodzonego rozruchu silników elektrycznych**

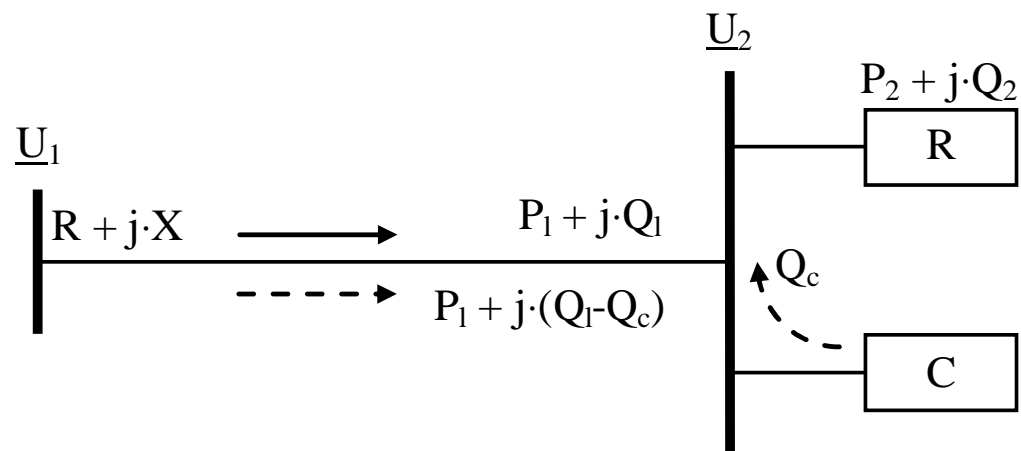
**Wzrost odporności odbiorników na wahania napięcia**



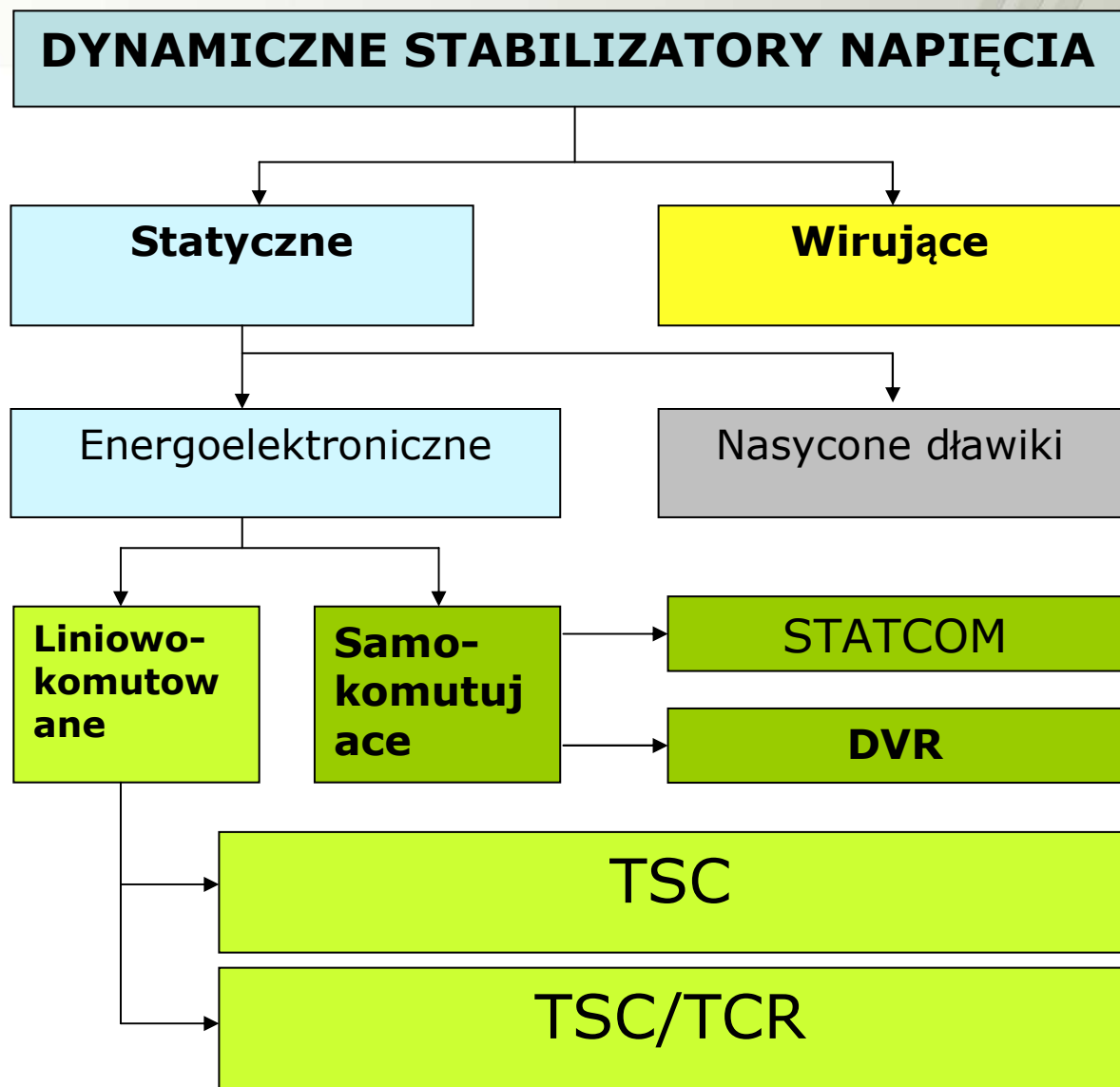
# SPOSOBY REDUKCJI WAHAŃ NAPIĘCIA

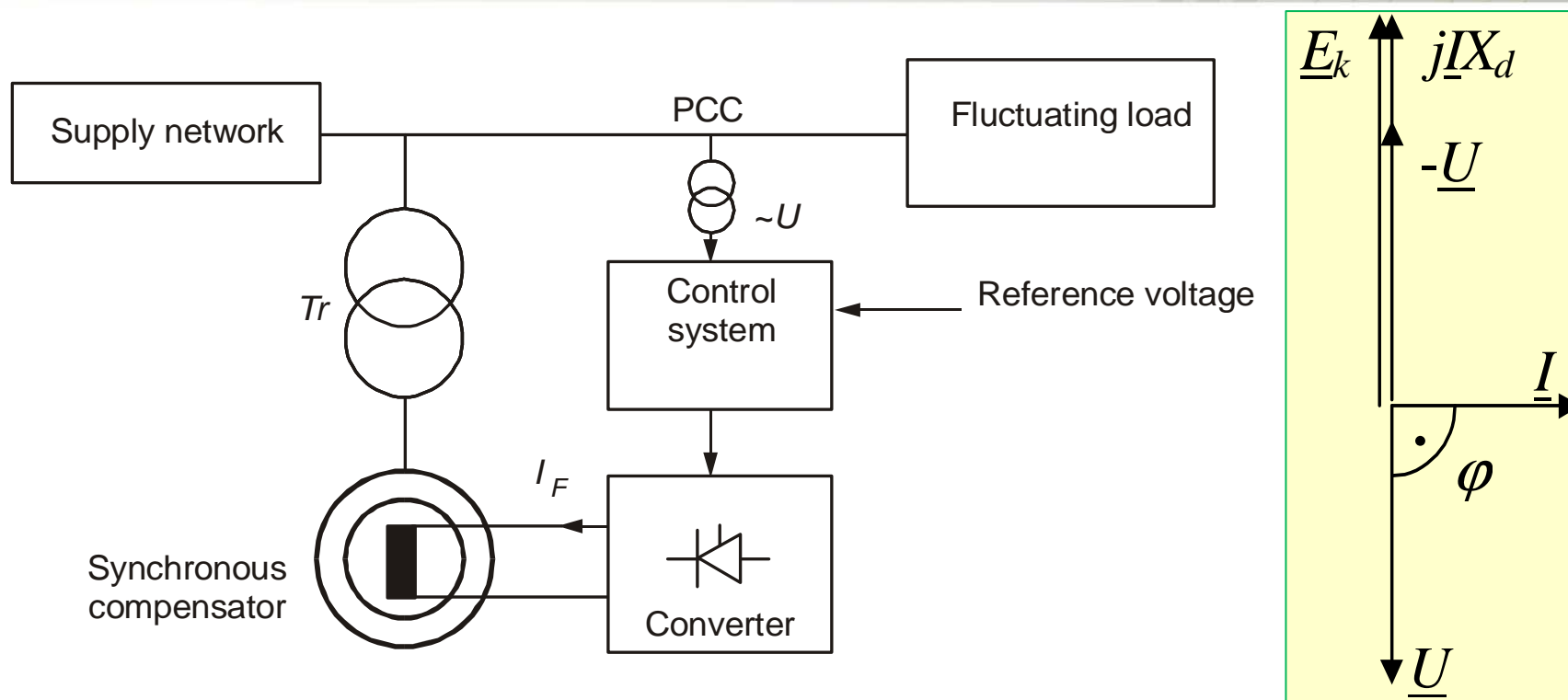
$$\frac{\Delta U}{U_N} \approx \frac{X \Delta Q}{U_N^2} = \frac{\Delta Q}{S_{zw}}$$

$$\frac{\Delta U^*}{U_N} \approx \frac{X(\Delta Q - \Delta Q_c)}{U_N^2} = \frac{\Delta Q - \Delta Q_c}{S_{zw}}$$



# SPOSOBY REDUKCJI WAHAŃ NAPIĘCIA



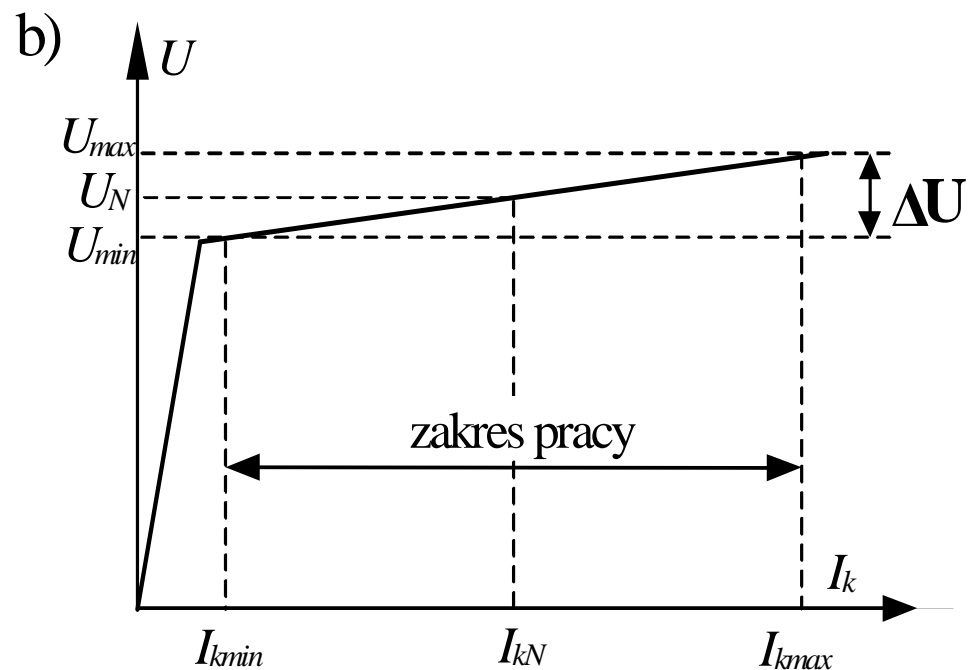
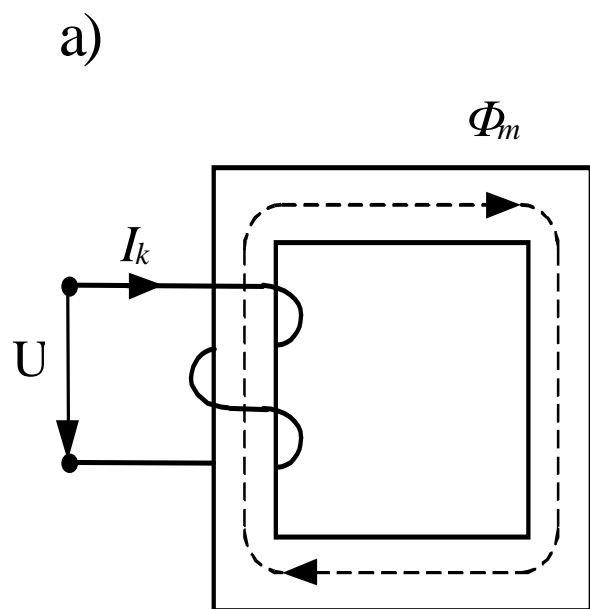


- (a) maszyna synchroniczna pracująca w układzie dynamicznego stabilizatora napięcia;  
 (b) wykres wskazowy

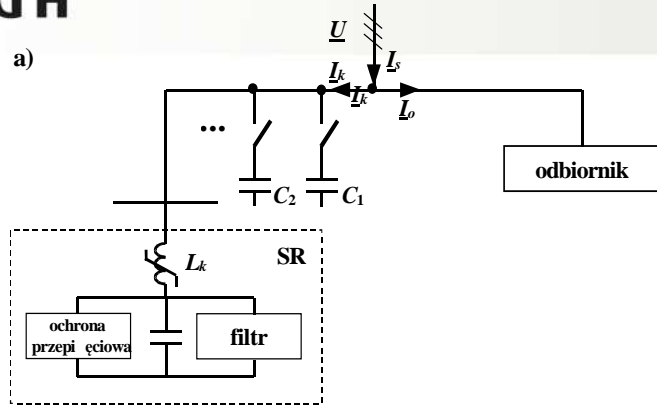
## *Kompensator z nasyconymi dławikami:*

Samonasycający się dławik (self-saturable reactor - SR)

Dławik z podmagnesowaniem prądem stałym

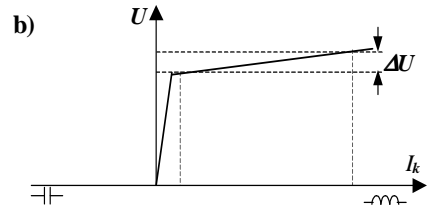


# KOMPENSATOR STATYCZNY

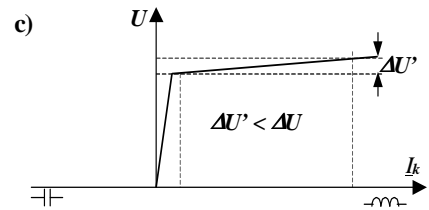


Kompensator z samonasycającym się dławikiem:

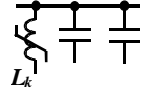
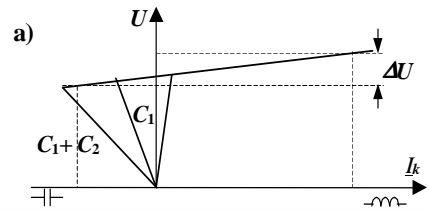
a) schemat układu



b) charakterystyka naturalna dławika



c) charakterystyka z korekcją nachylenia

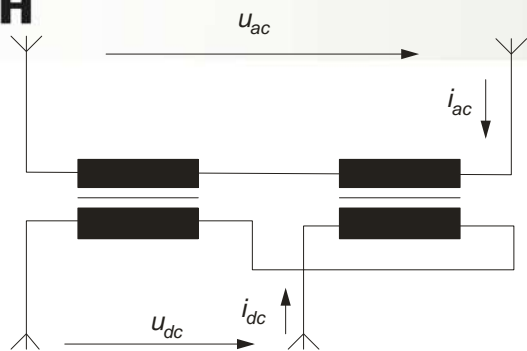


d) charakterystyka z równoległymi kondensatorami



AGH

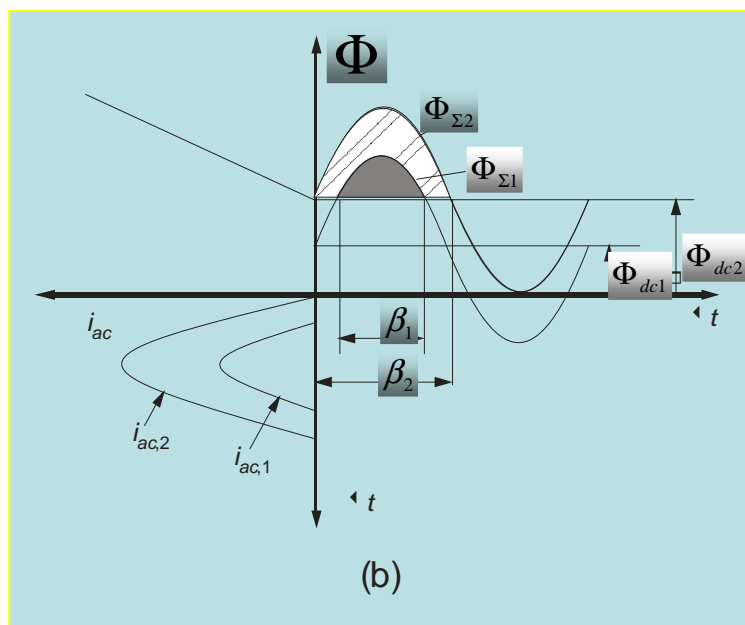
## DŁAWIK Z OBWODEM STERUJĄCYM PRĄDU STAŁEGO



(a)

a) jednofazowy schemat zastępczy;

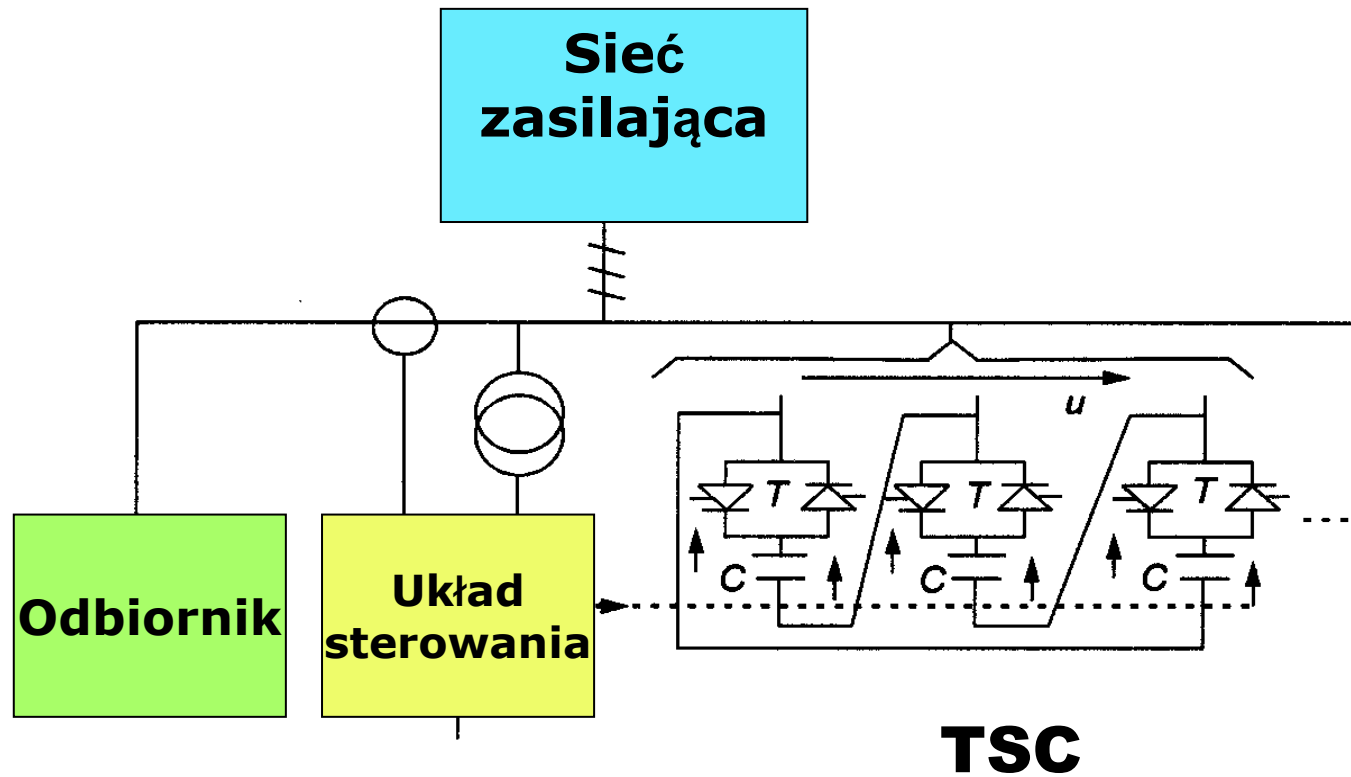
b) przebiegi czasowe strumieni magnetycznych ilustrujące zasadę działania kompensatora



(b)

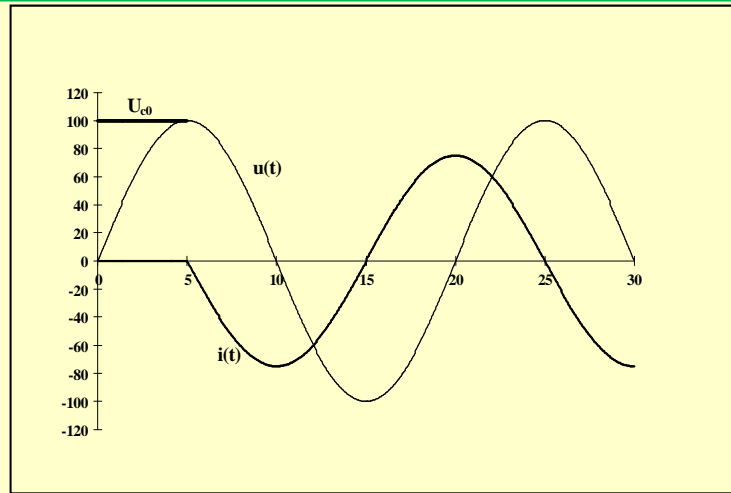


# THYRISTOR SWITCHED CAPACITORS (TSC)

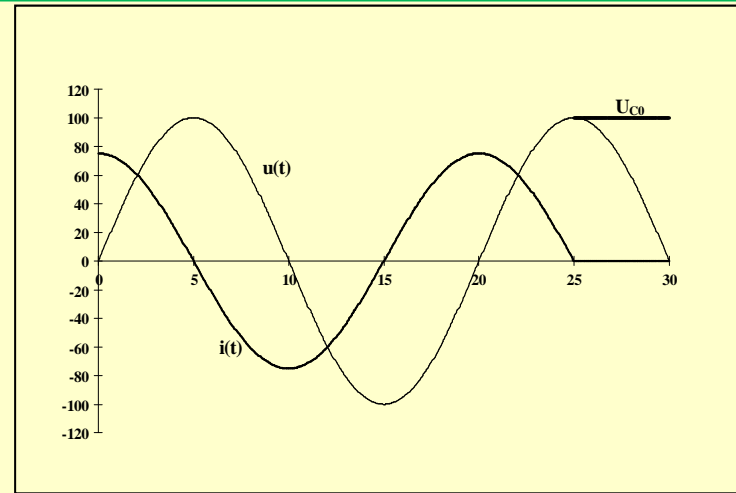




# THYRISTOR SWITCHED CAPACITORS (TSC)



a)



b)

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi_u) - nB_C \left( U_{C0} - \right.$$

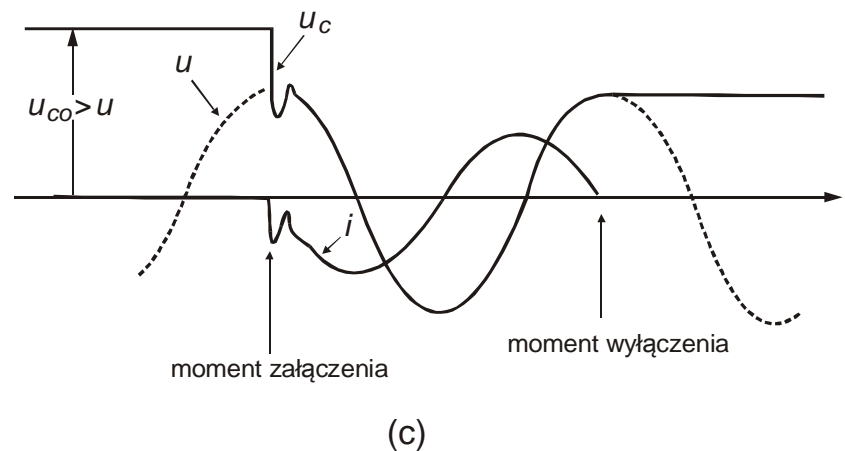
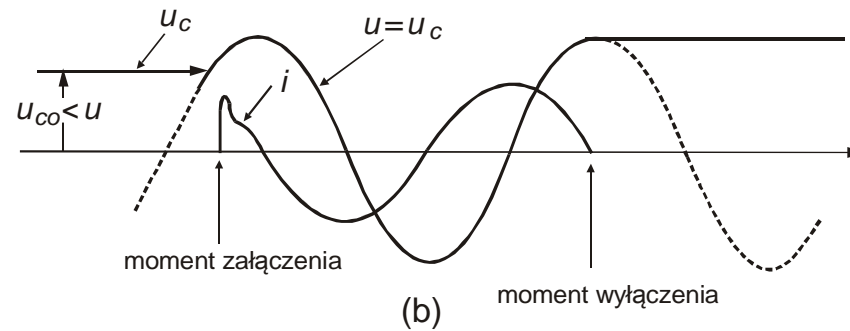
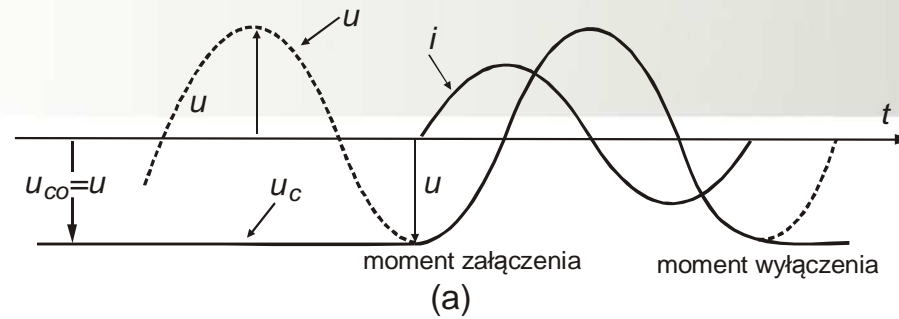
$$n = \sqrt{X_C / X_L}$$

$$\omega_n = 1$$

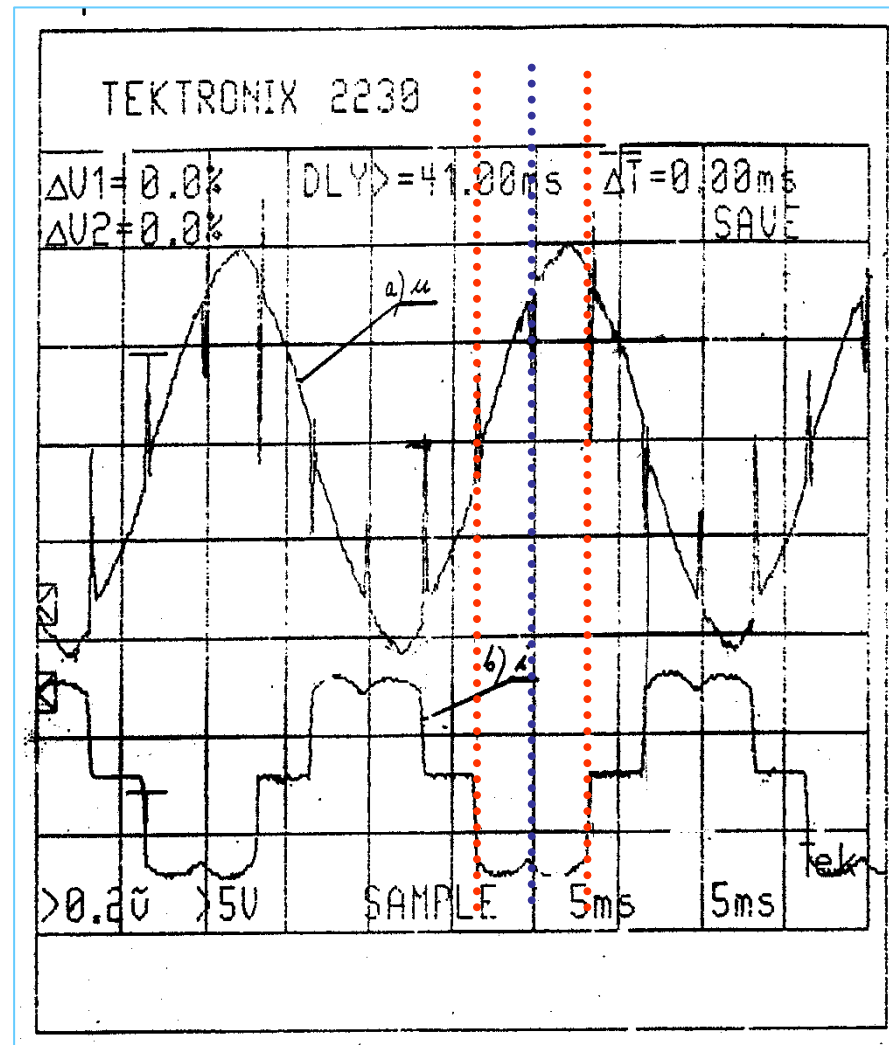
$$\cos \varphi_u = 0$$

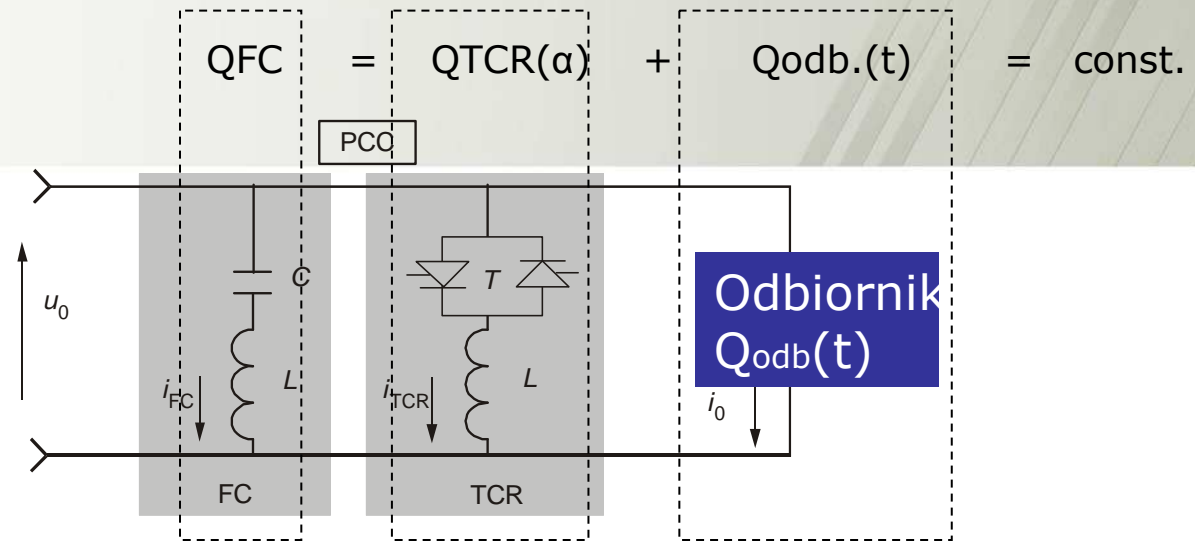
$$U_{C0} = \pm U_m \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega_n t$$

# THYRISTOR SWITCHED CAPACITORS (TSC)



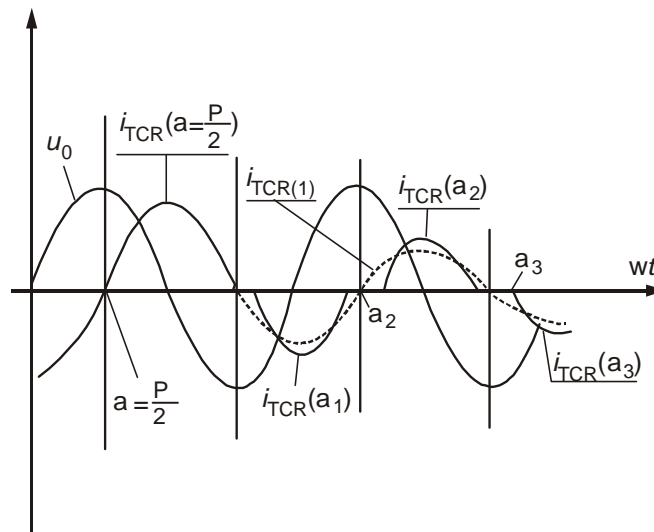
# THYRISTOR SWITCHED CAPACITORS (TSC)





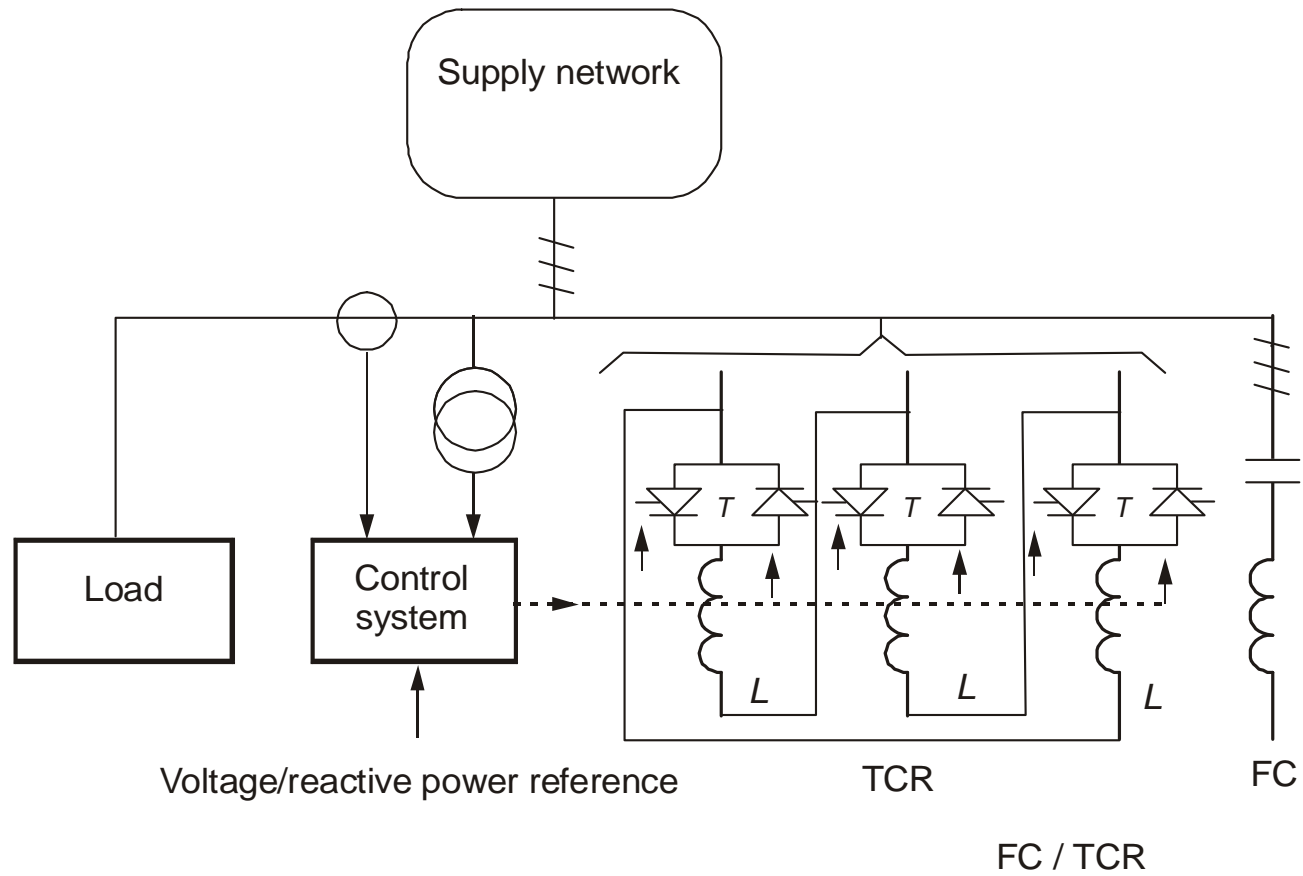
## FC/TCR

(a)

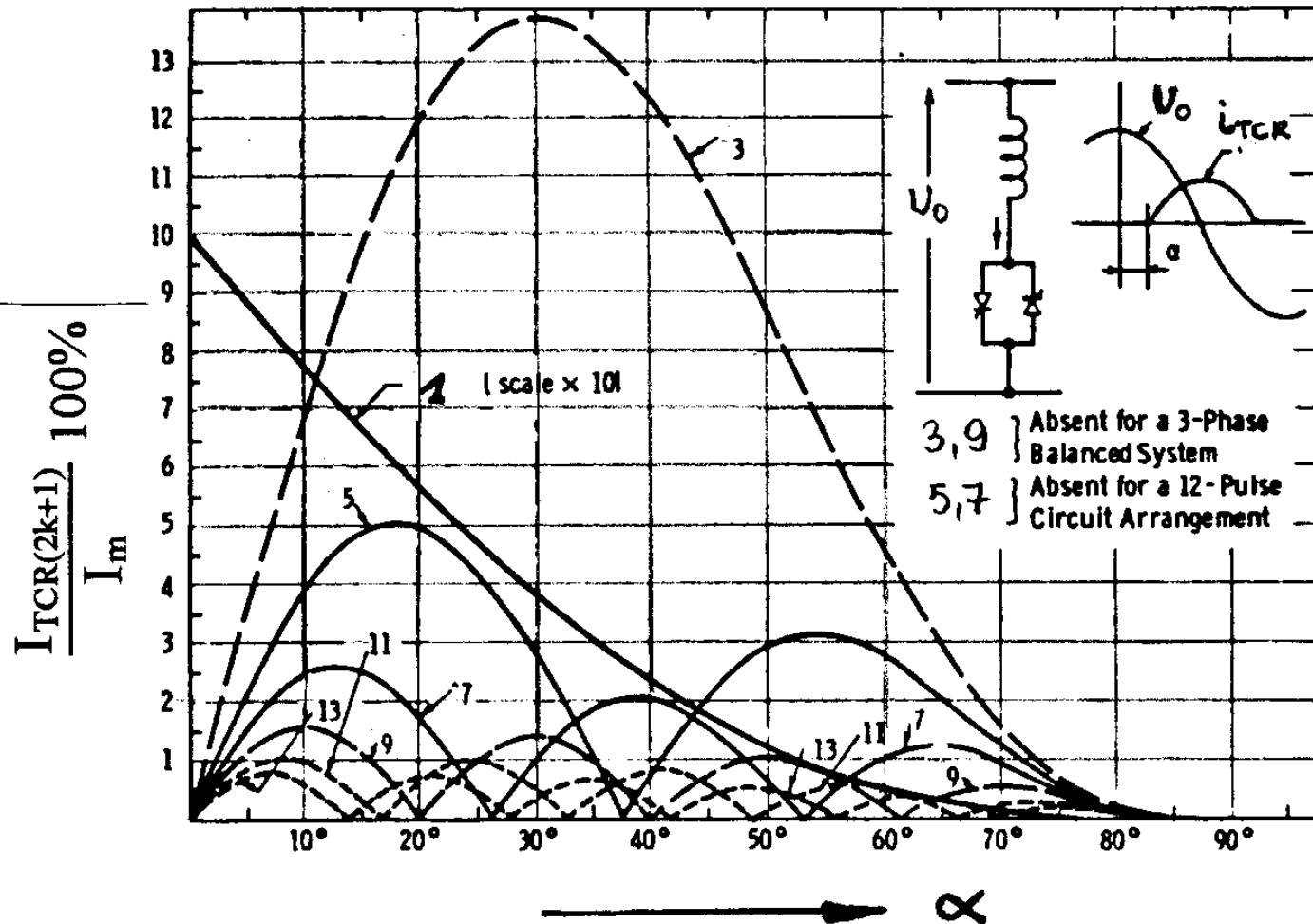


(b)

# FC/TCR COMPENSATOR



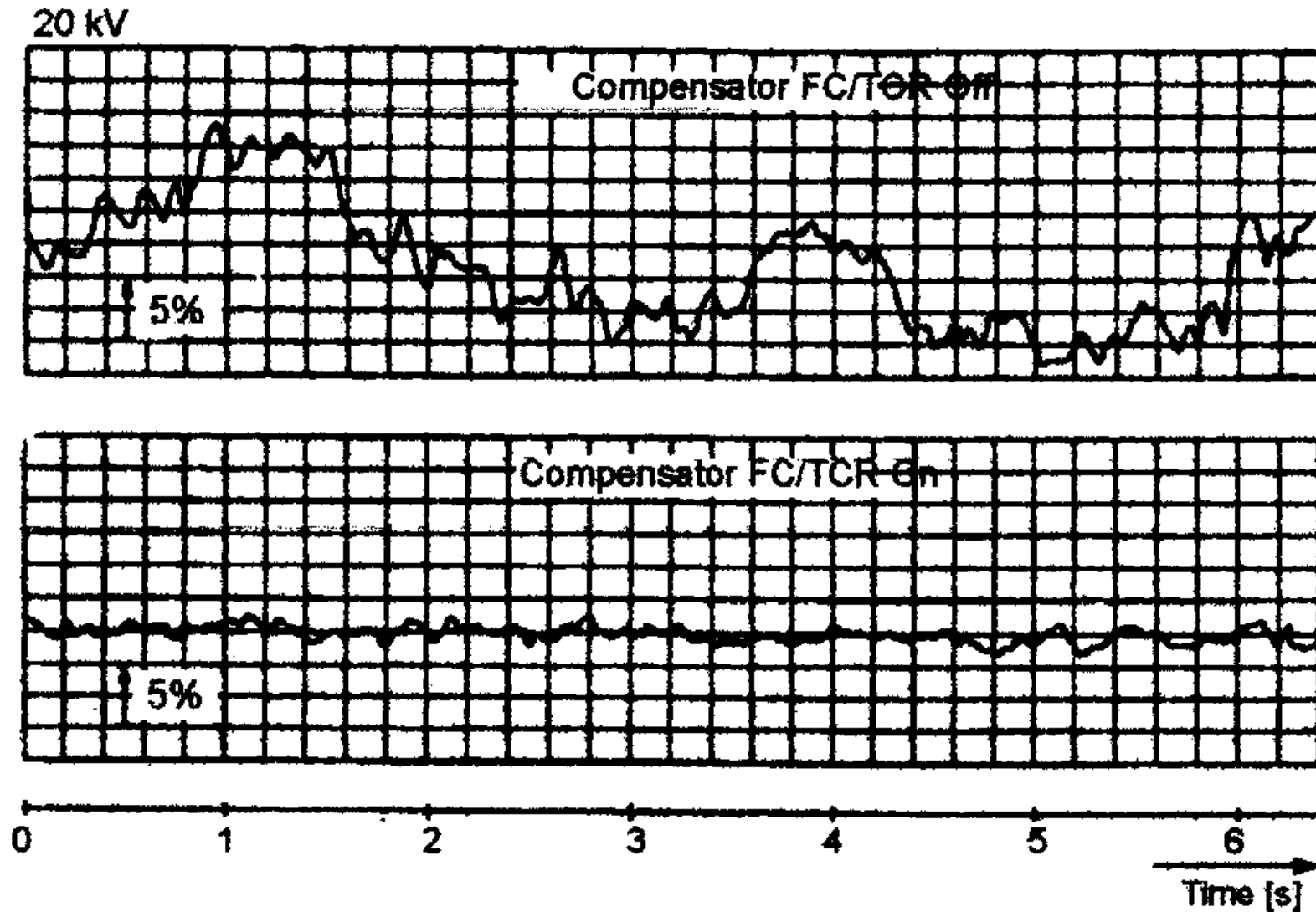
# FC/TCR COMPENSATOR





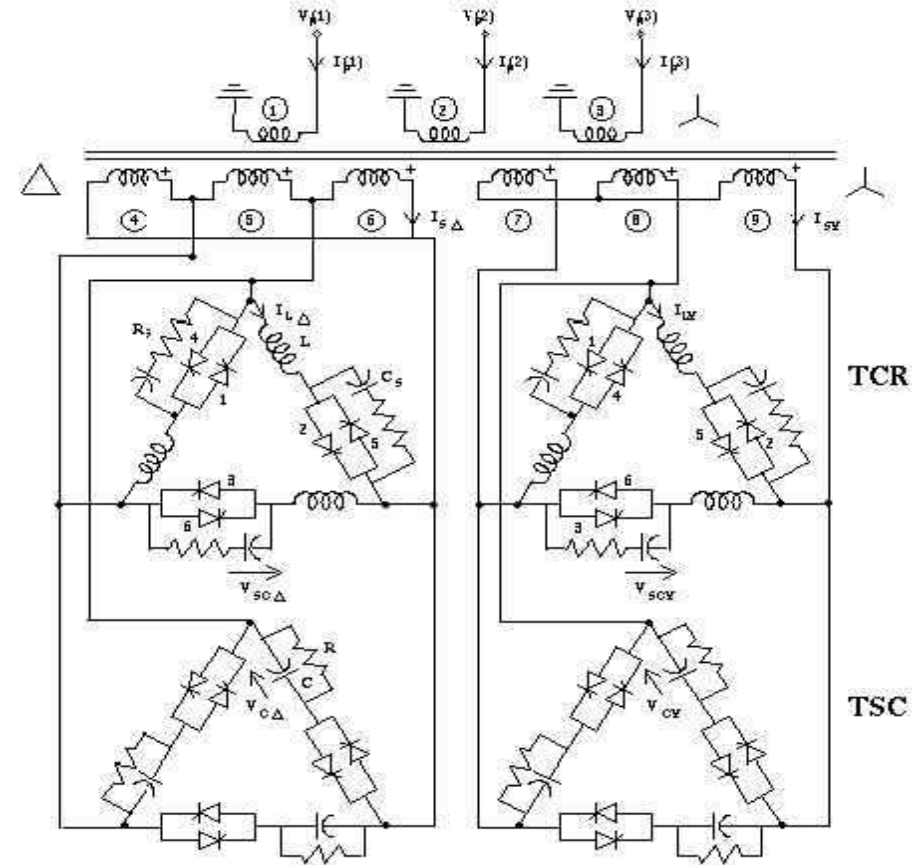
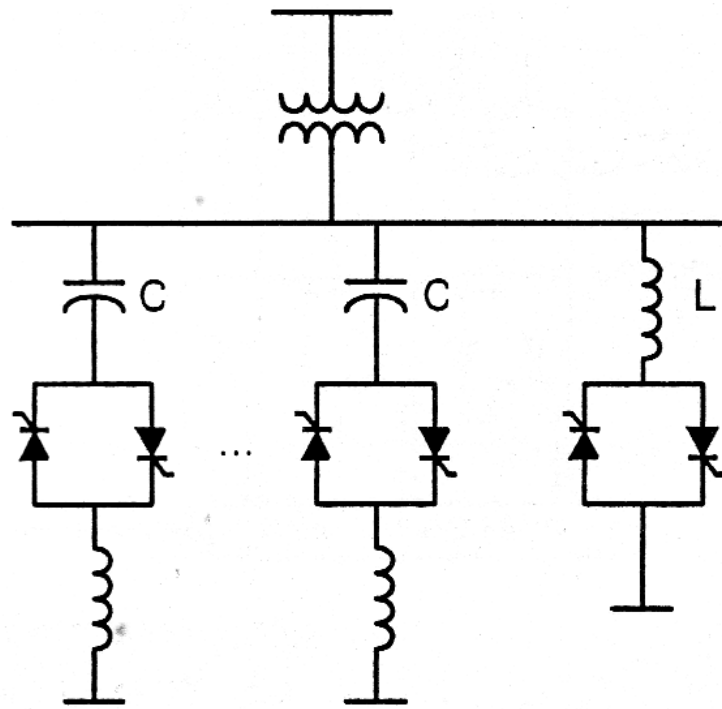
AGH

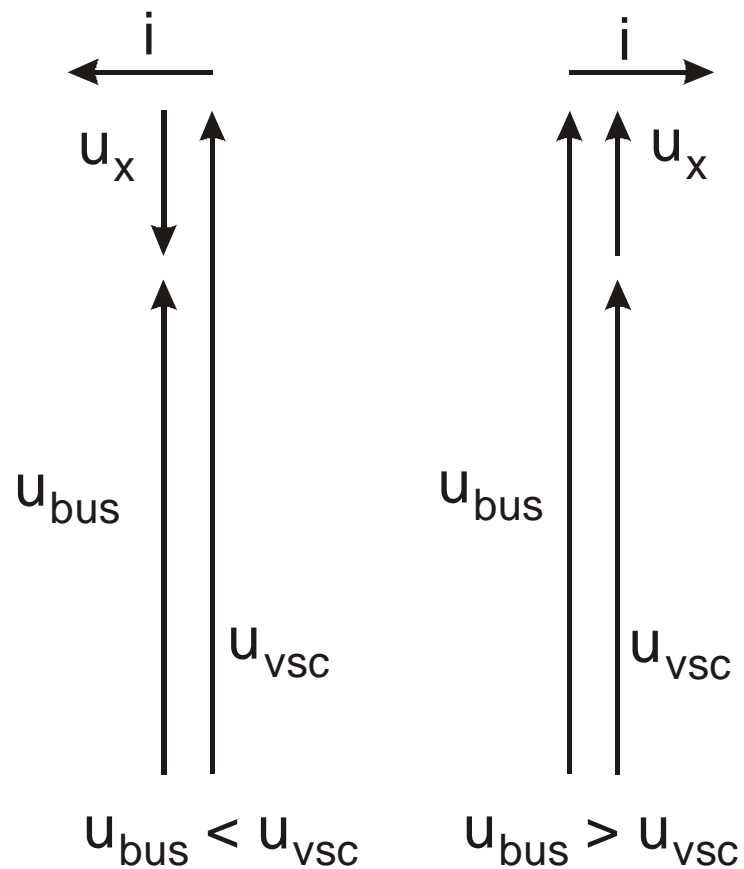
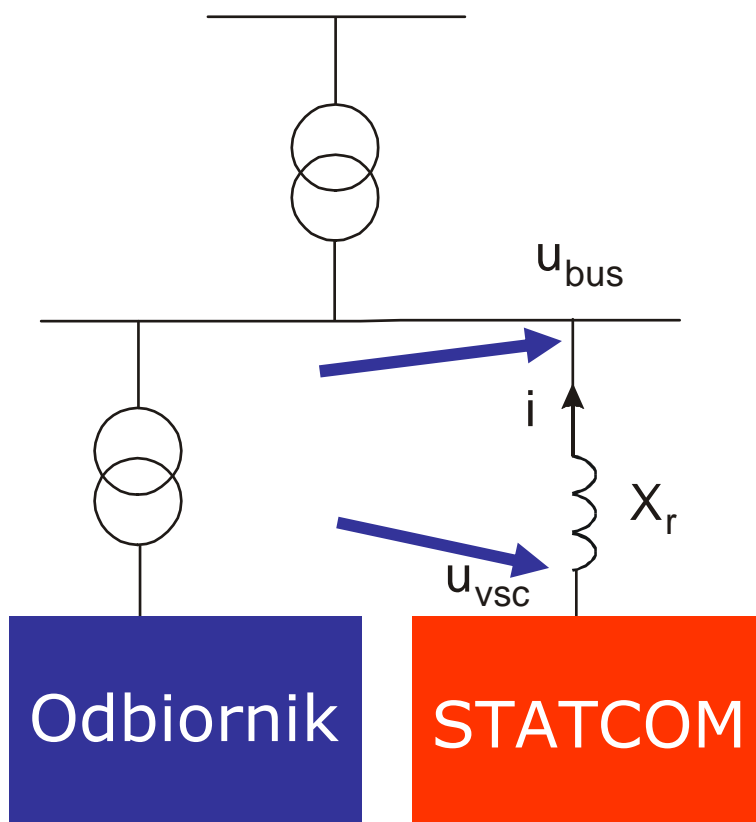
# FC/TCR COMPENSATOR





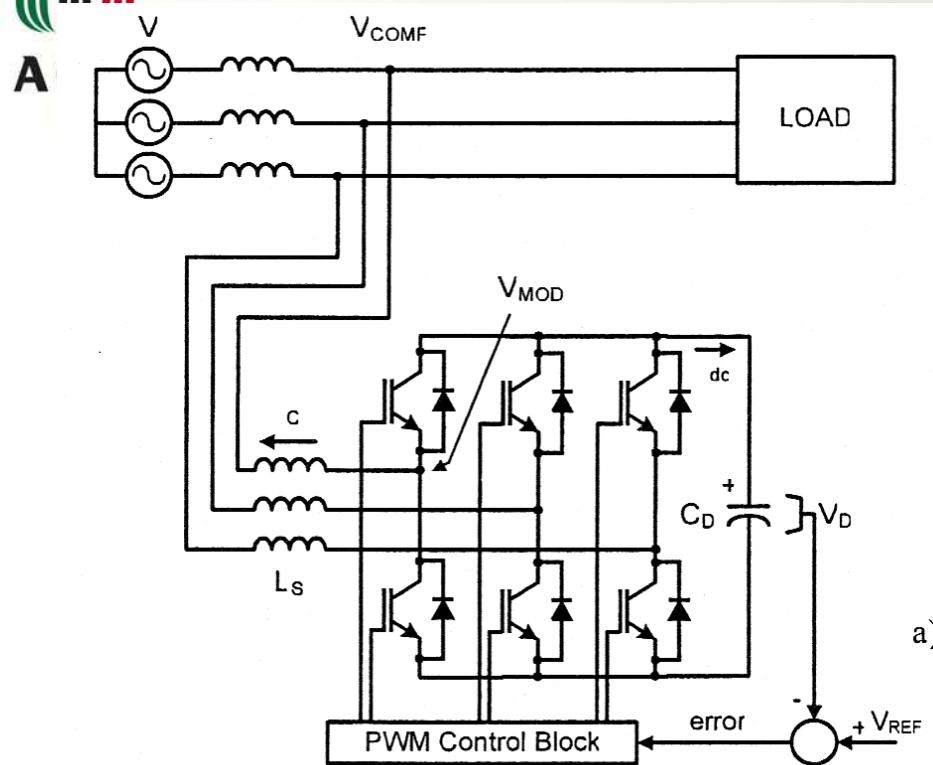
# TSC/TCR



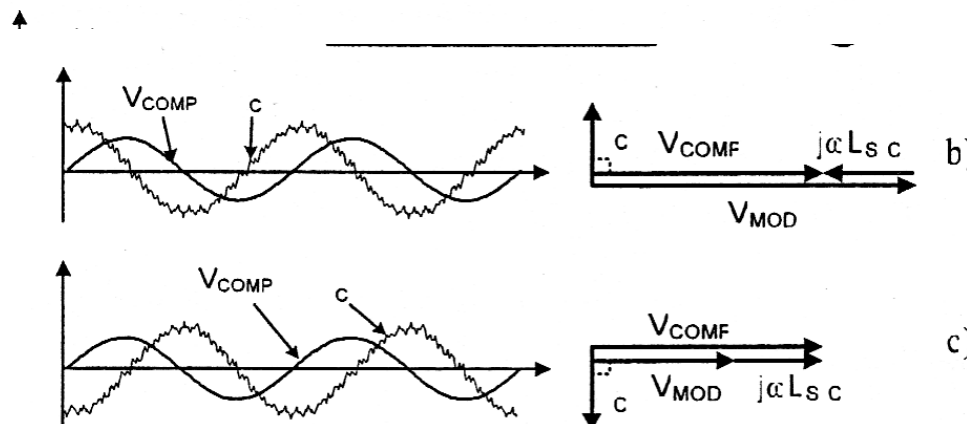




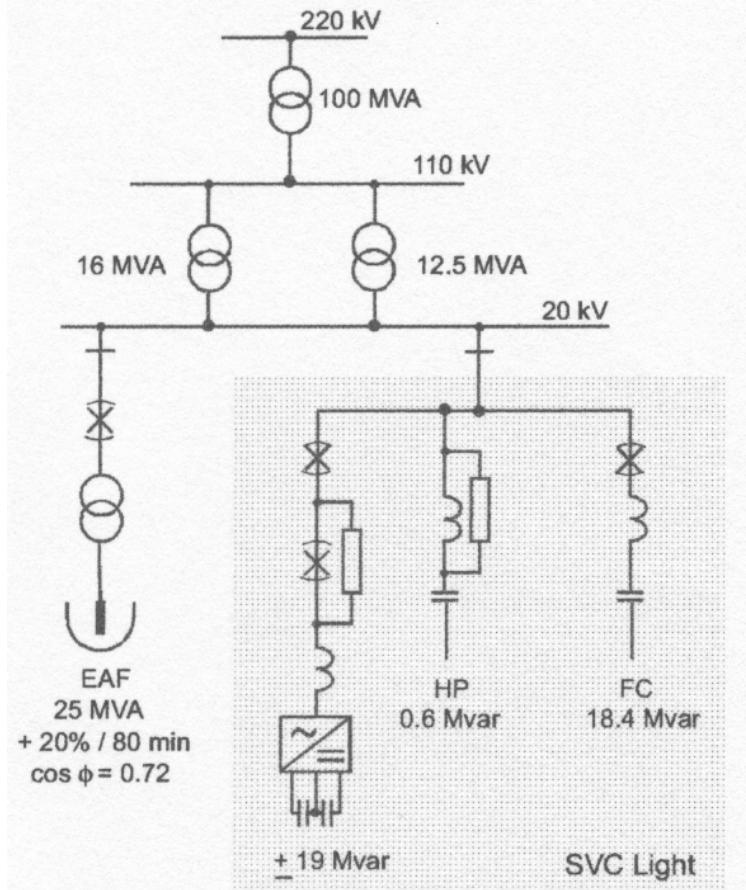
# STATCOM



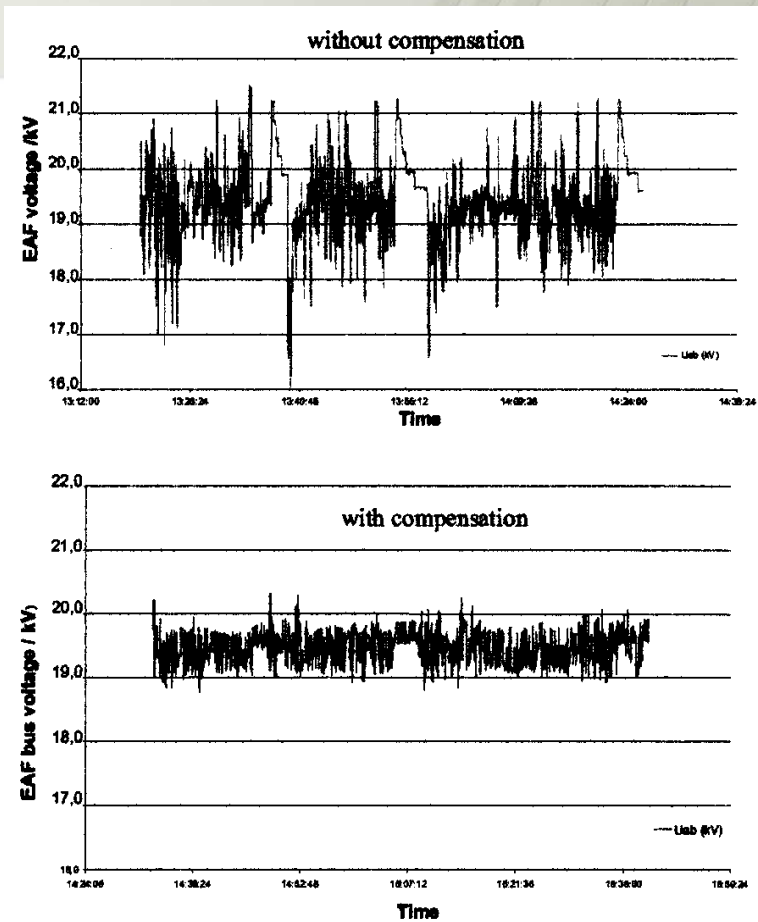
**(a) Schemat ideowy kompensatora STATCOM przyłączonego do sieci zasilającej**



**Wykresy wskazowe ilustrujące pracę kompensatora dla wyróżnionych przypadków, gdy kompensator jest odbiornikiem mocy biernej (b) pojemnościowej i (c) indukcyjnej**

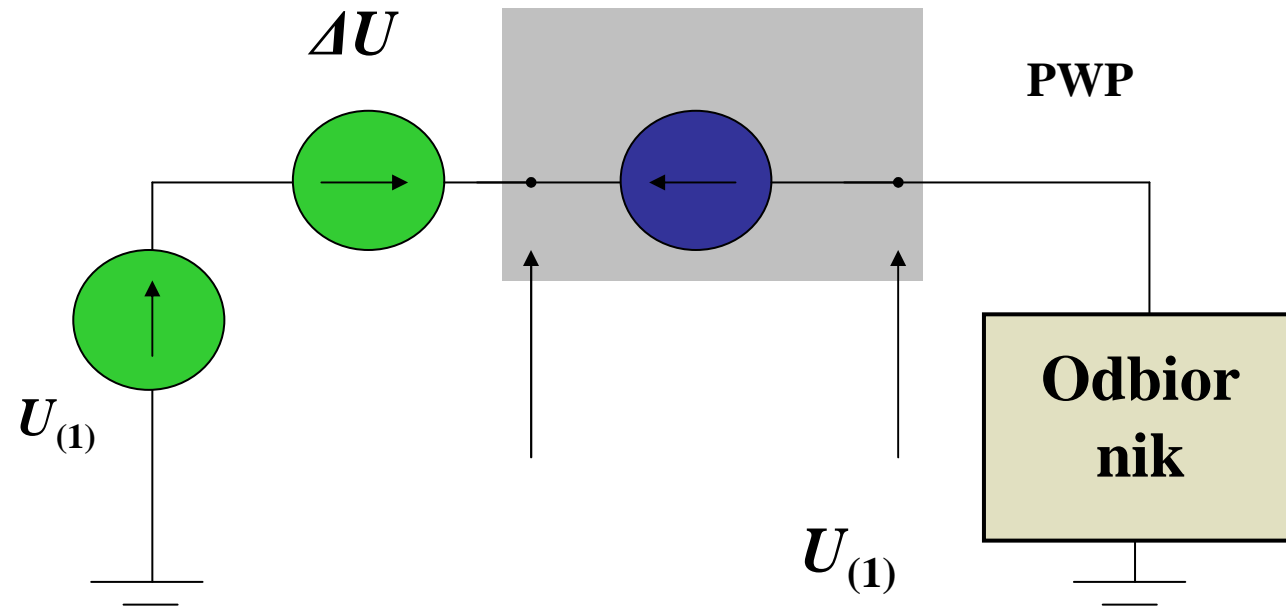


**Kompensator STATCOM do kompensacji pieca łukowego**

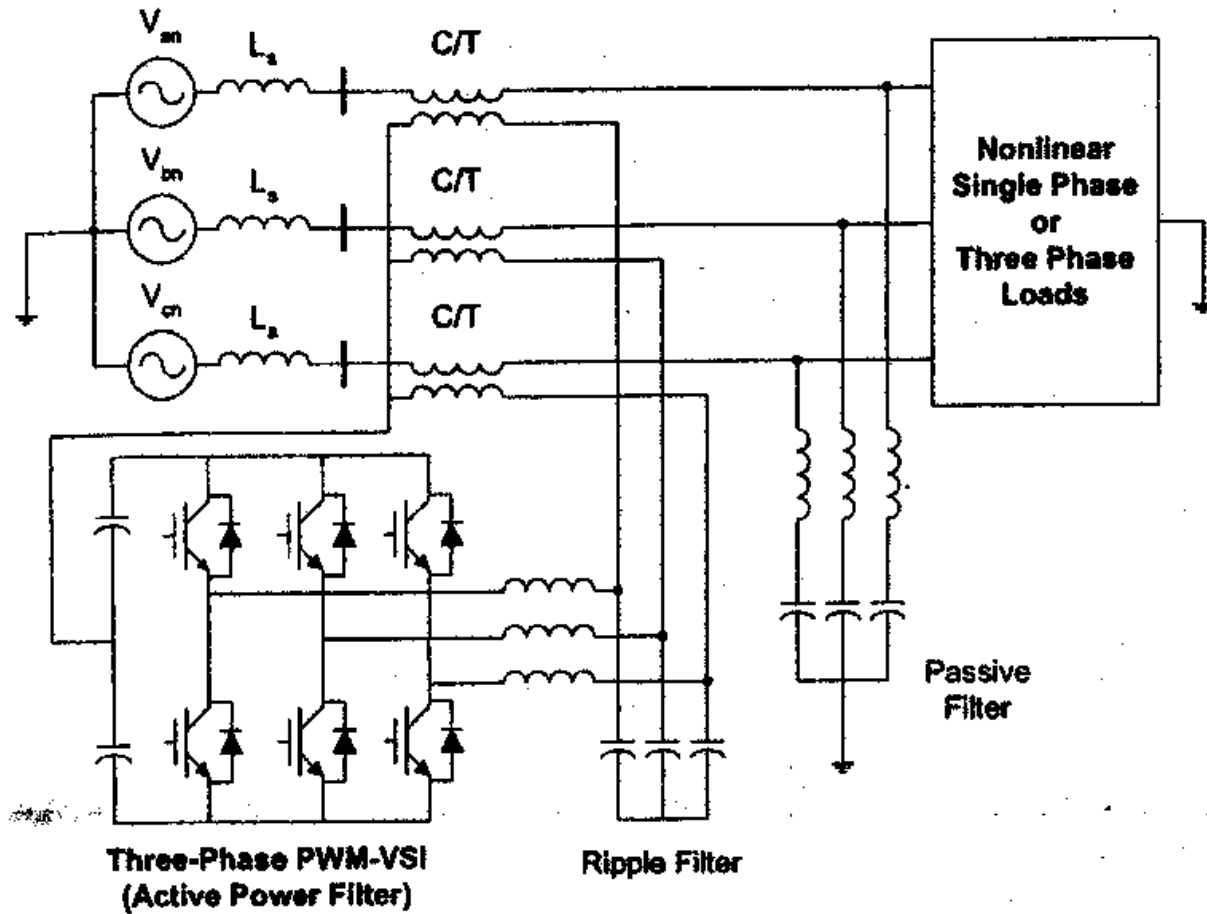


**Napięcie na szynach elektrostalowni przy wyłączonym (górze) i załączonym (dół) kompensatorze**

# STABILIZATOR SZEREGOWY



# STABILIZATOR SZEREGOWY

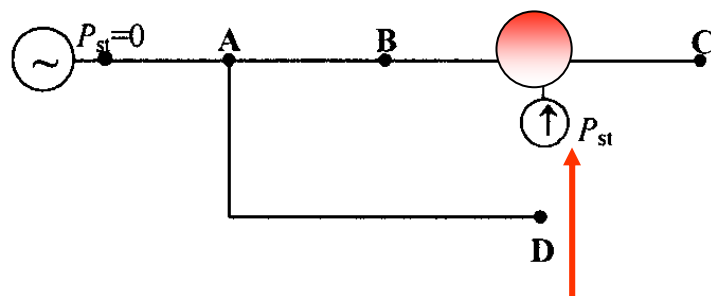




# **PROPAGACJA WAHAŃ NAPIĘCIA**

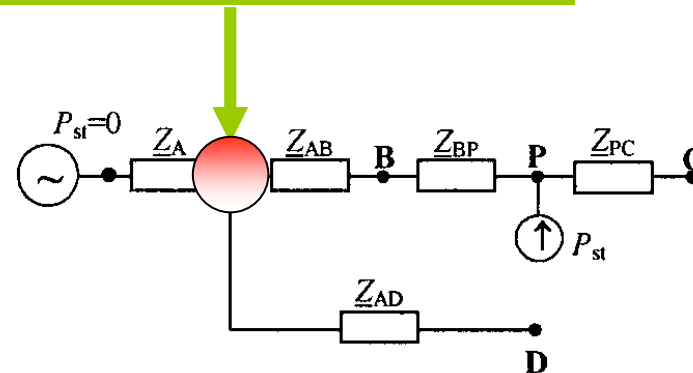
# Propagacja wahań napięcia spowodowanych pracą pojedynczego odbiornika niespokojnego

$$T_{P_{st}AB} = \frac{P_{st}(B)}{P_{st}(A)}$$



**Odbiornik  
niespokojny**

$$P_{st}(A) = P_{st}(P) \frac{|\underline{Z}_A|}{|\underline{Z}_A + \underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BP}|} \approx P_{st}(P) \frac{S_{SC}(P)}{S_{SC}(A)}$$

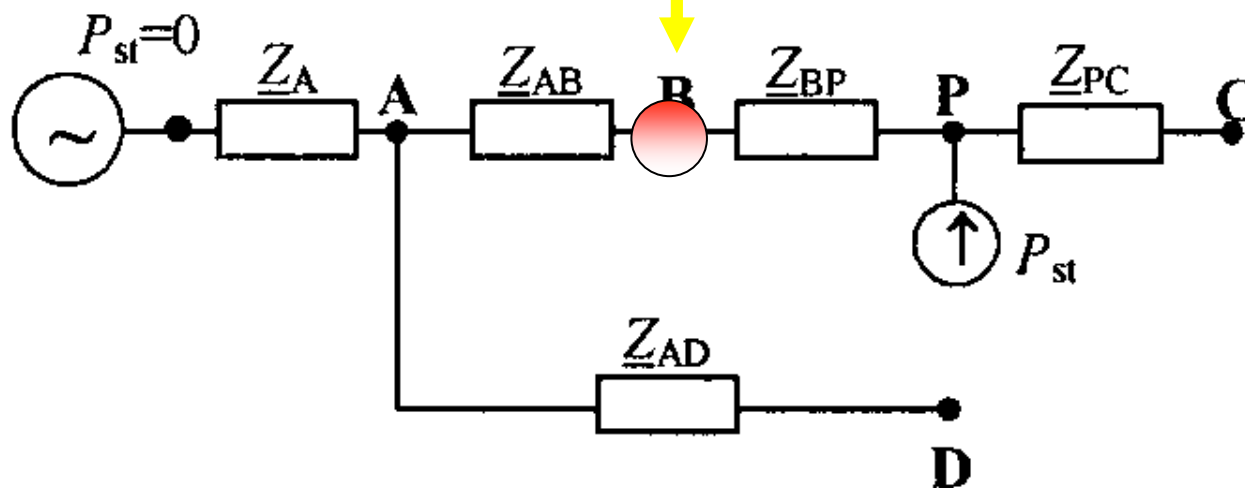


$$T_{P_{st}PA} = \frac{P_{st}(A)}{P_{st}(P)} = \frac{|\underline{Z}_A|}{|\underline{Z}_A + \underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BP}|}$$



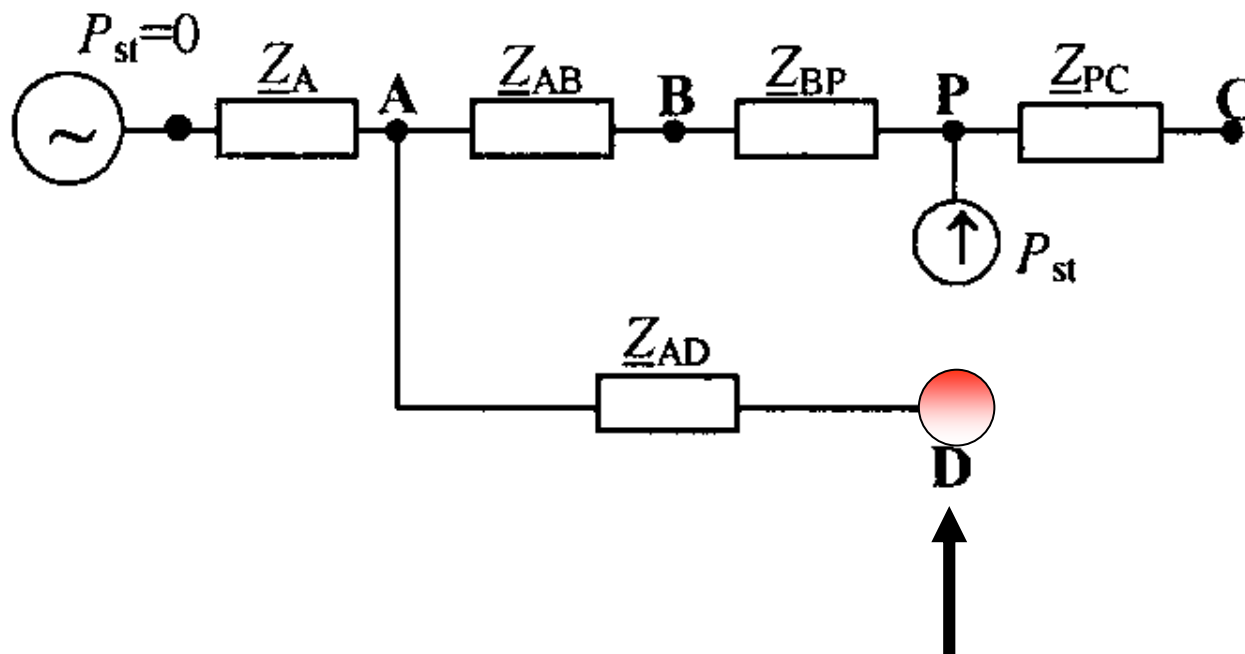
# Propagacja wahań napięcia spowodowanych pracą pojedynczego odbiornika niespokojnego

$$P_{st}(B) = P_{st}(P) \frac{|Z_A + Z_{AB}|}{|Z_A + Z_{AB} + Z_{BP}|}$$



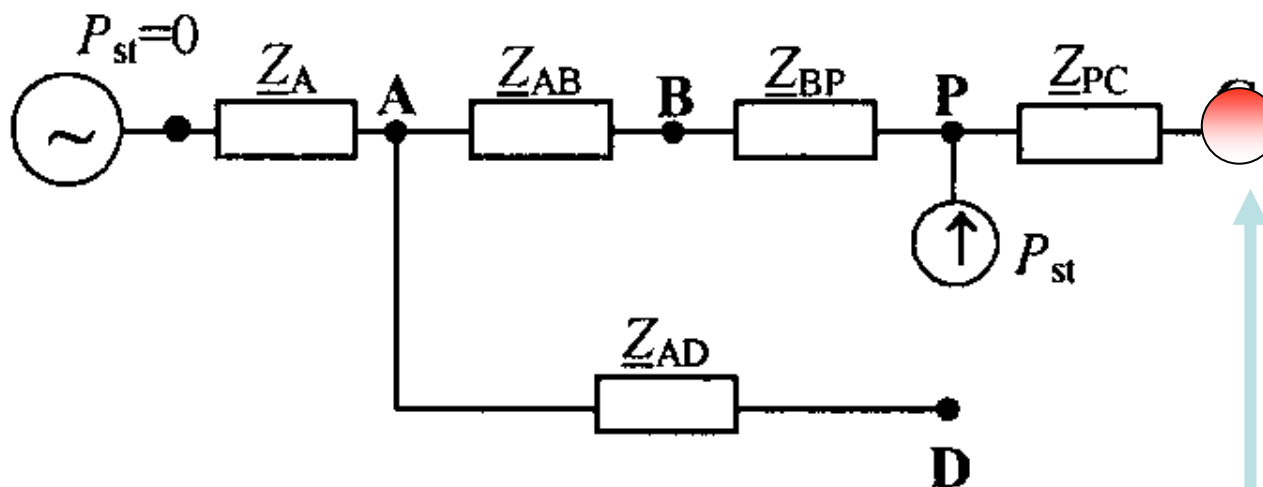
$$T_{P_{st}PB} = \frac{P_{st}(B)}{P_{st}(P)} = \frac{|Z_A + Z_{AB}|}{|Z_A + Z_{AB} + Z_{BP}|}$$

# Propagacja wahań napięcia spowodowanych pracą pojedynczego odbiornika niespokojnego



$$T_{P_{st}PD} = \frac{P_{st}(D)}{P_{st}(P)} = \frac{P_{st}(A)}{P_{st}(P)} \times \frac{P_{st}(D)}{P_{st}(A)} = T_{P_{st}PA} \times T_{P_{st}DA} = T_{P_{st}PA}$$

# Propagacja wahań napięcia spowodowanych pracą pojedynczego odbiornika niespokojnego



$$T_{P_{st}PC} = \frac{P_{st}(C)}{P_{st}(P)} = \frac{P_{st}(P)}{P_{st}(P)} = 1$$



## **Propagacja wahań napięcia spowodowanych pracą pojedynczego odbiornika niespokojnego**

**z sieci NN do sieci WN**

**współczynnik tłumienia  $\sim 0,8$**

**z sieci WN do sieci SN**

**współczynnik tłumienia  $\sim 0,9$**

**z sieci SN do sieci nN**

**współczynnik tłumienia  $\sim 1$**



# **WAHANIA NAPIĘCIA ZAGADNIENIA WYBRANE**

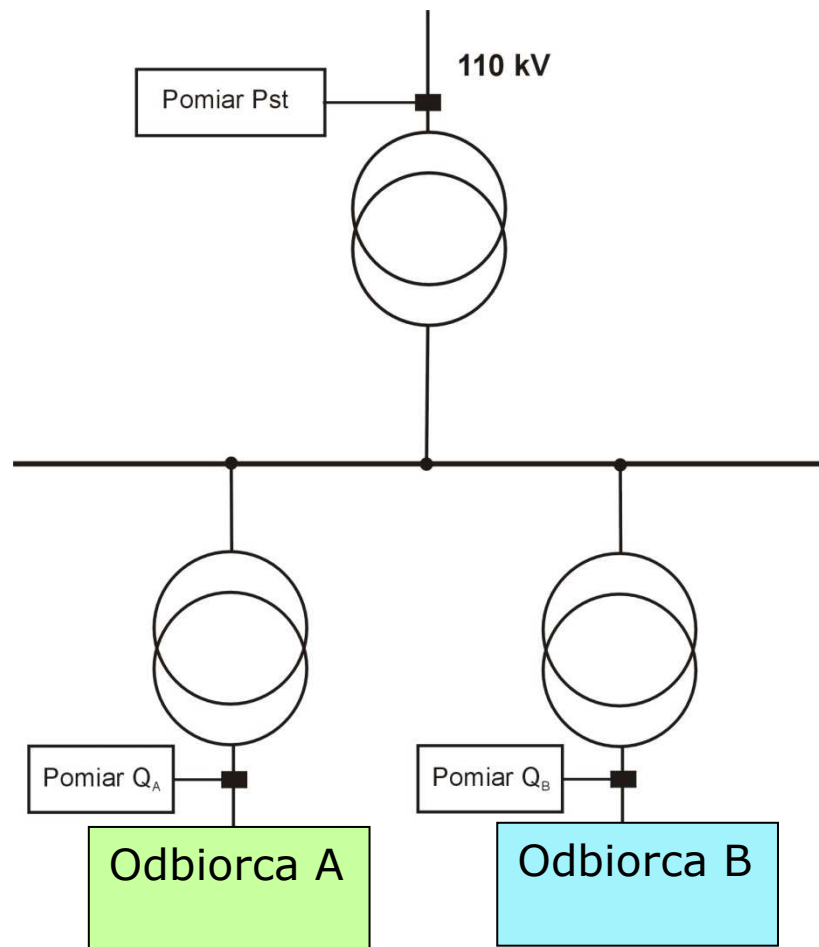
# Sumowanie wahań napięcia pochodzących z różnych źródeł

$$P_{st} = \sqrt[m]{\sum_j P_{st_j}^m}$$

$$P_{lt} = \sqrt[m]{\sum_j P_{lt_j}^m}$$

$m = 4$	stosowany tylko do sumowania wahań napięcia pochodzących od pieców łukowych, które pracują w sposób wykluczający równoczesność roztopiania
$m = 3$	<b>stosowany powszechnie dla większości rodzajów zmian napięcia w przypadku, gdy prawdopodobieństwo jednoczesnej pracy jest ograniczone</b>
$m = 3,2$	stosowany dla prostoliniowej części charakterystyki $P_{st} = 1$
$m = 2$	stosowany w przypadku, gdy równoczesność pracy różnych źródeł jest możliwa np. przy równoczesnej pracy kilku pieców lub ciągłej pracy kilku elektrowni wiatrowych przyłączonych w tym samym PWP
$m = 1$	stosowany przy sumowaniu zgodnych zmian napięcia (duże prawdopodobieństwo równoczesnej pracy odbiorników niespokojnych)

# PRZYKŁAD 1





## PRZYKŁAD 1

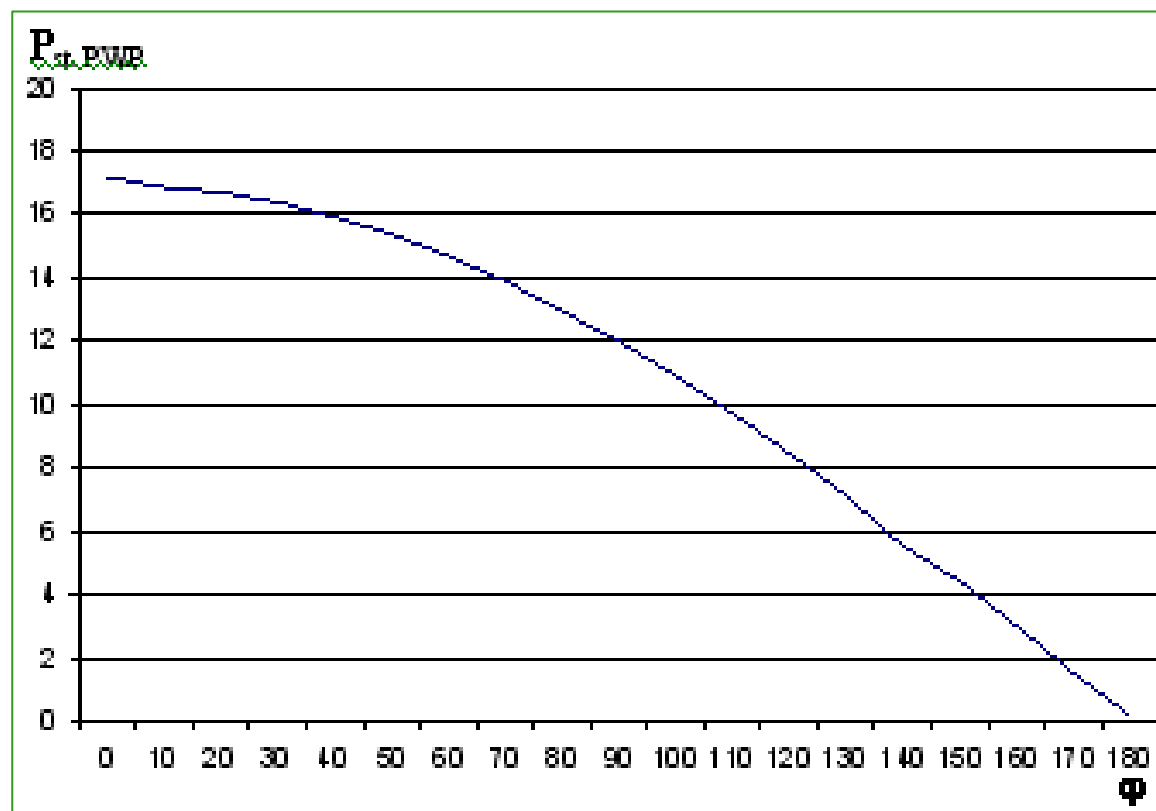
Wykonano pomiary wskaźnika  $P_{st}$  dla różnych przesunięć fazowych pomiędzy wahaniami napięcia wywołanymi przez dwa źródła wahań napięcia.

Źródła wahań zostały zamodelowane jako dwie modulacje nałożone na 50-hercowy przebieg napięcia w PWP (15 kV, 50 Hz). Obie modulacje miały charakter okresowy o 3 % amplitudzie i częstotliwości 8 Hz.

**W przypadku pracy indywidualnej źródeł  
średnia wartość wskaźnika migotania  $P_{st}$   
wyniosła 8,48.**

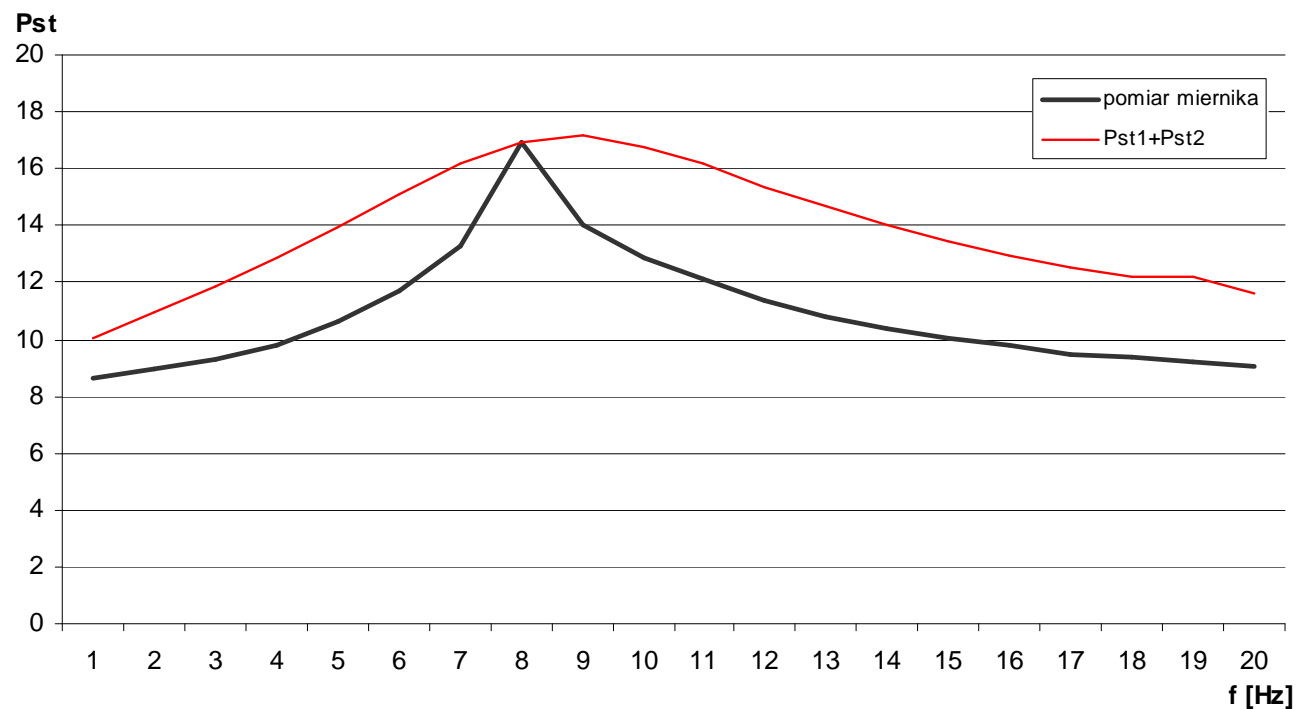


## PRZYKŁAD 1



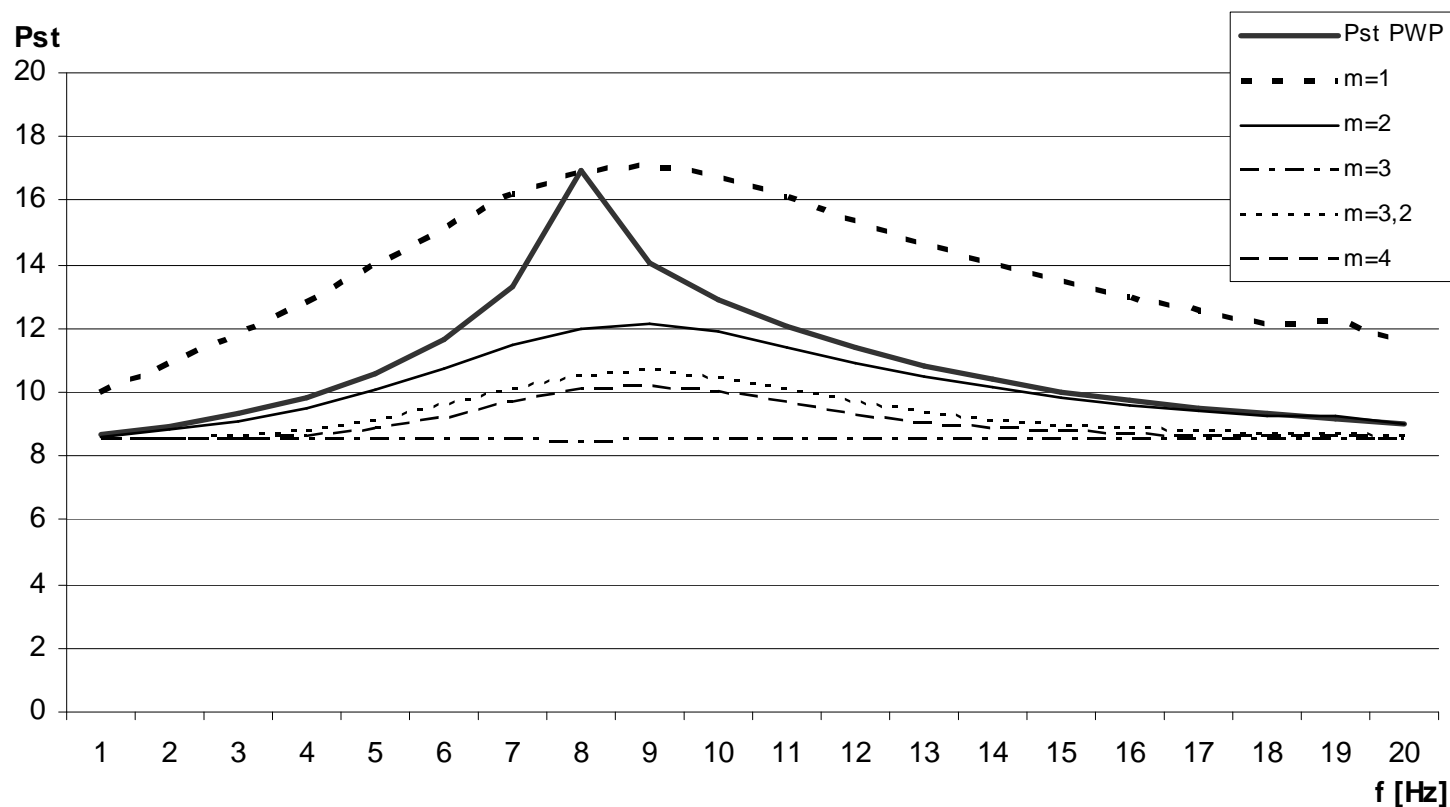
**Wpływ kąta przesunięcia fazowego  $\varphi$  na wartość wskaźnika  $P_{st}$  w PWP**

**Wyniki symulacji dla zmiennej częstotliwości modulacji jednego ze źródeł ( $f_{\text{mod}} = 1 - 20$  Hz) i stałej (8 Hz) modulacji drugiego źródła.**



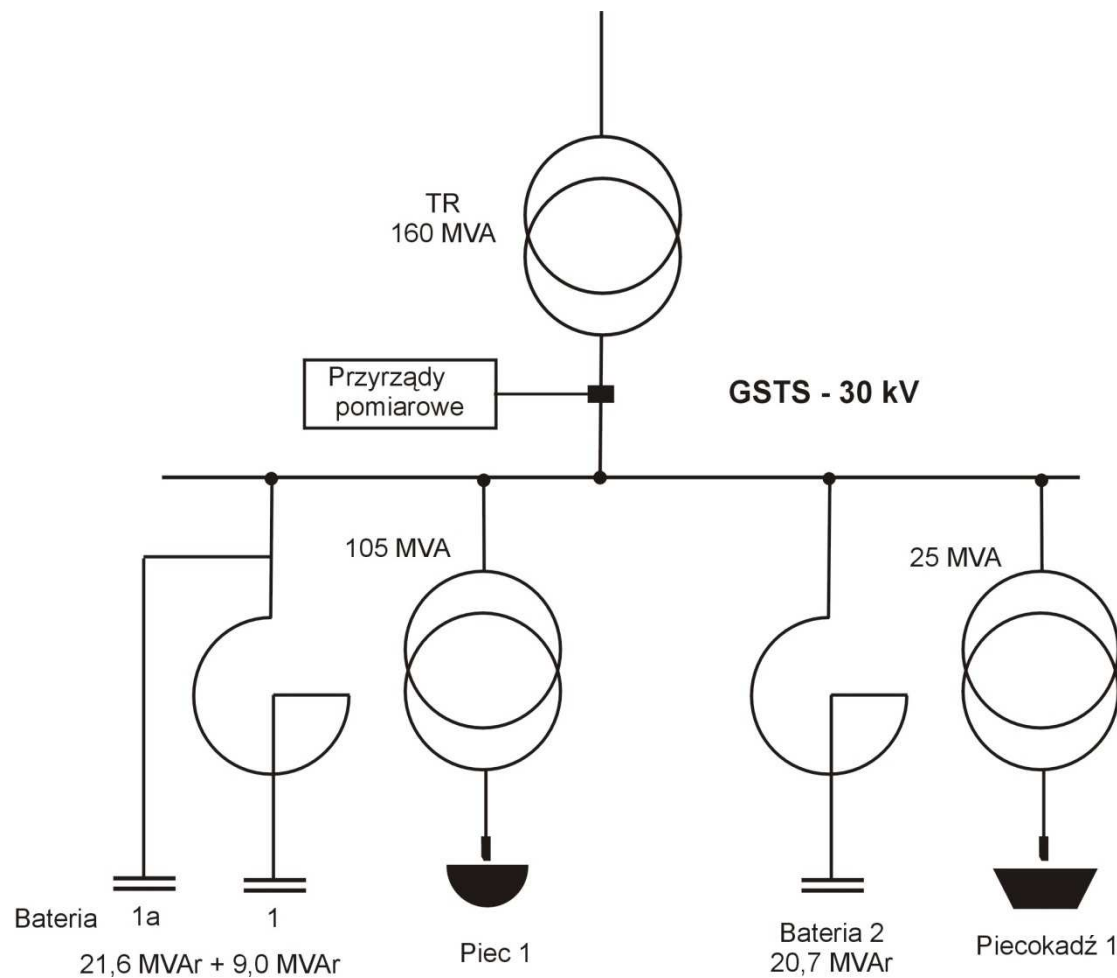
**Zależność  
zmierzonej i  
obliczonej  
wartości  $P_{st}$  od  
częstotliwości  
funkcji  
modulującej**

$$P_{st} = \sqrt[m]{\sum_i P_{sti}^m}$$



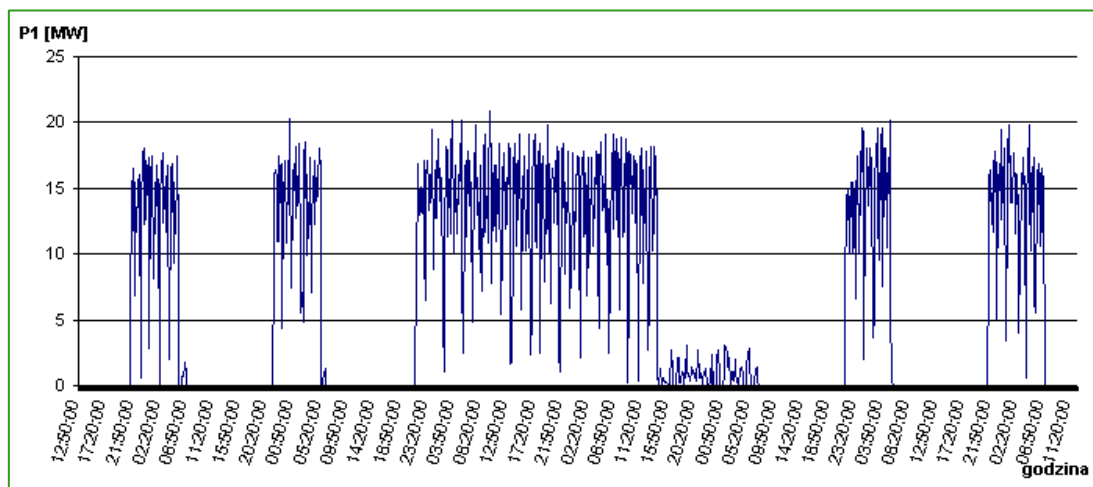
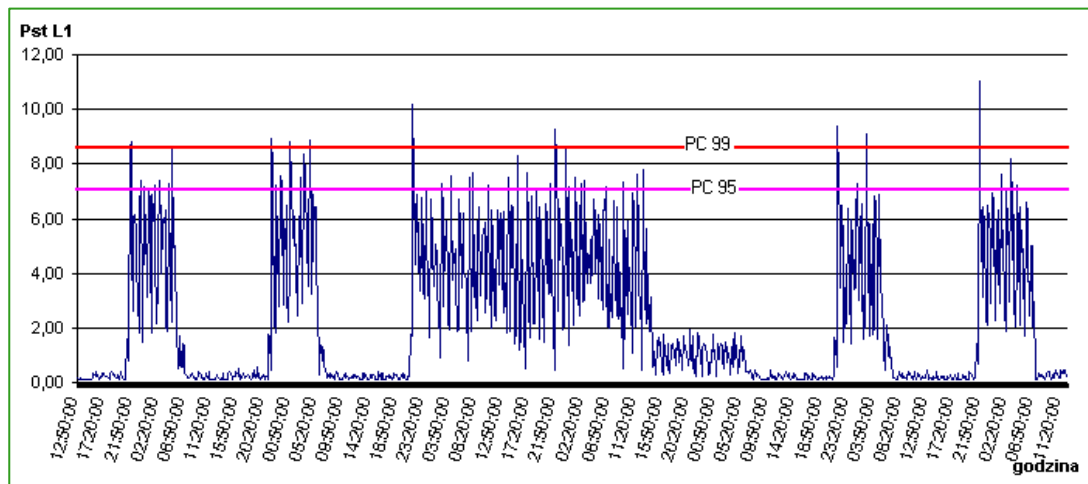
**Wartości  $P_{stPWP}$  zmierzone miernikiem migotania oraz obliczone w oparciu o metodę superpozycji**

# POMIARY WAHAŃ NAPIĘCIA PODCZAS PRACY ODBIORNIKA NIESPOKOJNEGO I PO JEGO WYŁĄCZENIU



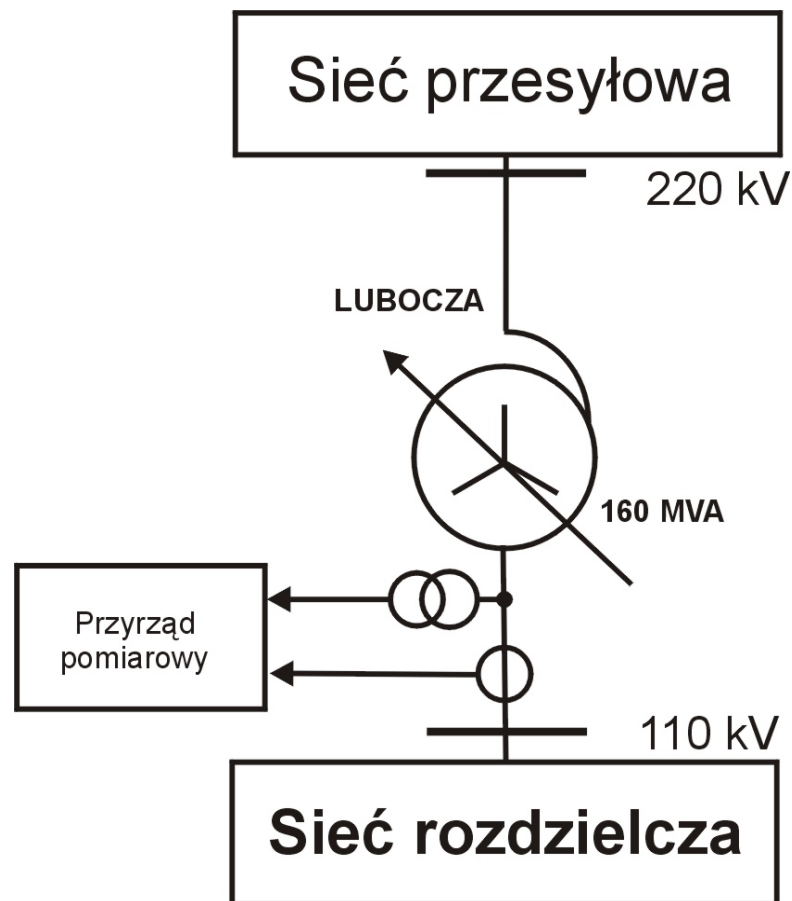
**Schemat  
rozdzielni w  
hucie**

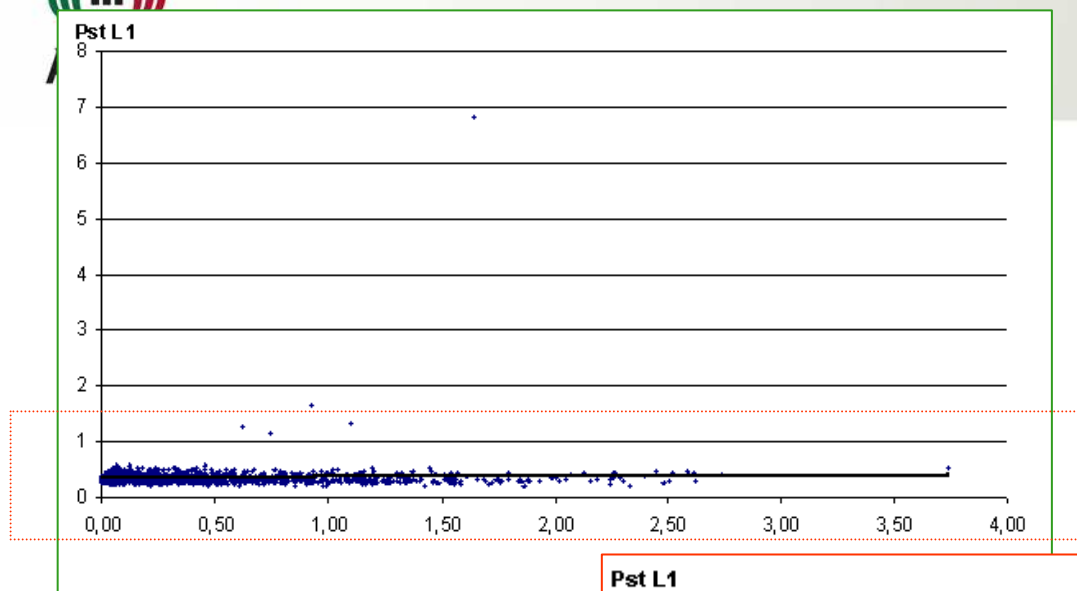
# POMIARY WAHAŃ NAPIĘCIA PODCZAS PRACY ODBIORNIKA NIESPOKOJNEGO I PO JEGO WYŁĄCZENIU



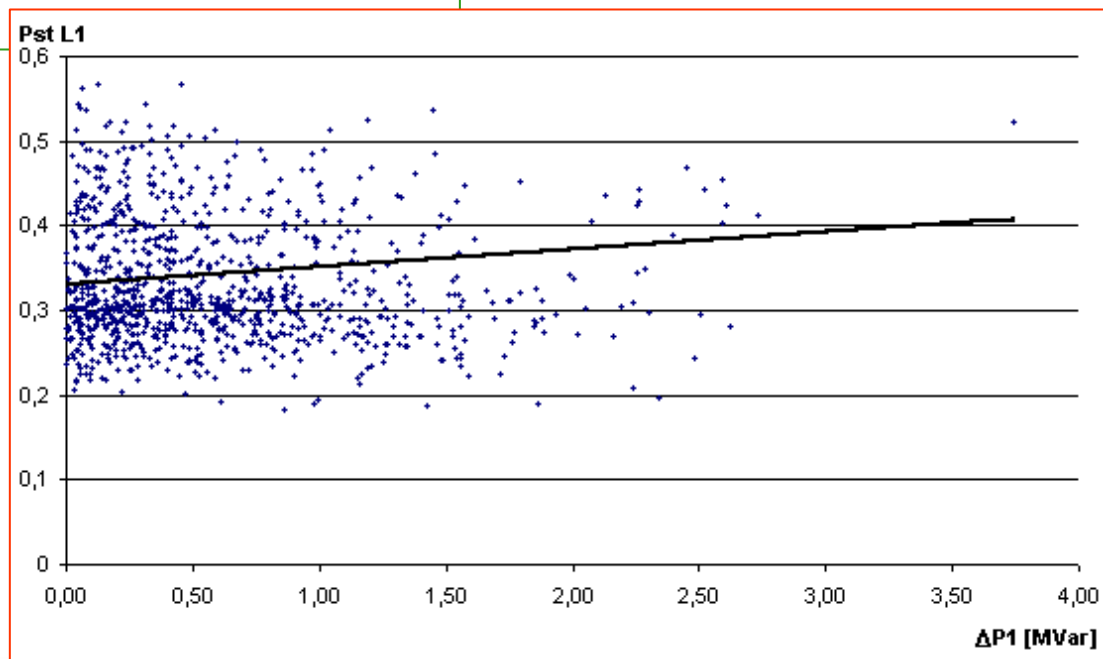
Pomiary wahań napięcia  
podczas pracy  
odbiornika  
niespokojnego i po jego  
wyłączeniu

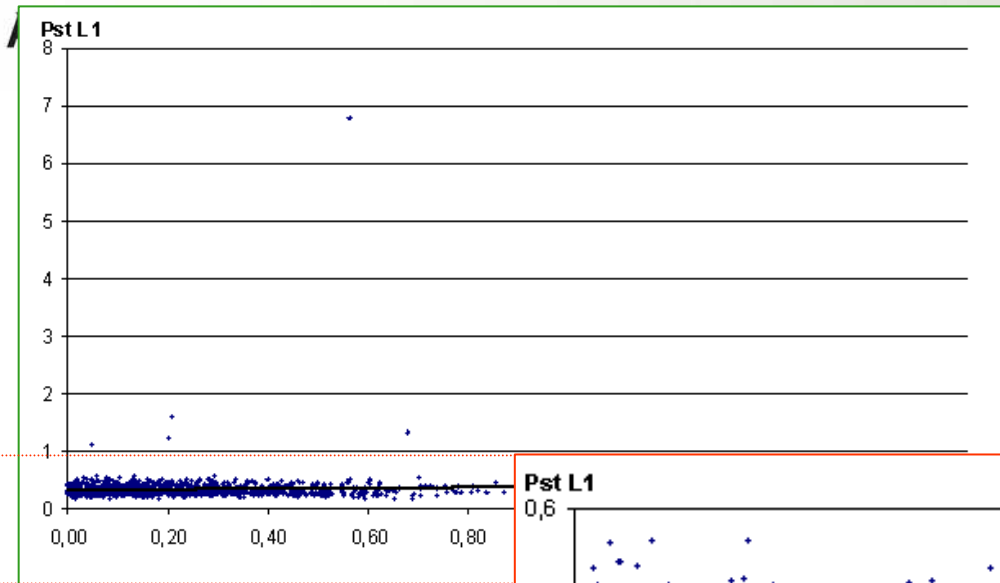
# METODA KORELACYJNA



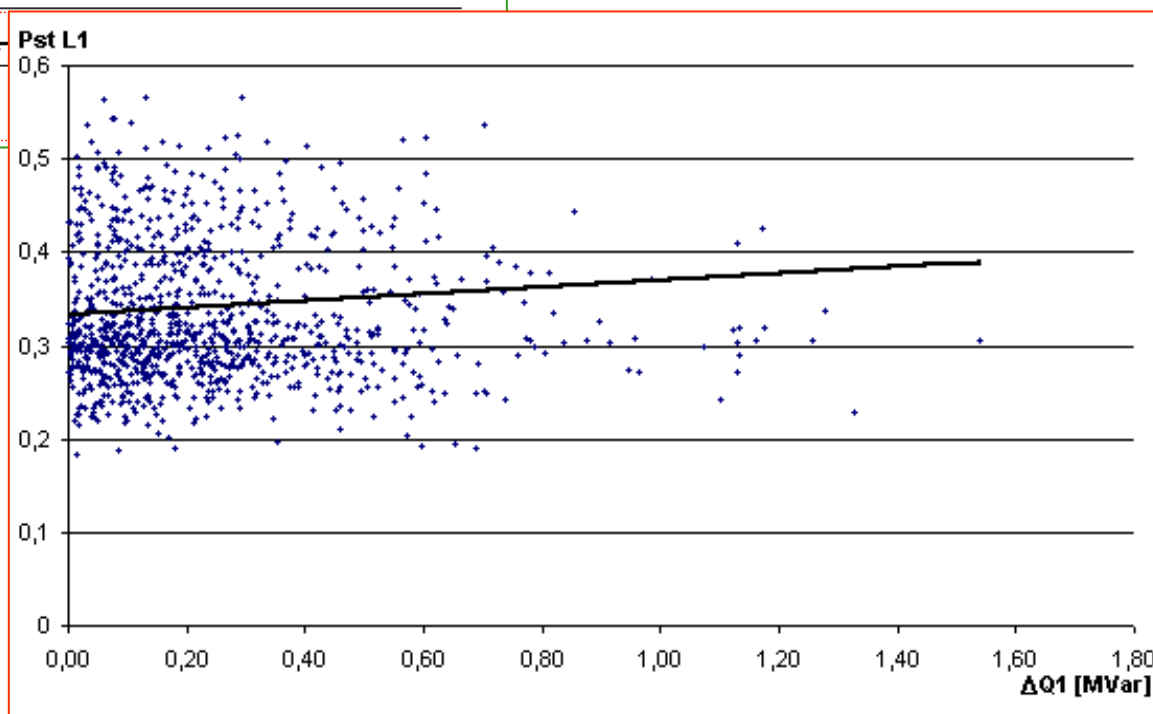


## Korelacja zmian mocy czynnej i wskaźnika migotania w fazie L1 - GPZ Lubocza



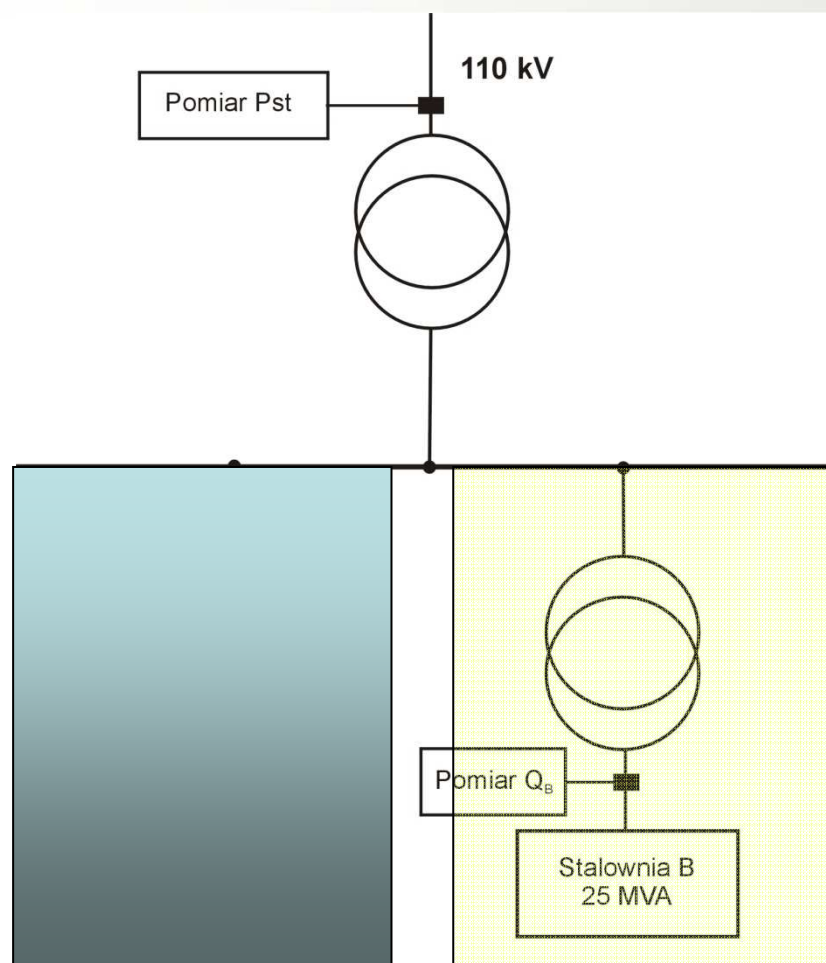


## Korelacja zmian mocy biernej i wskaźnika migotania w fazie L1 - GPZ Lubocza

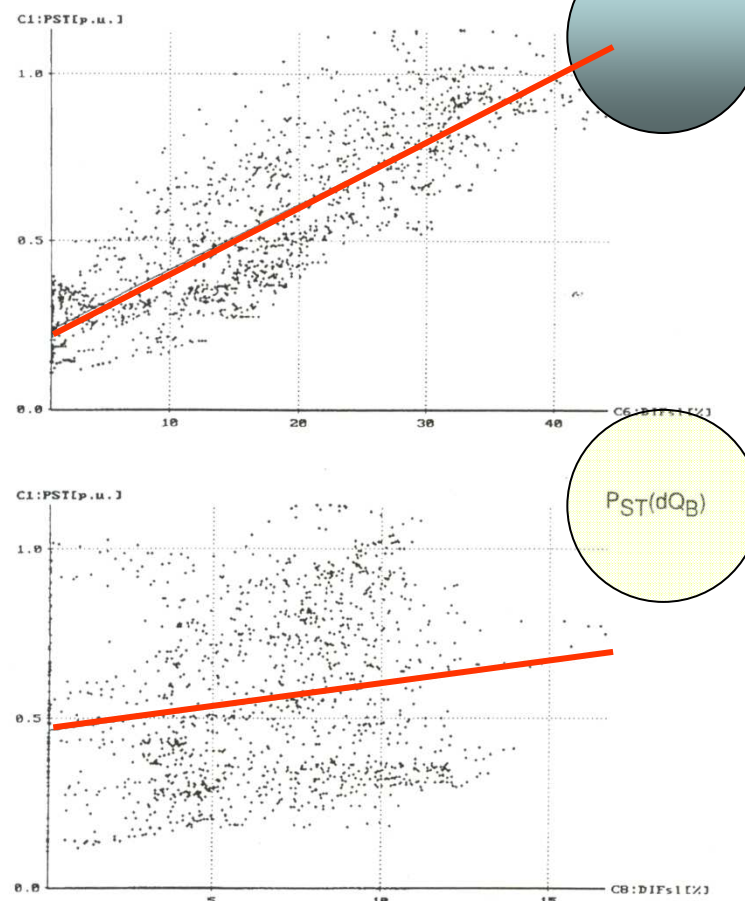




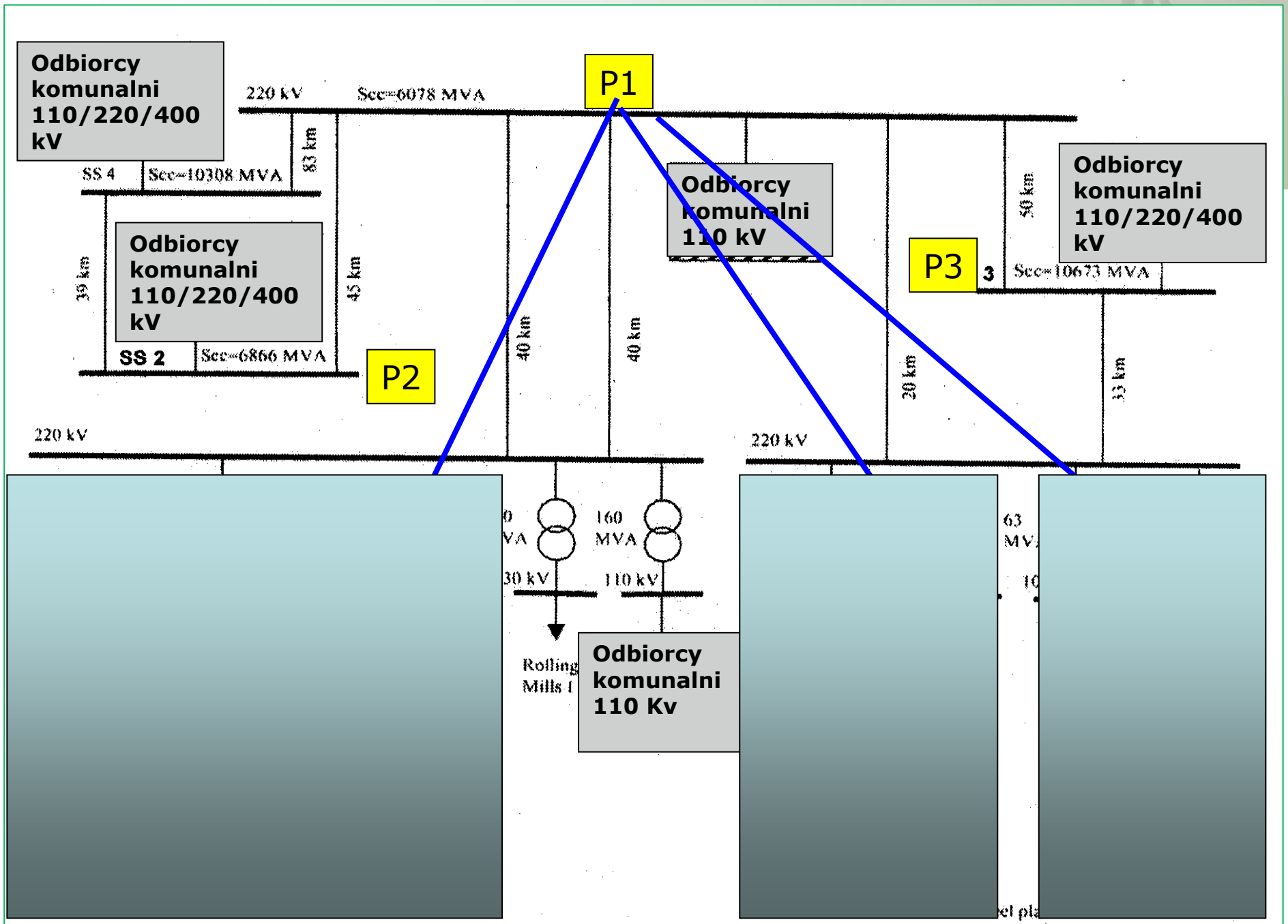
# METODA KORELACYJNA



**Przykład dwóch stalowni przyłączonych do PWP**

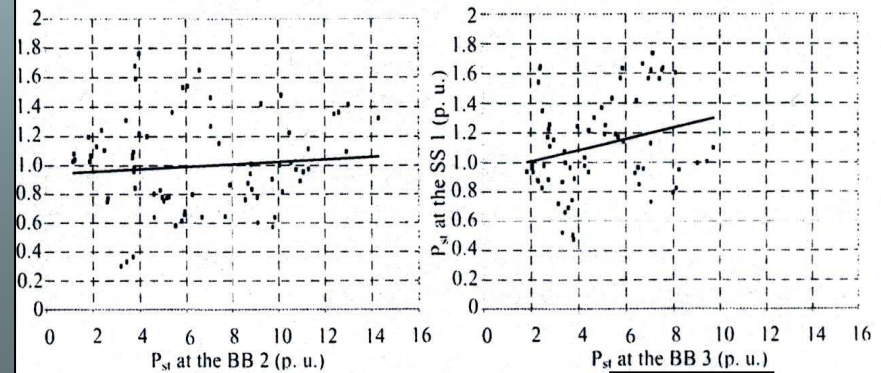
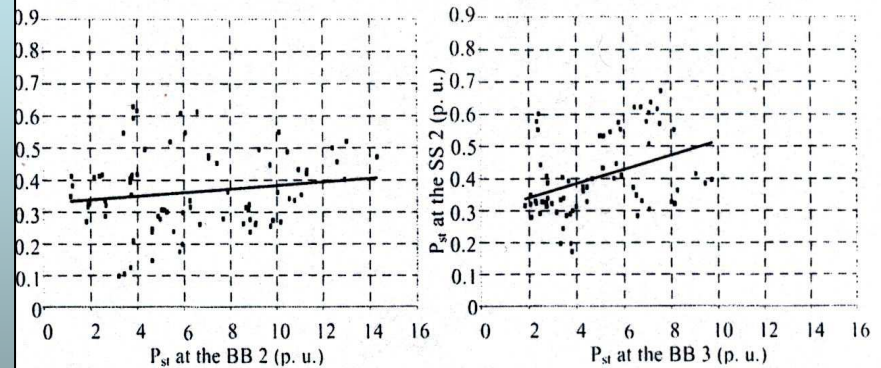
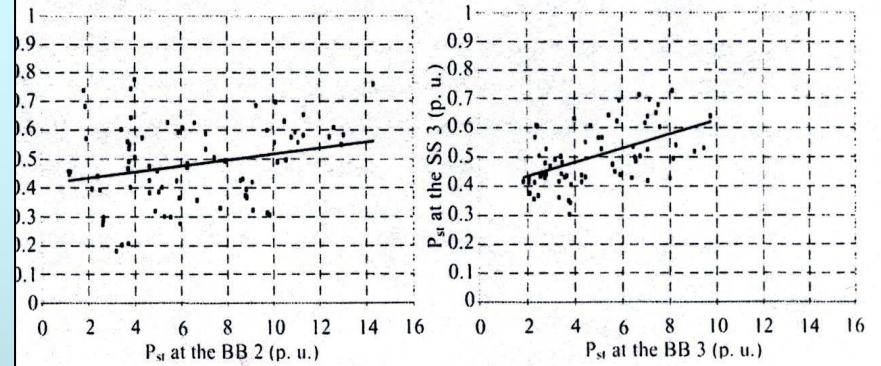


**Korelacja zmian mocy odbiorników i wahań napięcia**





Stade D.,  
Schau H.,  
Novitsky A.:  
Flicker analysis  
in the H.V.  
transmission  
system, 0-  
7803-7671-  
4/02 IEEE

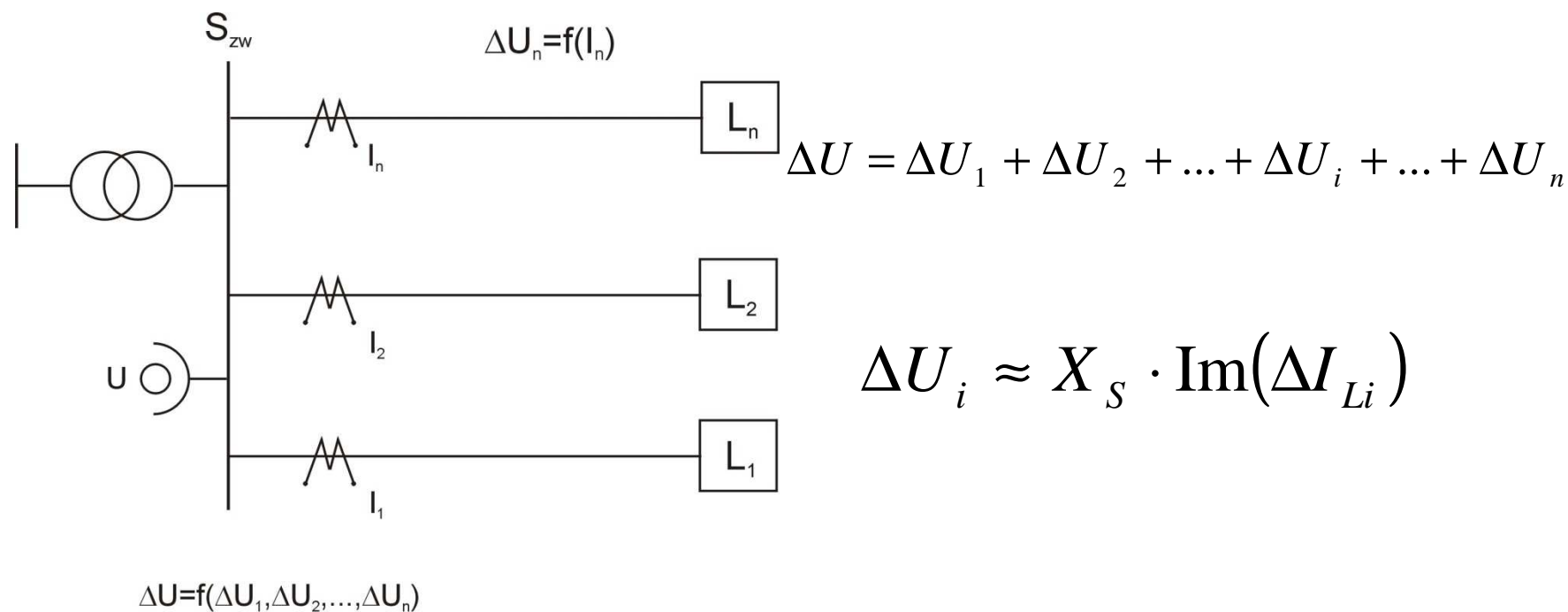


PST,H2

PST,H3

### METODA 3

## Wpływ wahań w poszczególnych gałęziach sieci na całkowite zaburzenie w PWP





## **METODA 4**

### **Wykorzystanie pomiaru migotania prądu**

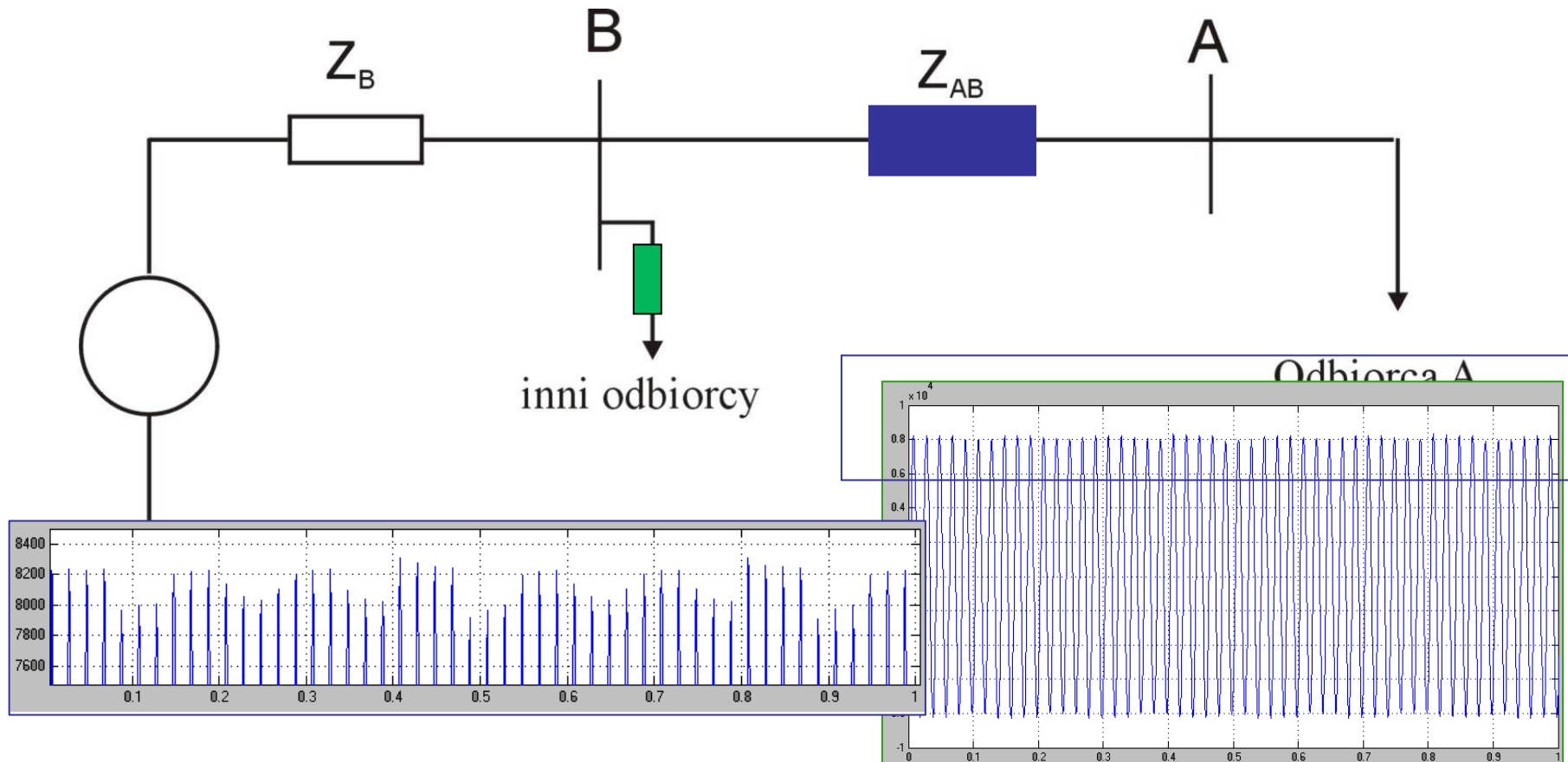
#### **1133A Power Sentinel™ firmy Arbiter Systems**

**Jeżeli migotanie prądu jest mniejsze lub równe migotaniu napięcia, to źródło wahań jest po stronie zasilania.**

**Wskaźnik migotania prądu powinien być większy (a nawet dużo większy) od wskaźnika migotania napięcia w przypadku, gdy źródło zaburzeń znajduje się po stronie odbiorcy.**

## METODA 5

# Bezpośredni ciągły pomiar emisji wahań napięcia z wykorzystaniem impedancji odniesienia



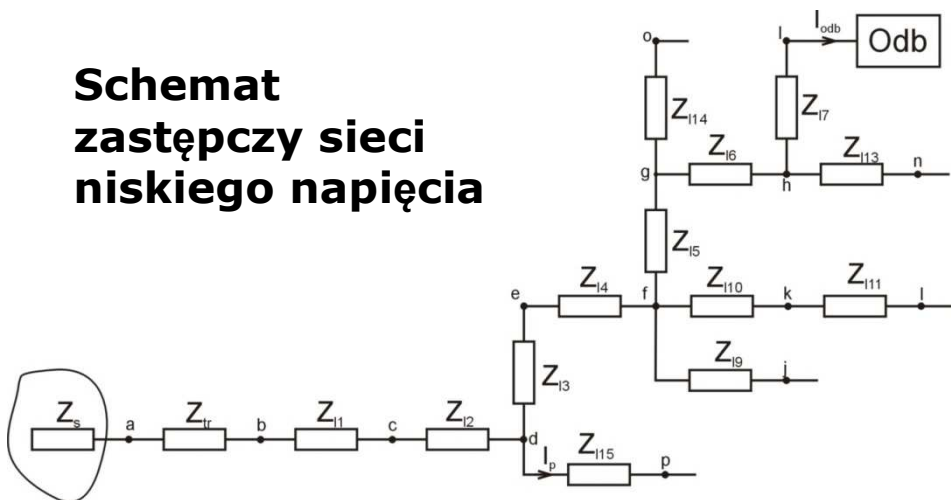


## METODA 6

# Wykorzystanie zmienności amplitudy wahań napięcia

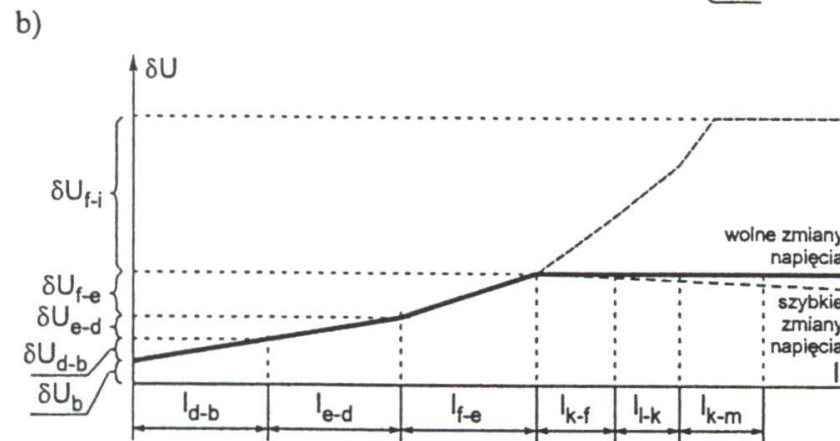
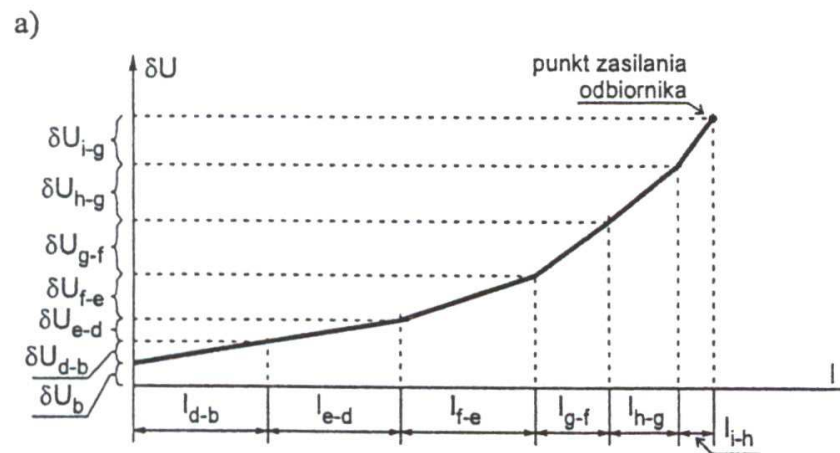
AGH

### Schemat zastępczy sieci niskiego napięcia



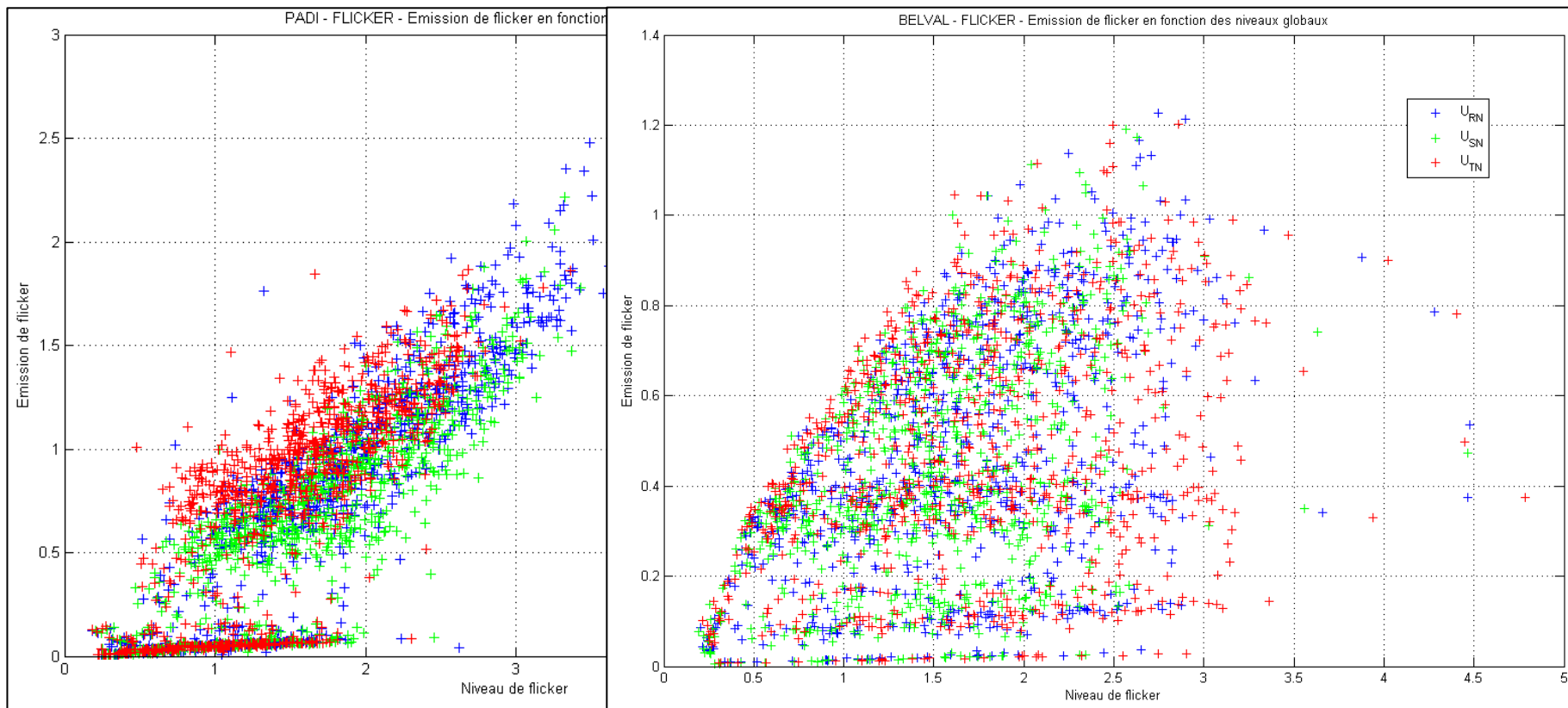
Amplituda zmian napięcia w liniach pomiędzy:

- a) węzłami  $b - i$
- b) węzłami  $b - m$



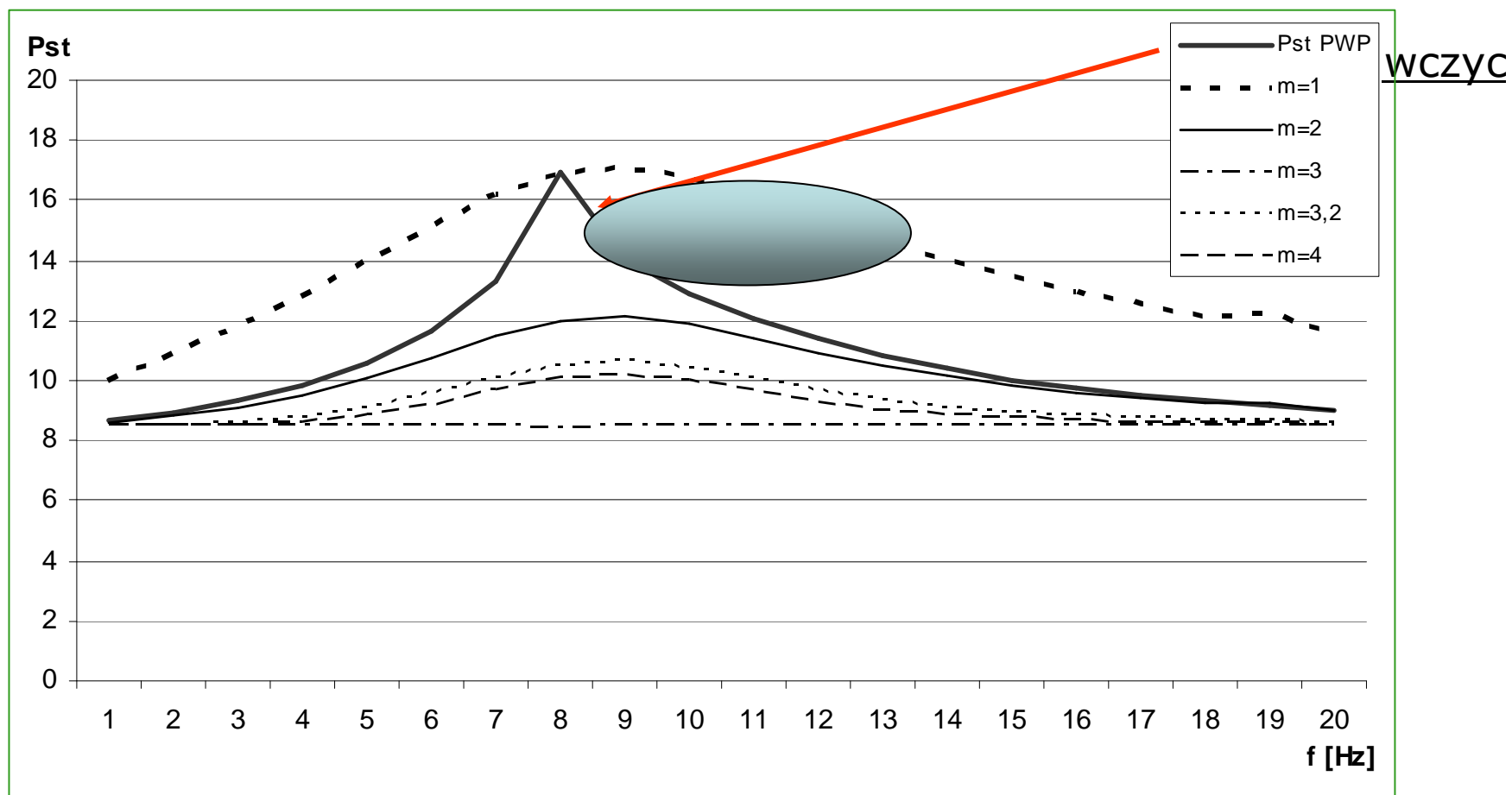


# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY





# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY





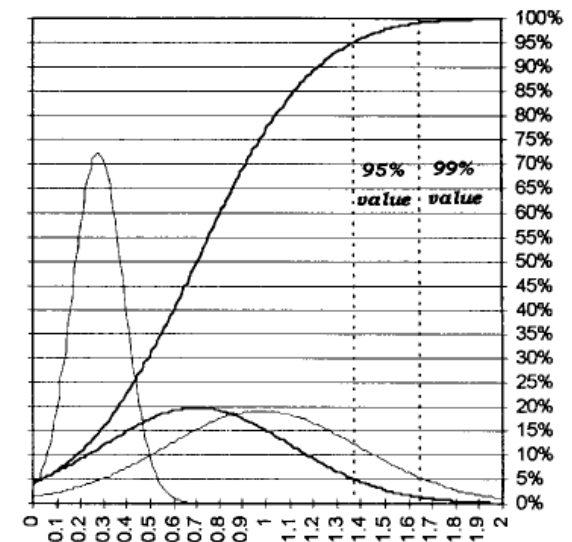
# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY

Ocena poziomu emisji wahań na podstawie analizy statystycznej

*Podjęcie statystyczne oparte na założeniu rozkładu normalnego dla stanu z przyłączonym i wyłączonym odbiornikiem niespokojnym*

$$\mu_i = \mu_{z\text{ odbiornikiem}} - \mu_{\text{bez odbiornika}}$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{z\text{ odbiornikiem}}^2 - \sigma_{\text{bez odbiornika}}^2}$$

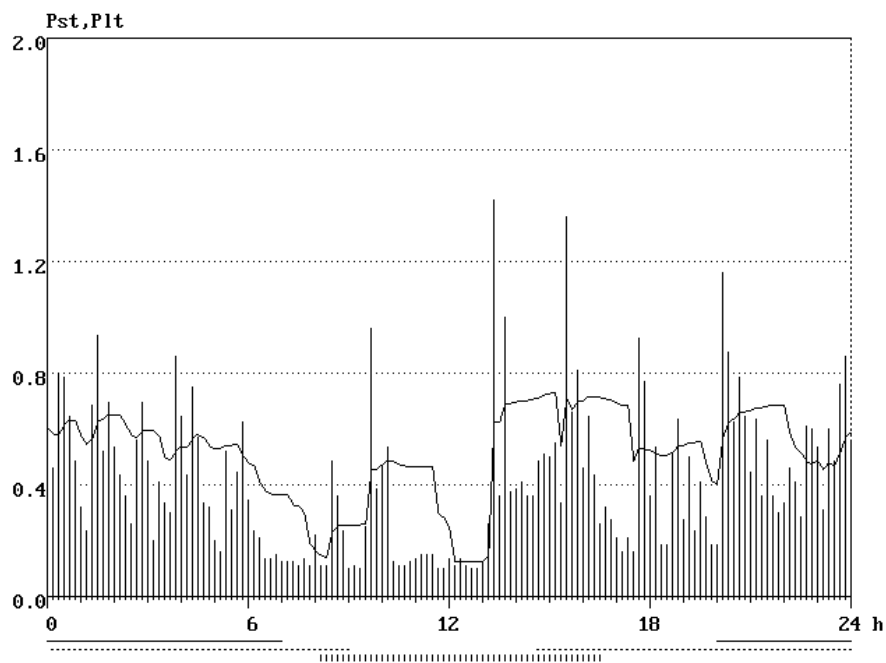




# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY

Ocena poziomu emisji wahań na podstawie analizy statystycznej

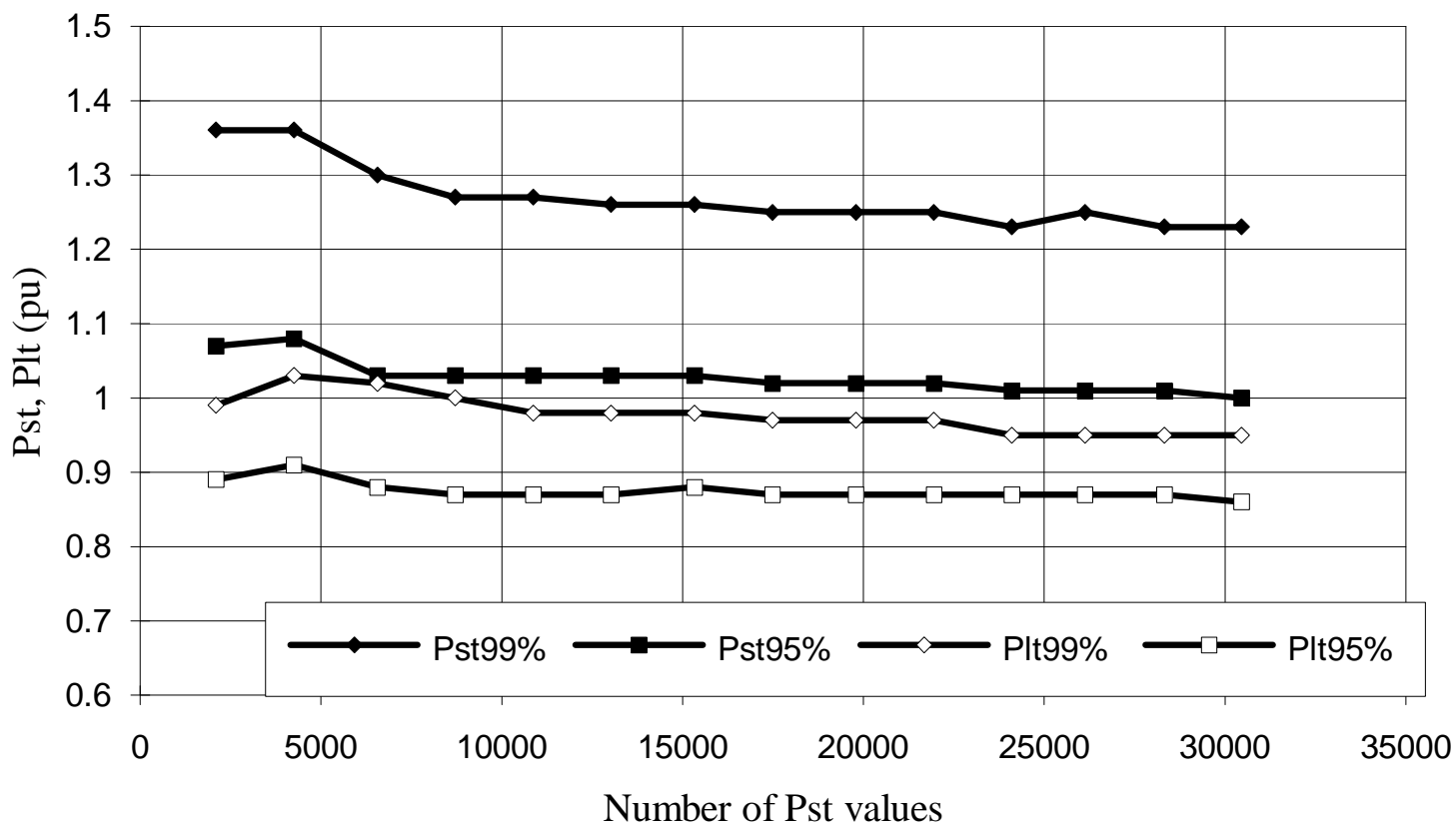
*Podjęcie statystyczne oparte na równoczesnym pomiarze wahań napięcia i mocy*



*Pomiar 24 h (WN)*  
*Pst i Plt dla trzech pieców łukowych*

- ..... piec A (AC, 100 MVA)
- piec B (AC, 100 MVA)
- ||||||| piec C (DC, 95 MVA)

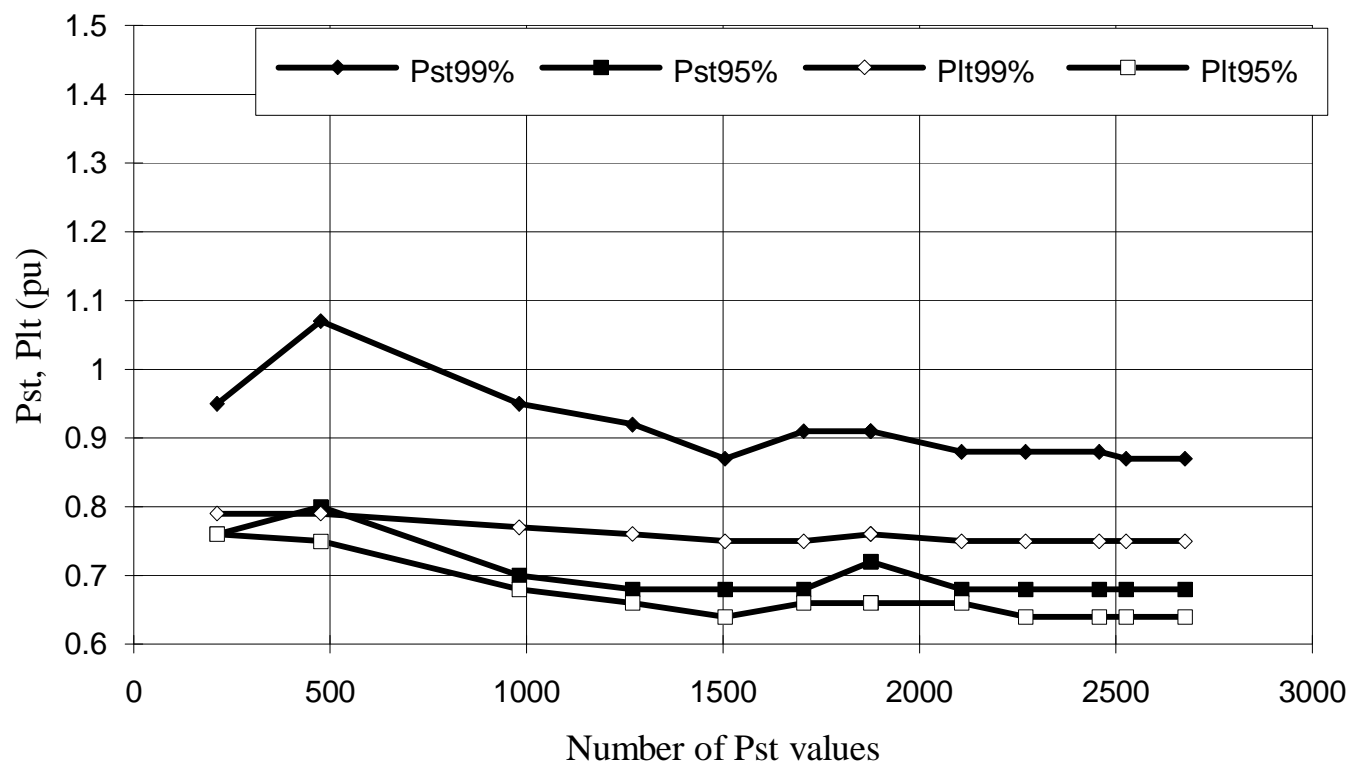
# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY



Pomiar ciągły (całkowity poziom wahań)



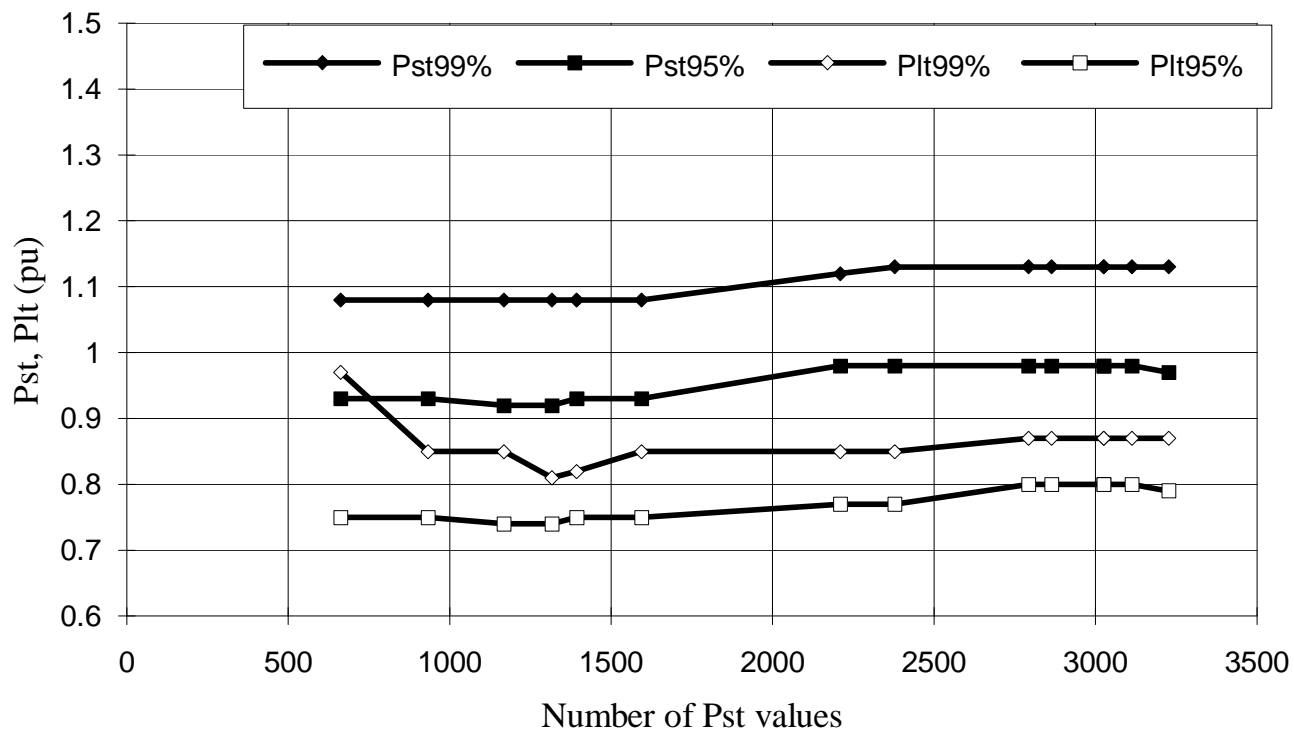
# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY



Pomiar nieciągły (pracował tylko piec A)

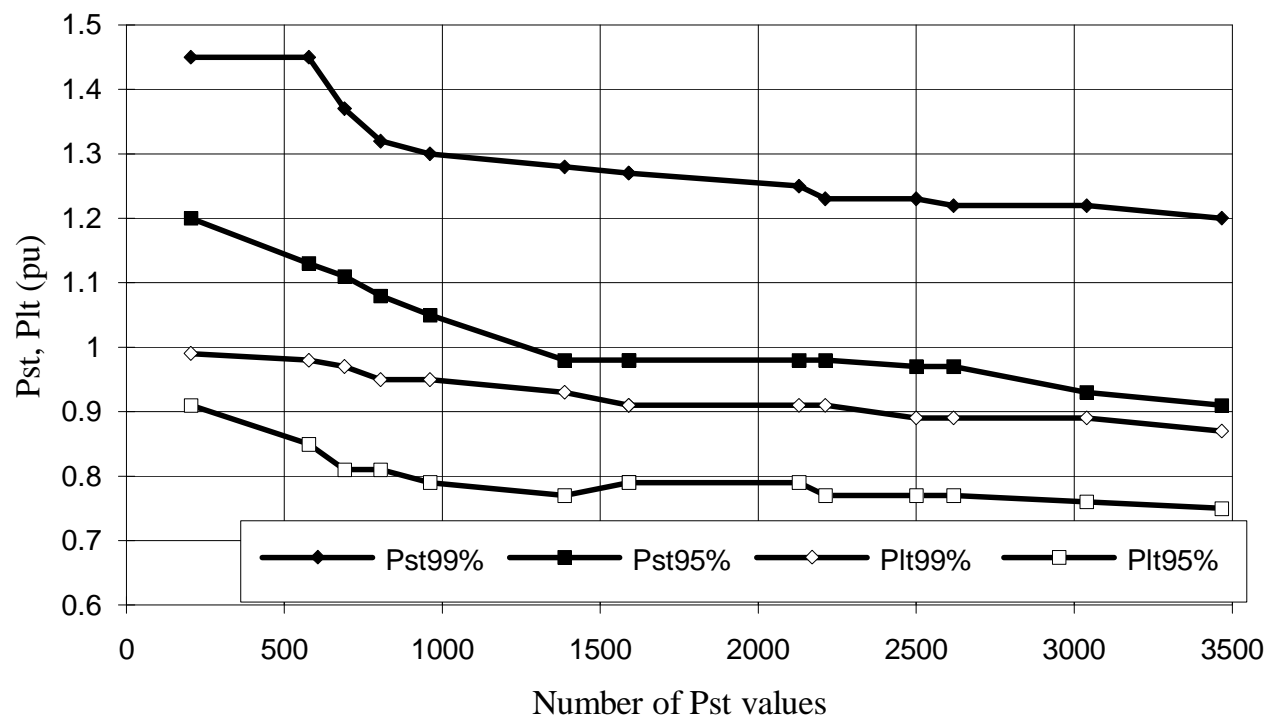


# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY



Pomiar nieciągły (pracował tylko piec B)

# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY

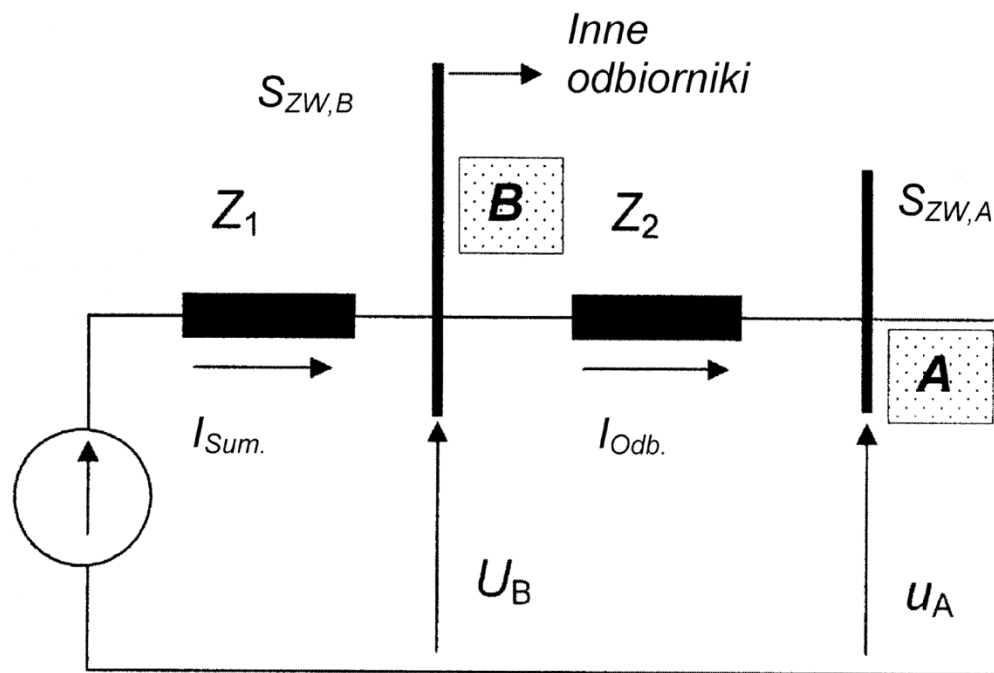


Pomiar nieciągły (pracował tylko piec C)

# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY

Bezpośrednie *on-line* pomiary poziomu emisji wahań napięcia

*Metoda 1: Podejście uproszczone*



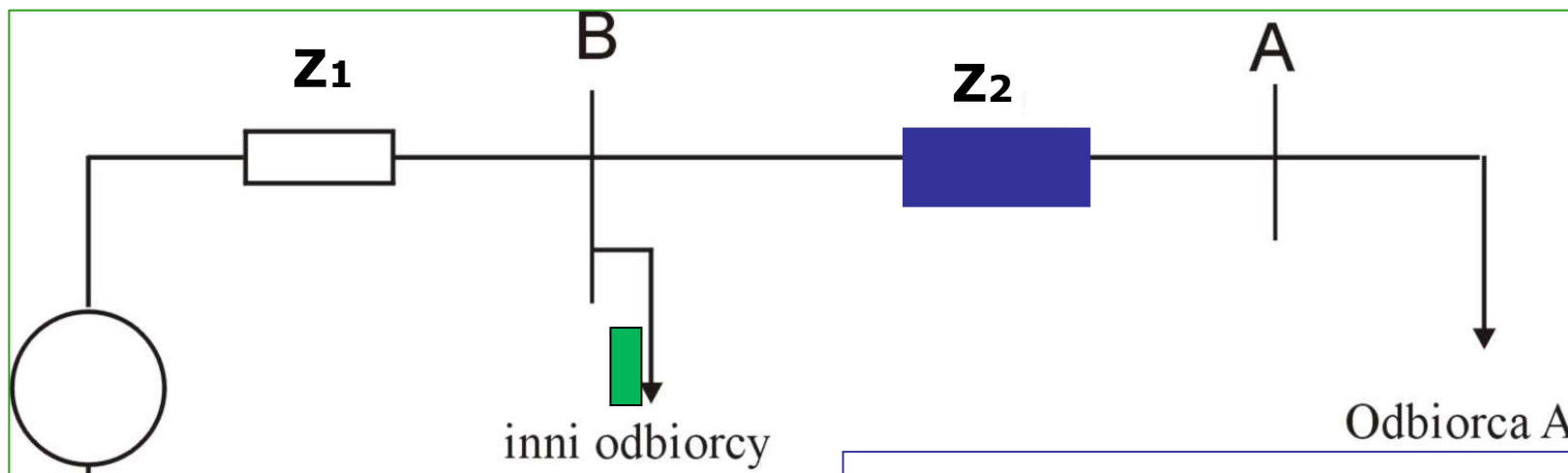
Schemat zastępczy sieci dla rozważań zgodnych z Metodą 1

$$P_{st}(B) \approx \left| \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right| P_{st}(A) = \frac{S_{ZW(A)}}{S_{ZW(B)}} P_{st}(A) \approx \frac{X_1}{X_1 + X_2} P_{st}(A)$$



# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY

Metoda 2: Analiza spadku napięcia



$$\Delta u(A) = \Delta u_{bg}(A) + \Delta u_i(A)$$

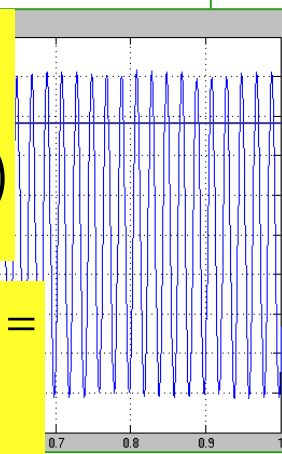
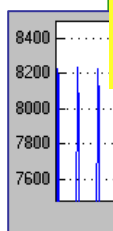
$$\Delta u(B) = \Delta u_{bg}(B) + \Delta u_i(B)$$

$$\Delta u_{bg}(A) \approx \Delta u_{bg}(B)$$

$$\Delta u_i(B) = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \Delta u_i(A)$$

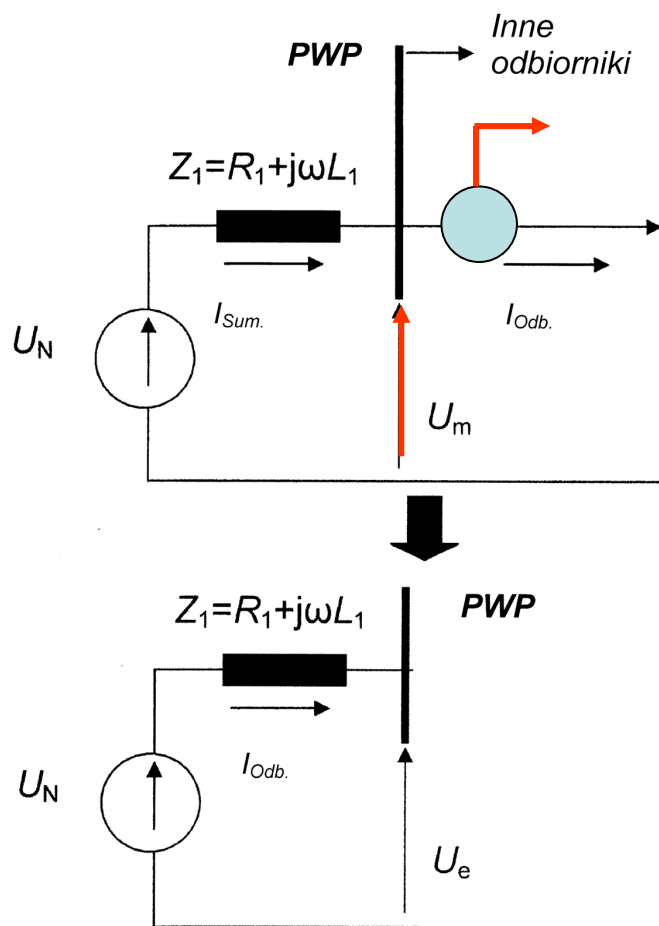
$$\Delta u(AB) = \Delta u(A) - \Delta u(B) = \Delta u_{bg}(A) + \Delta u_i(A) - \Delta u_{bg}(B) - \Delta u_i(B) =$$

$$\cancel{\Delta u_{bg}(B)} + \Delta u_i(B) \cdot \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} - \cancel{\Delta u_{bg}(B)} - \Delta u_i(B) =$$



# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY

Metoda 3: Analiza prądu odbiornika



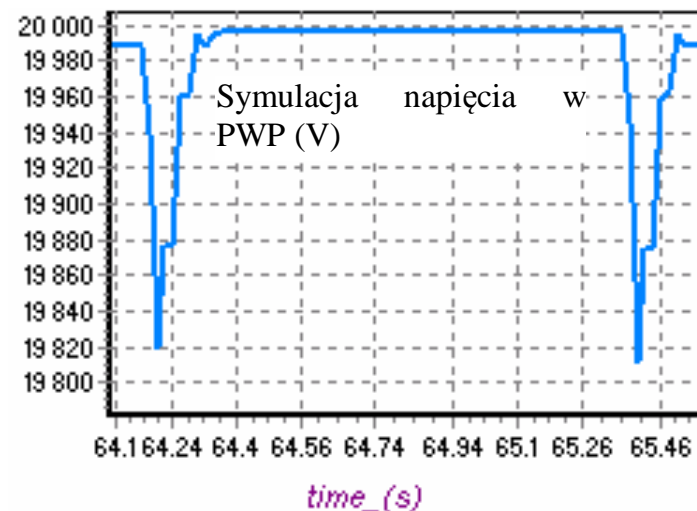
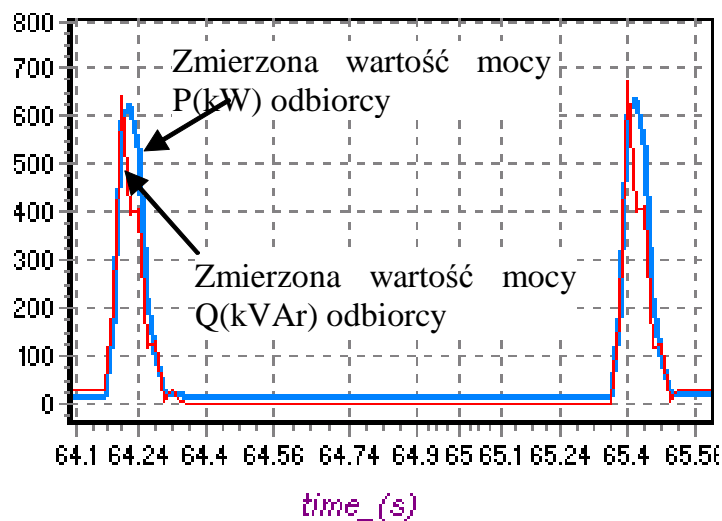
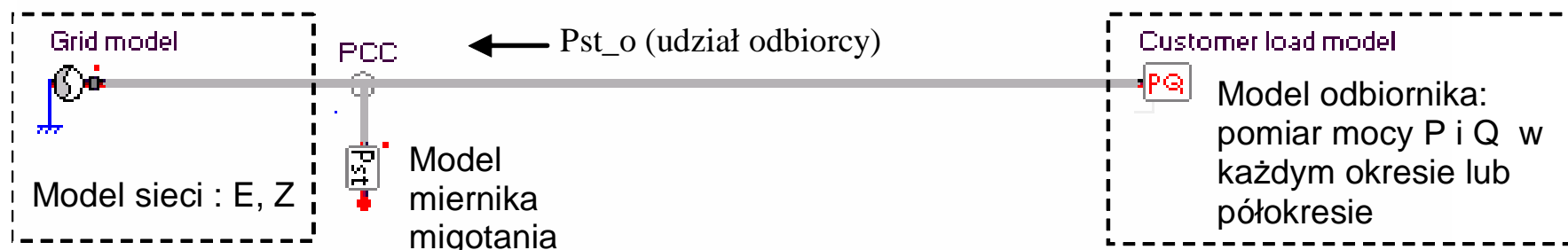
$$u(t) = u_m(t) + R_1 i_1(t) + L_1 \frac{di_1(t)}{dt}$$

$$u_N(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} U_N \sin(\omega t + \alpha)$$

$$u_e(t) = u_N(t) - R_1 i_{Odb.}(t) - L_1 \frac{di_{Odb.}(t)}{dt}$$

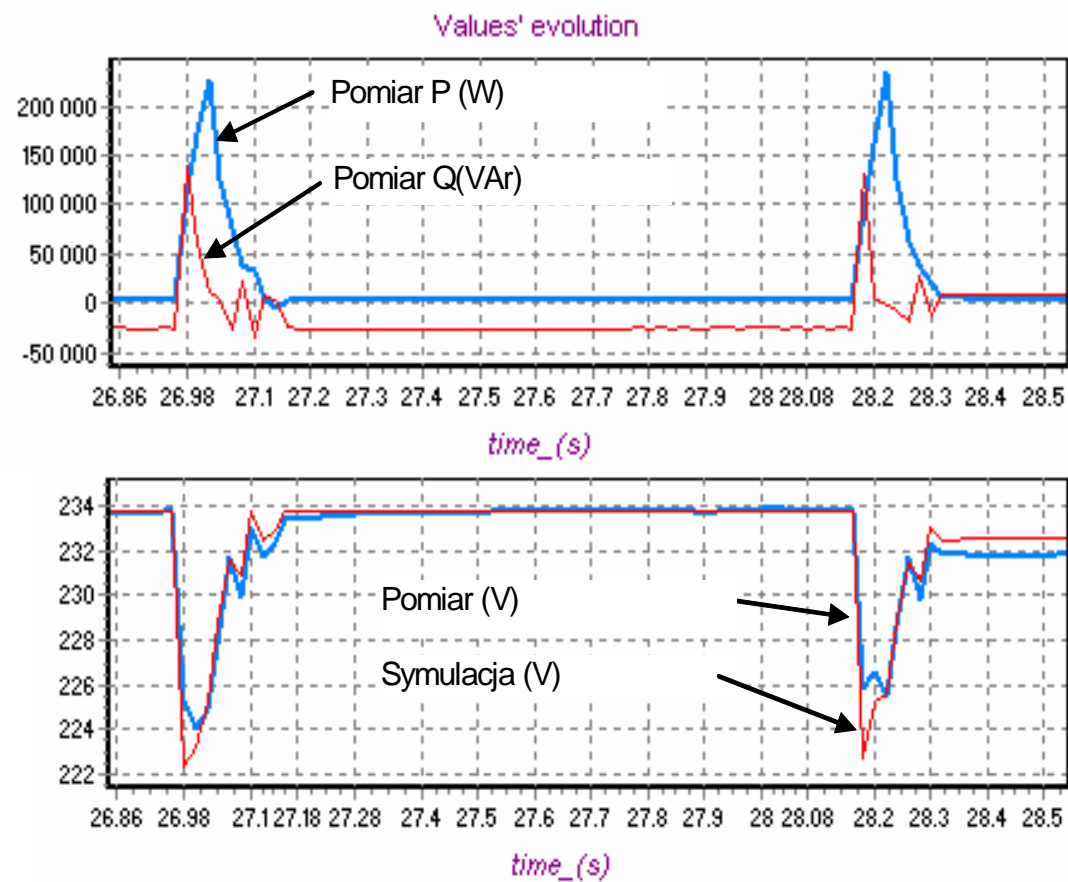
# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY

## Metoda 4: Pomiar i symulacje



# OCENA EMISJI WAHAŃ NAPIĘCIA ODBIORNIKÓW DUŻEJ MOCY

## Metoda 4: Pomiarzy i symulacje





# **DZIĘKUJE ZA UWAGĘ . . .**

**Zbigniew Hanzelka  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30  
Tel.: 12 617 28 78, 12 617 28 01  
E-mail: [hanzel@agh.edu.pl](mailto:hanzel@agh.edu.pl)**