



Euro - Centrum

Studia Podyplomowe

# EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ

w ramach projektu

**Śląsko-Małopolskie Centrum Kompetencji  
Zarządzania Energią**

## JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ – ZAPADY NAPIĘCIA

**dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka**



**AGH**

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

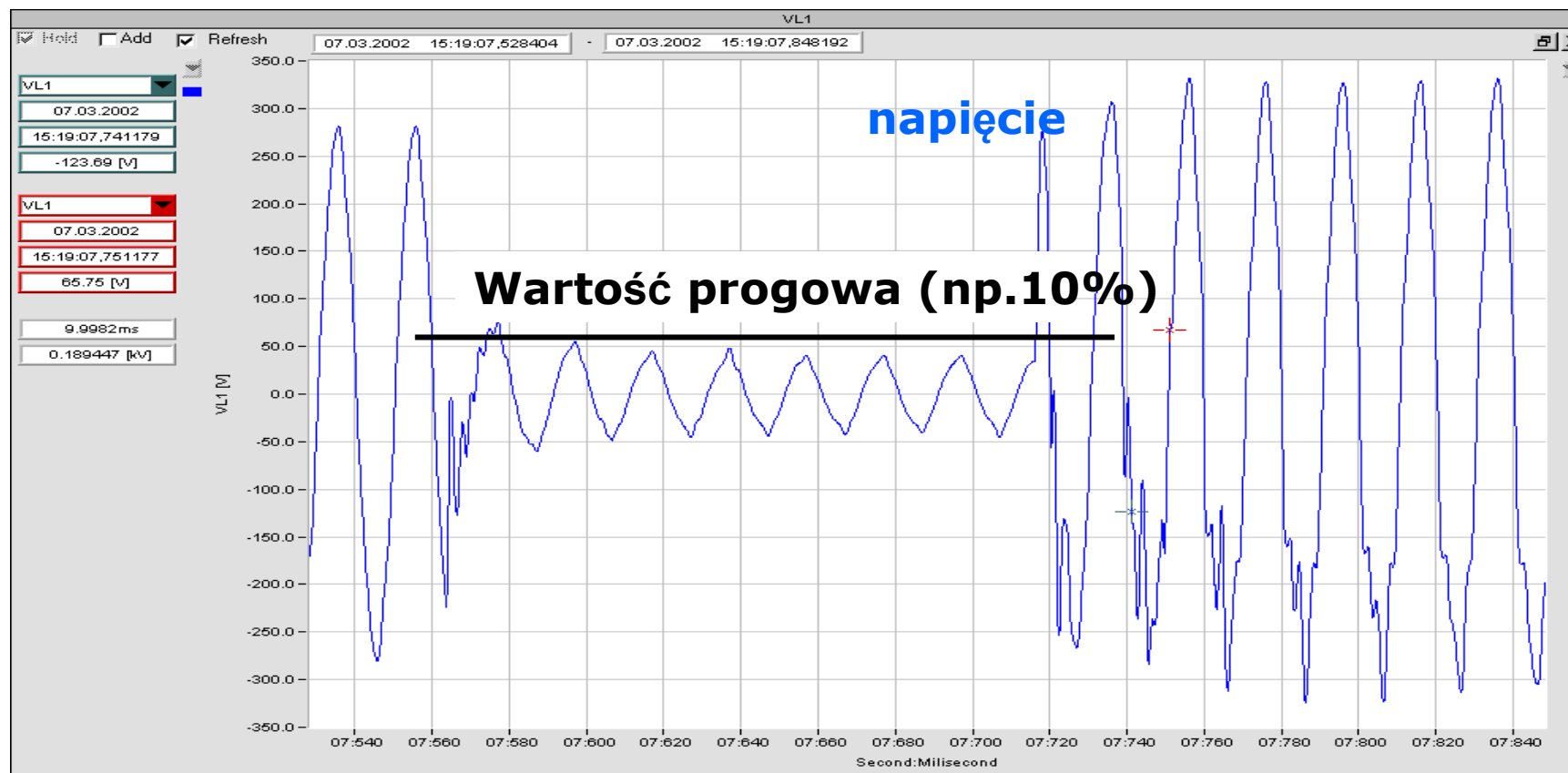
# **JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ – ZAPADY NAPIĘCIA**

**Zbigniew HANZELKA**

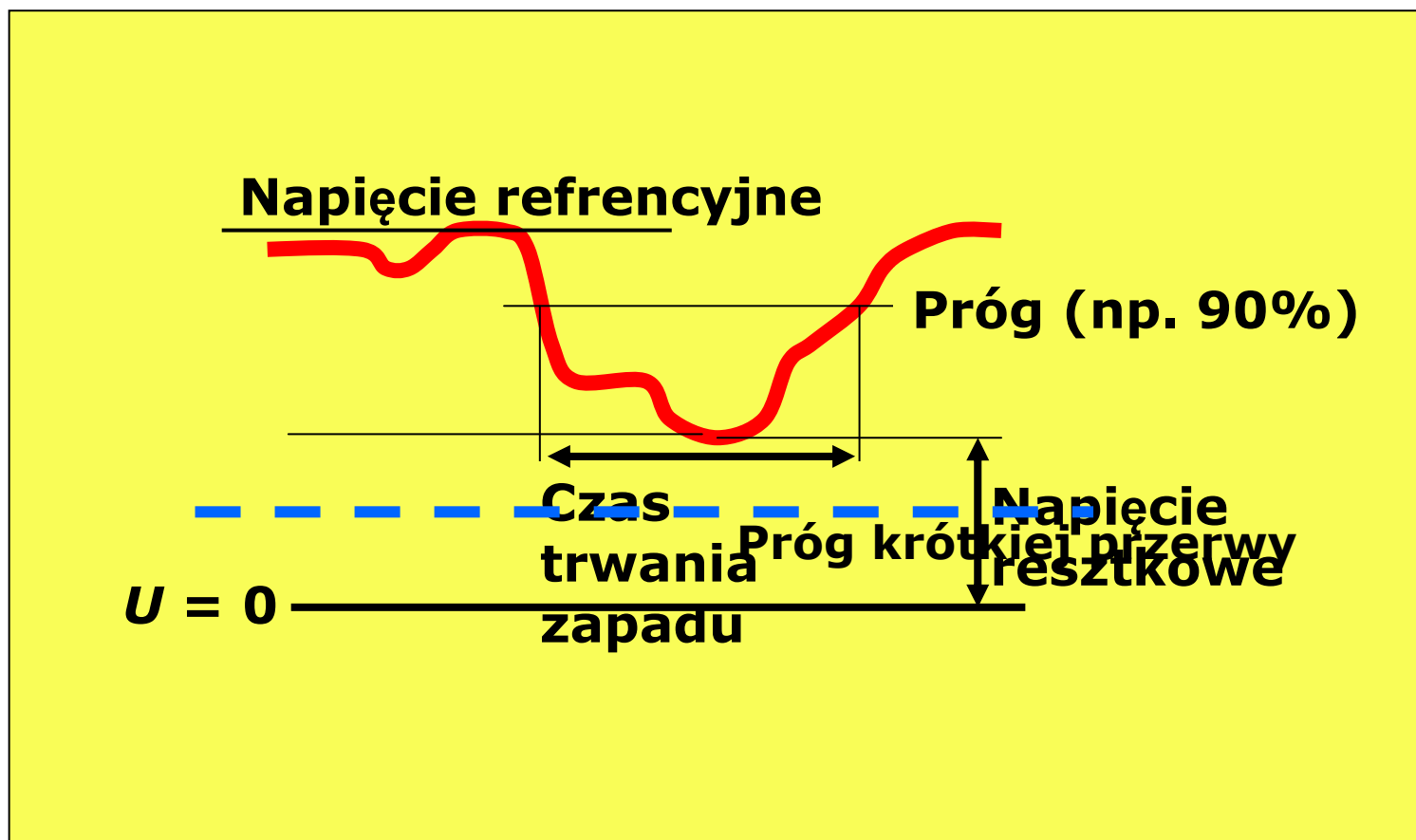
**KGHM, marzec 2012 r**



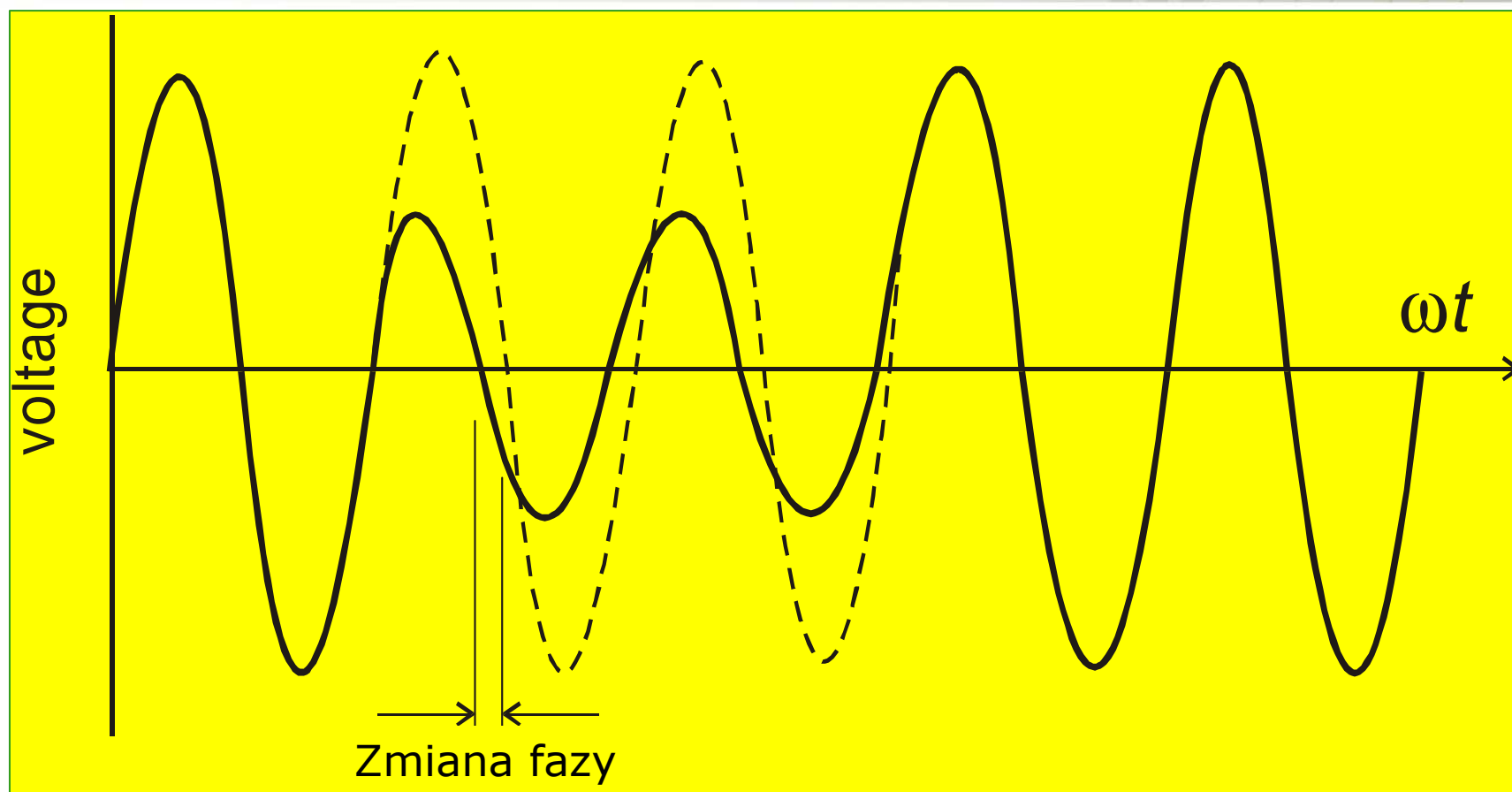
# ZAPADY NAPIĘCIA



# ZAPADY NAPIĘCIA



# ZAPADY NAPIĘCIA

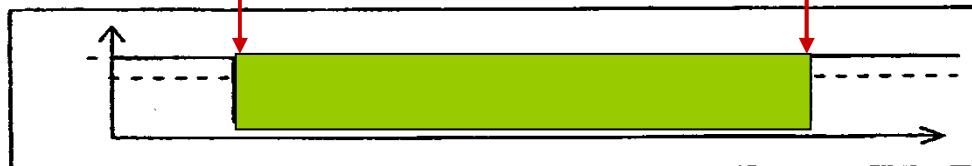
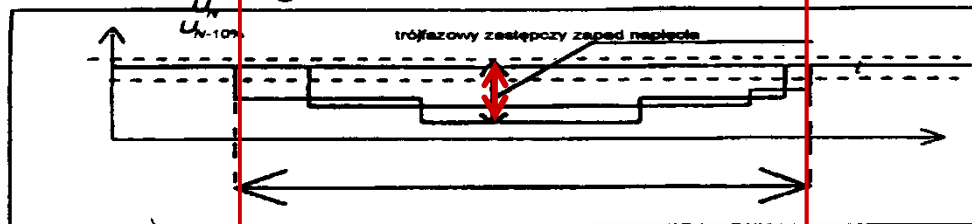
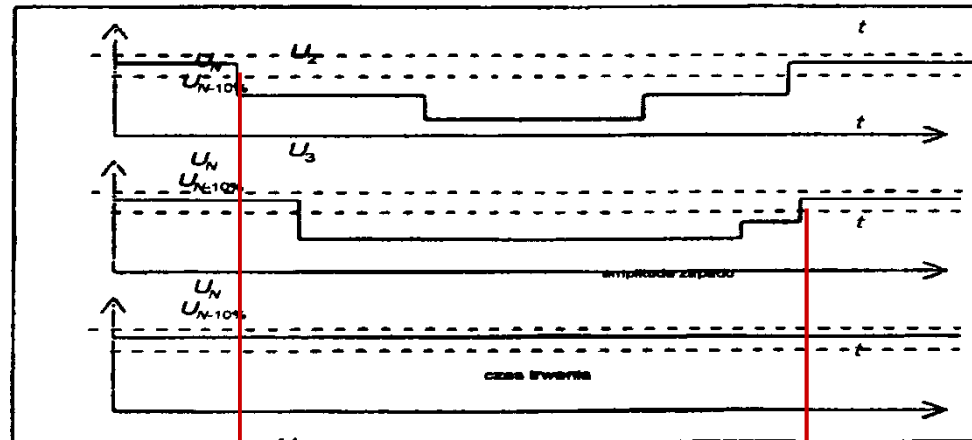
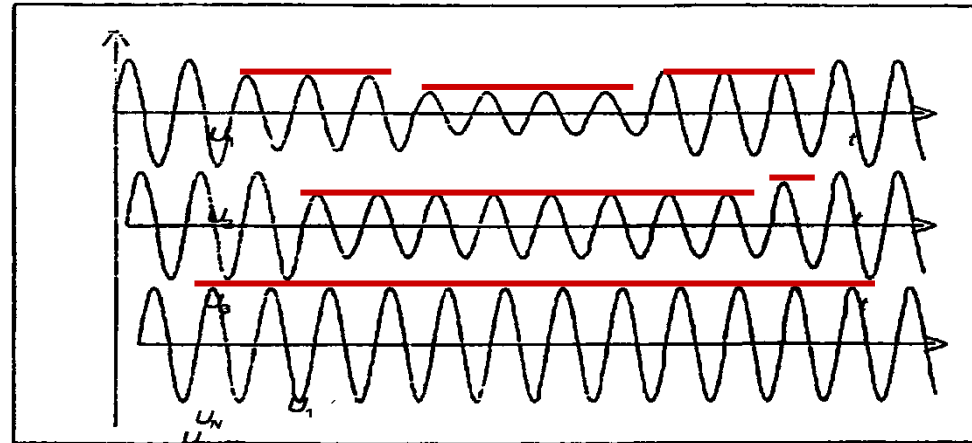


Regulacje pomijają także fazę początkową zapadu



AGH

# Zapad trójfazowy

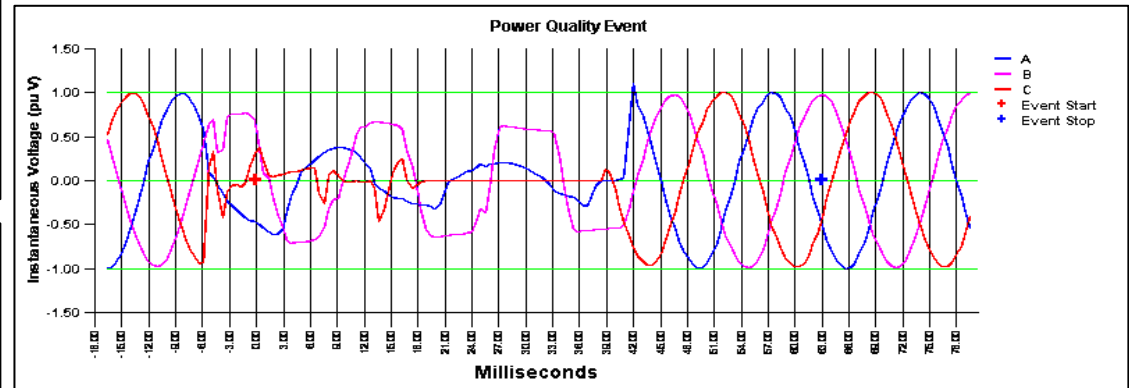
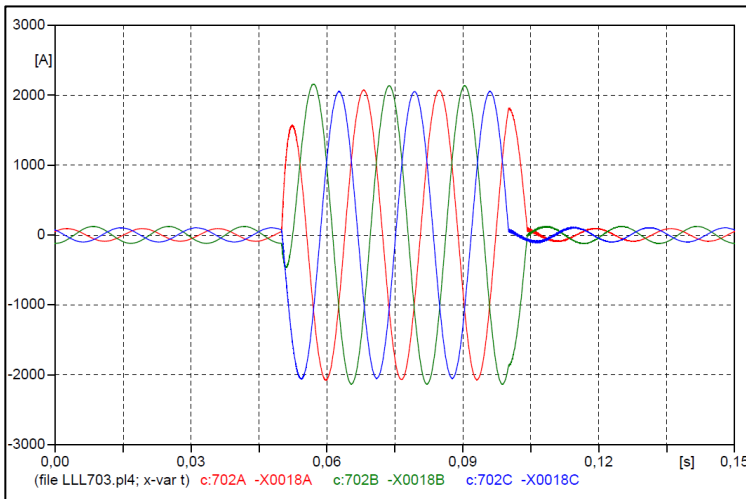
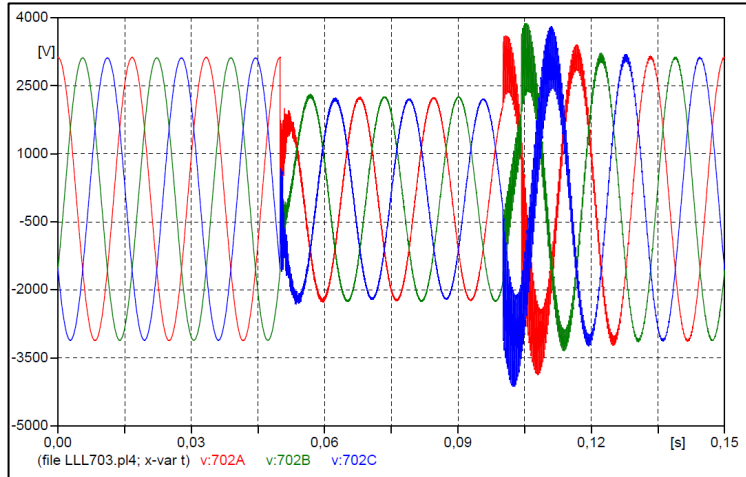




# Przyczyny zapadów napięcia

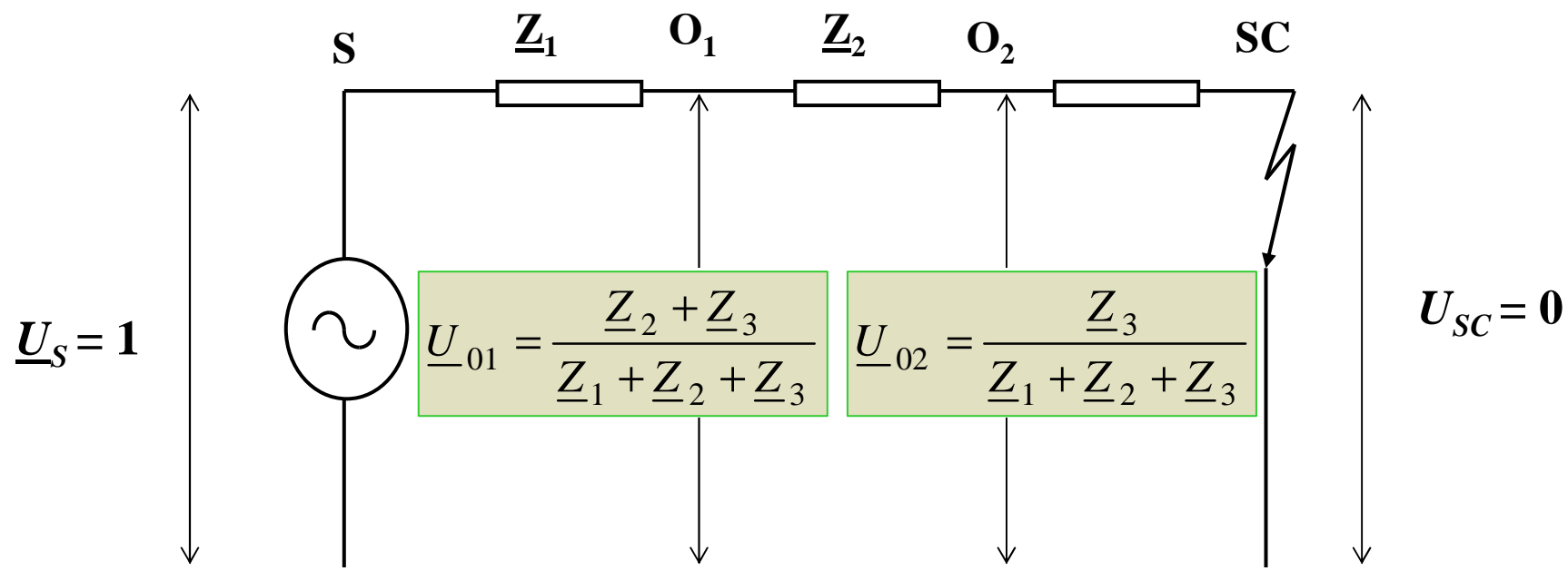


# ŹRÓDŁA ZAPADÓW



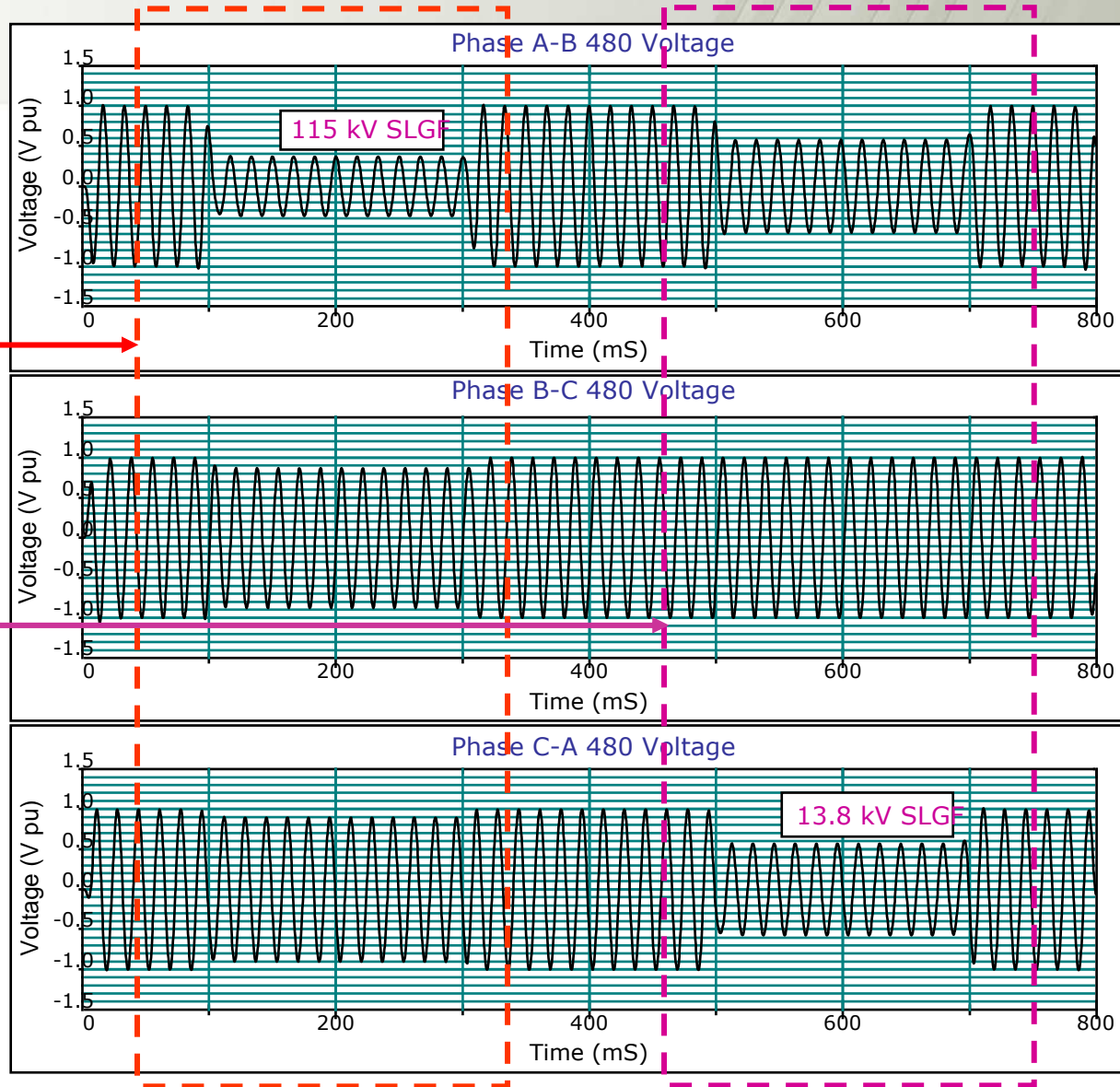
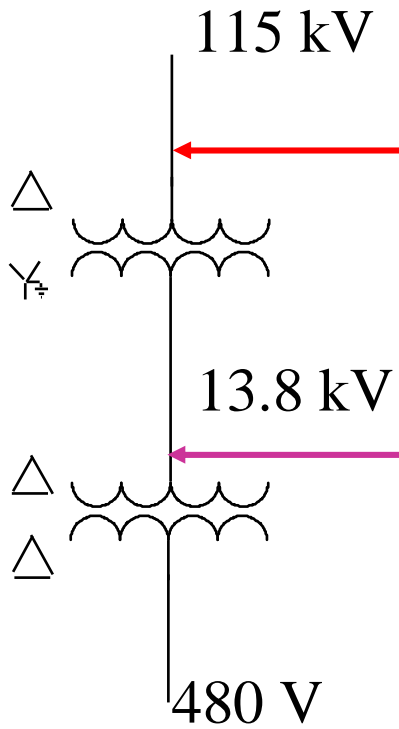


# Przyczyny zapadów napięcia

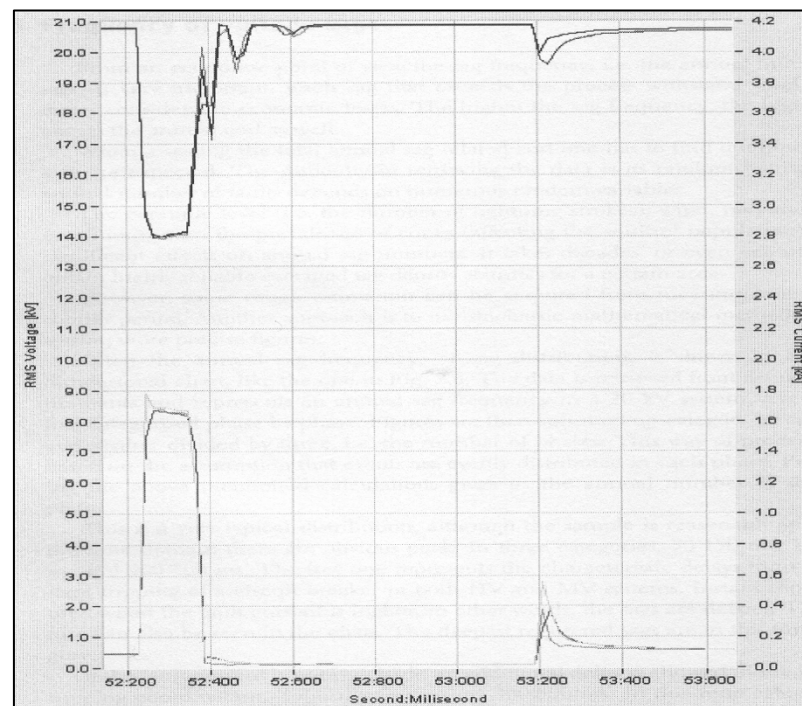
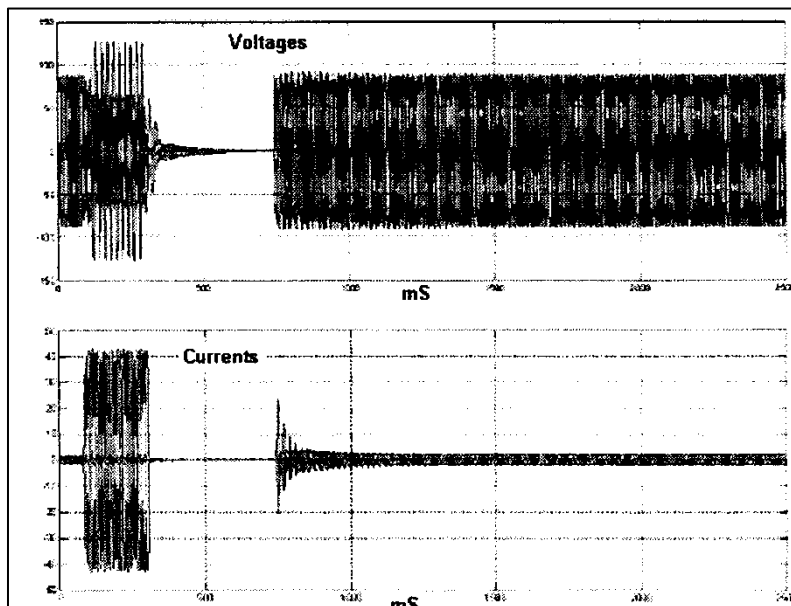




# Połączenie transformatora

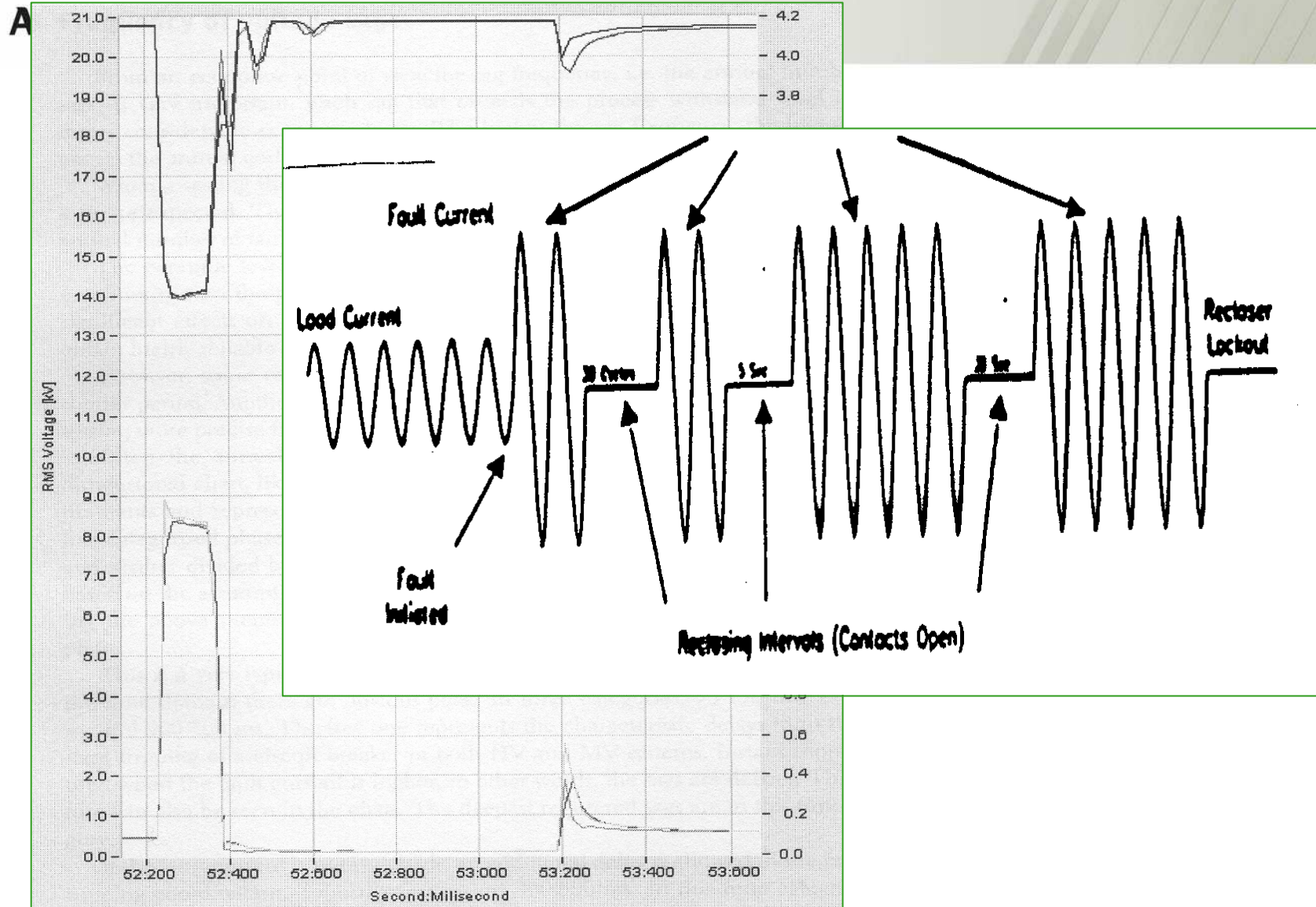


# ŹRÓDŁA ZAPADÓW



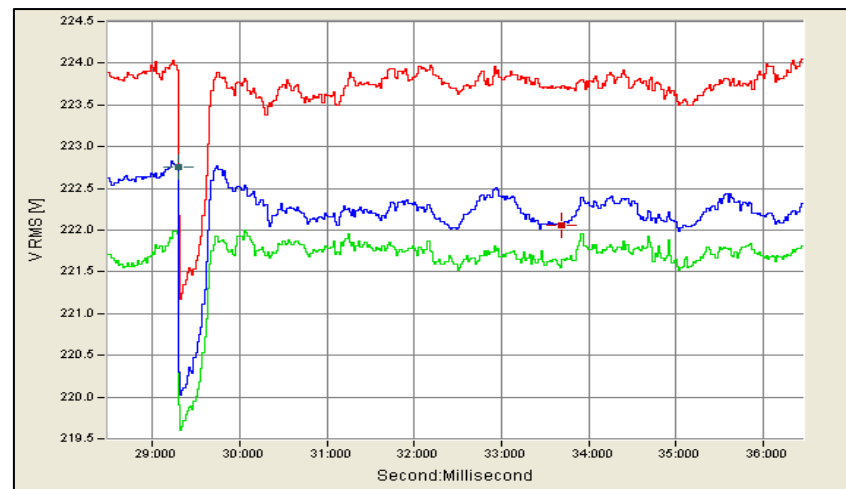
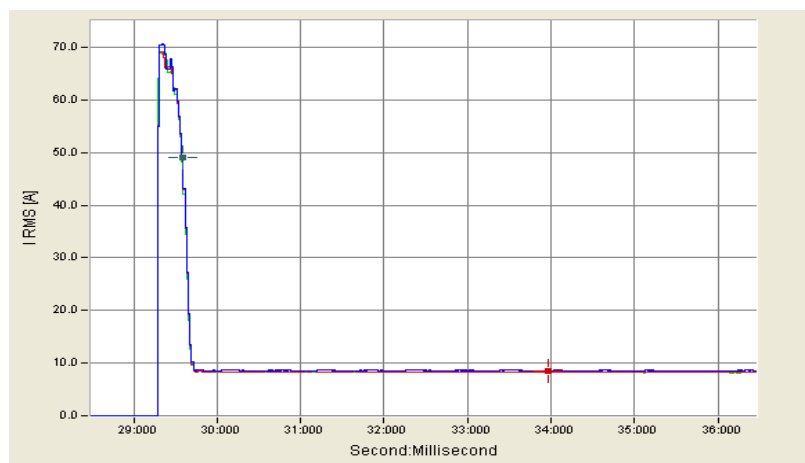
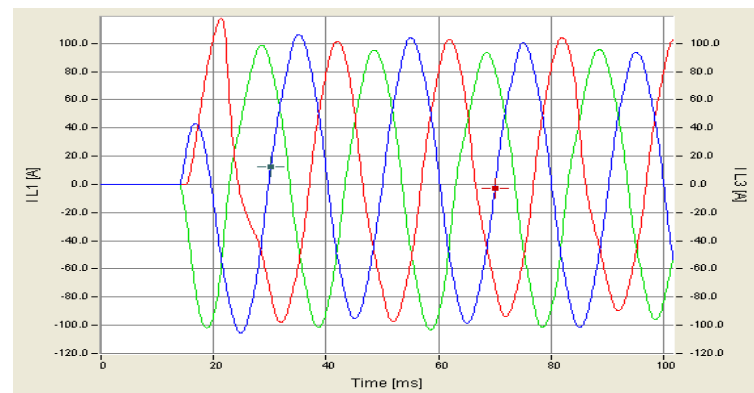
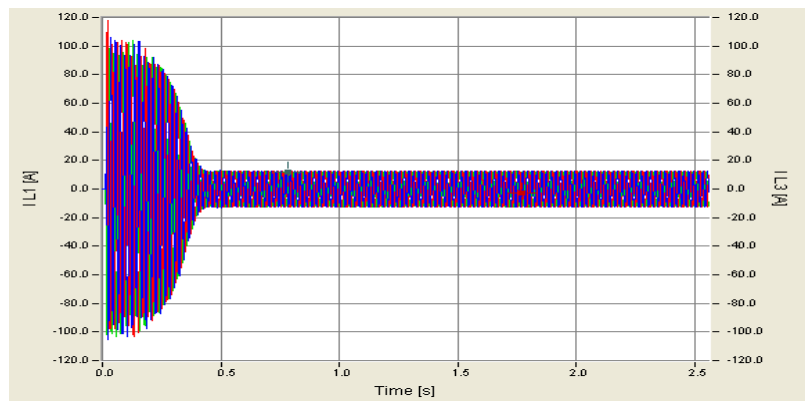


# AUTOMATYKA SAMOCZYNNEGO POWTÓRNEGO ZAŁĄCZANIA (SPZ)



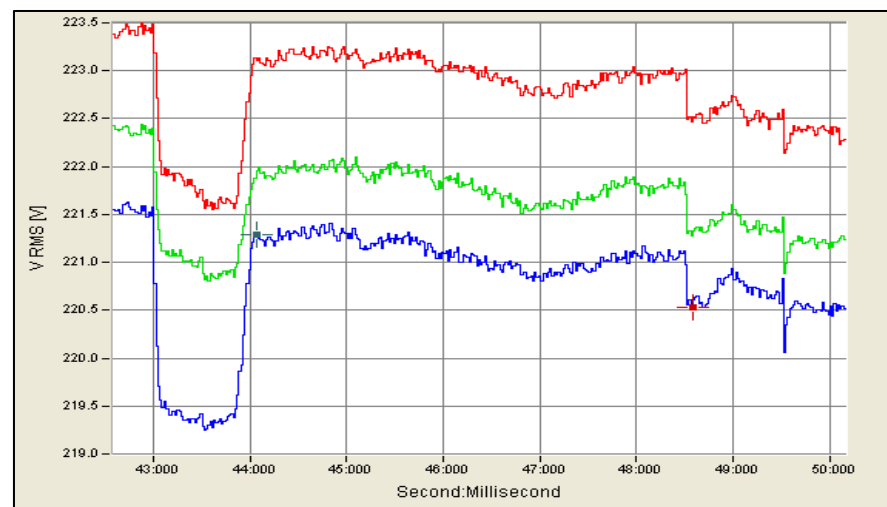
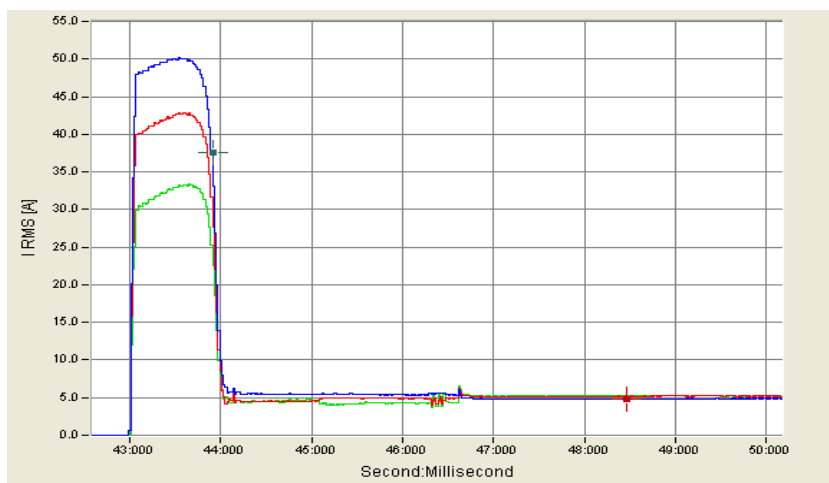
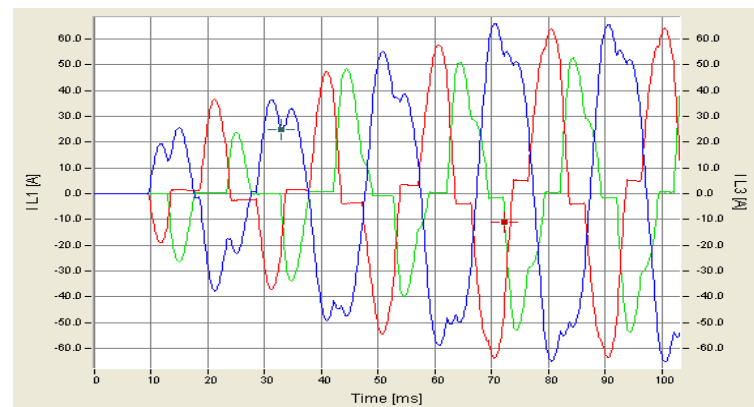
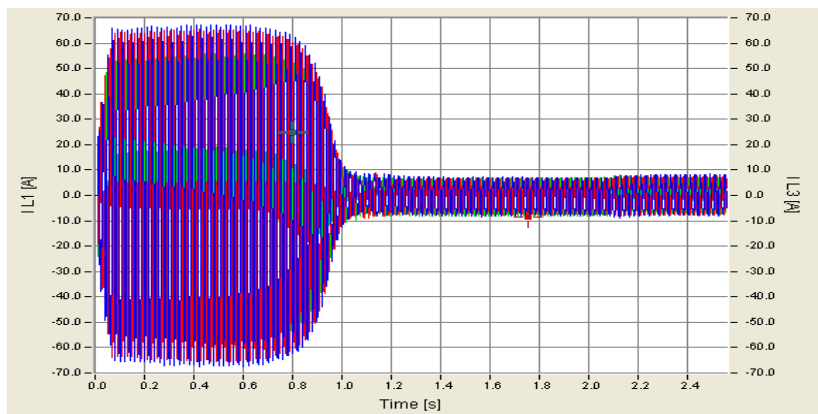


# ŹRÓDŁA ZAPADÓW

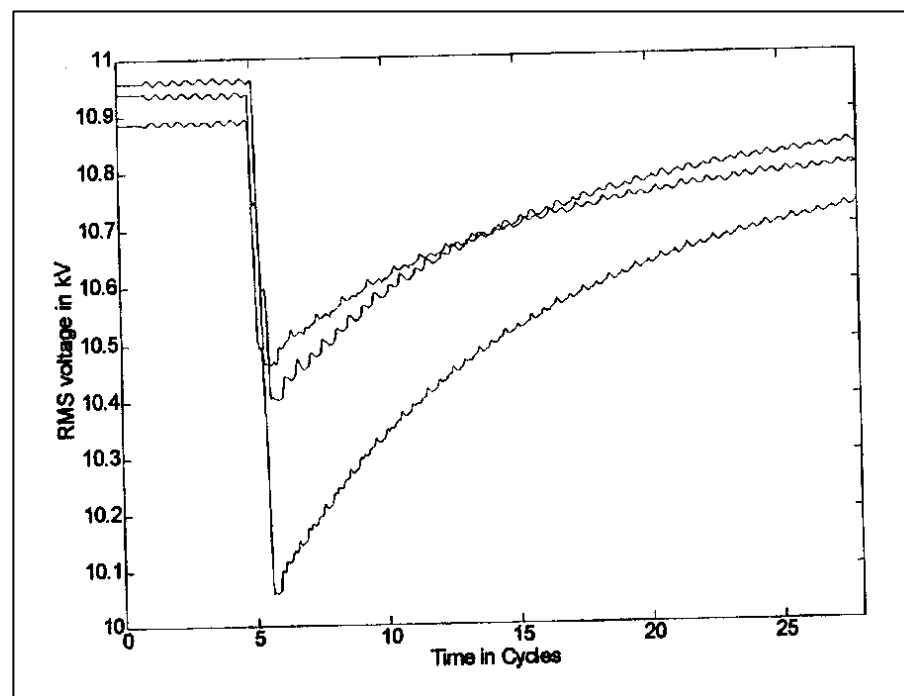
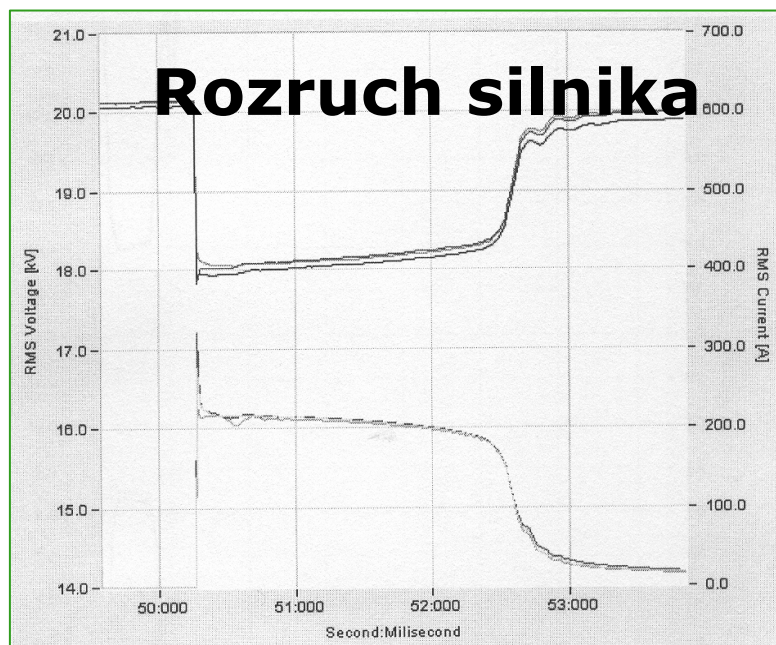




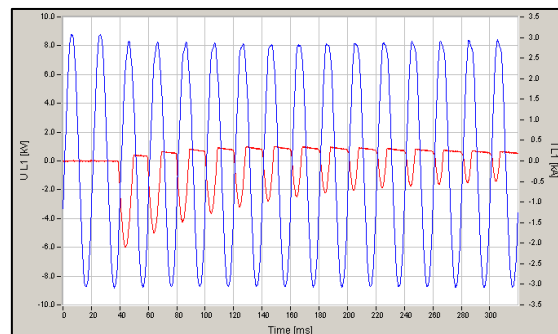
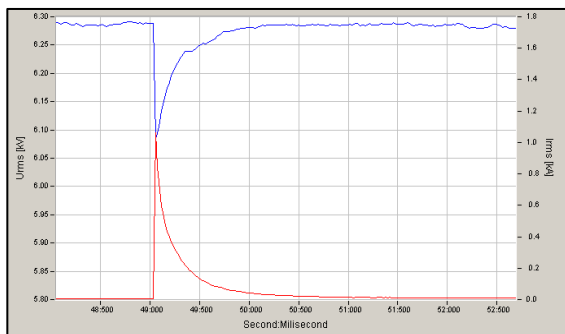
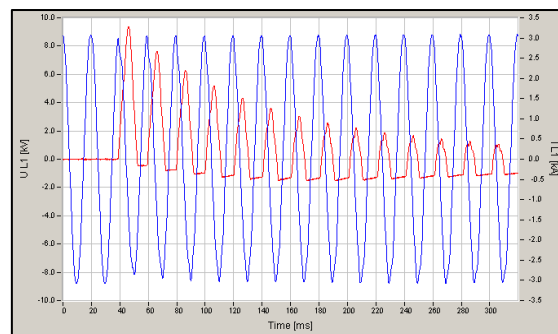
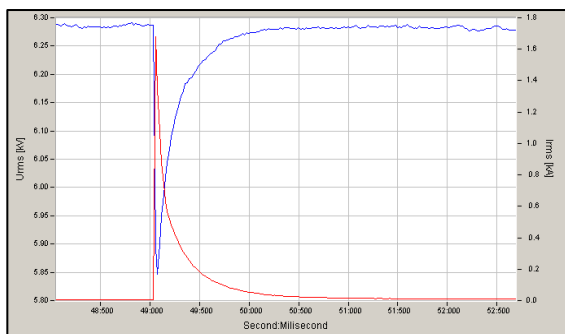
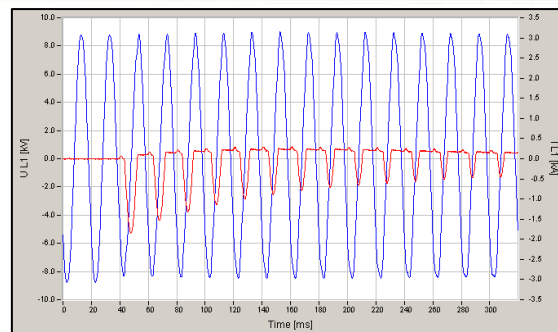
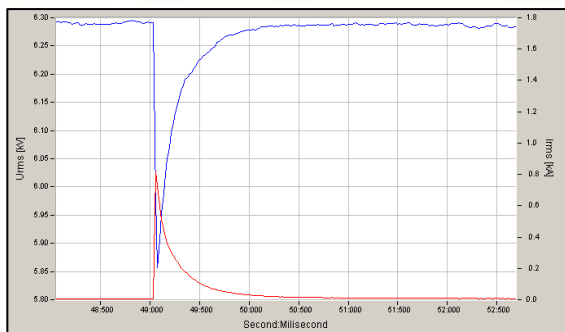
# ŹRÓDŁA ZAPADÓW





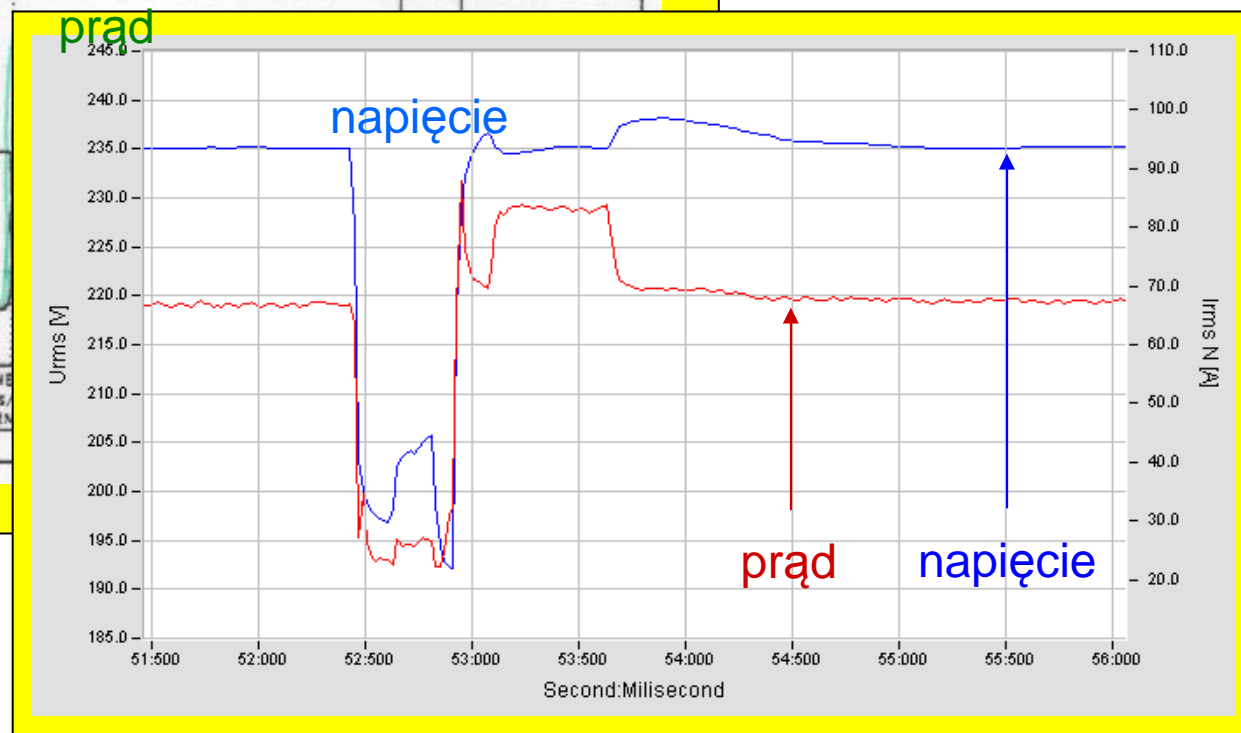
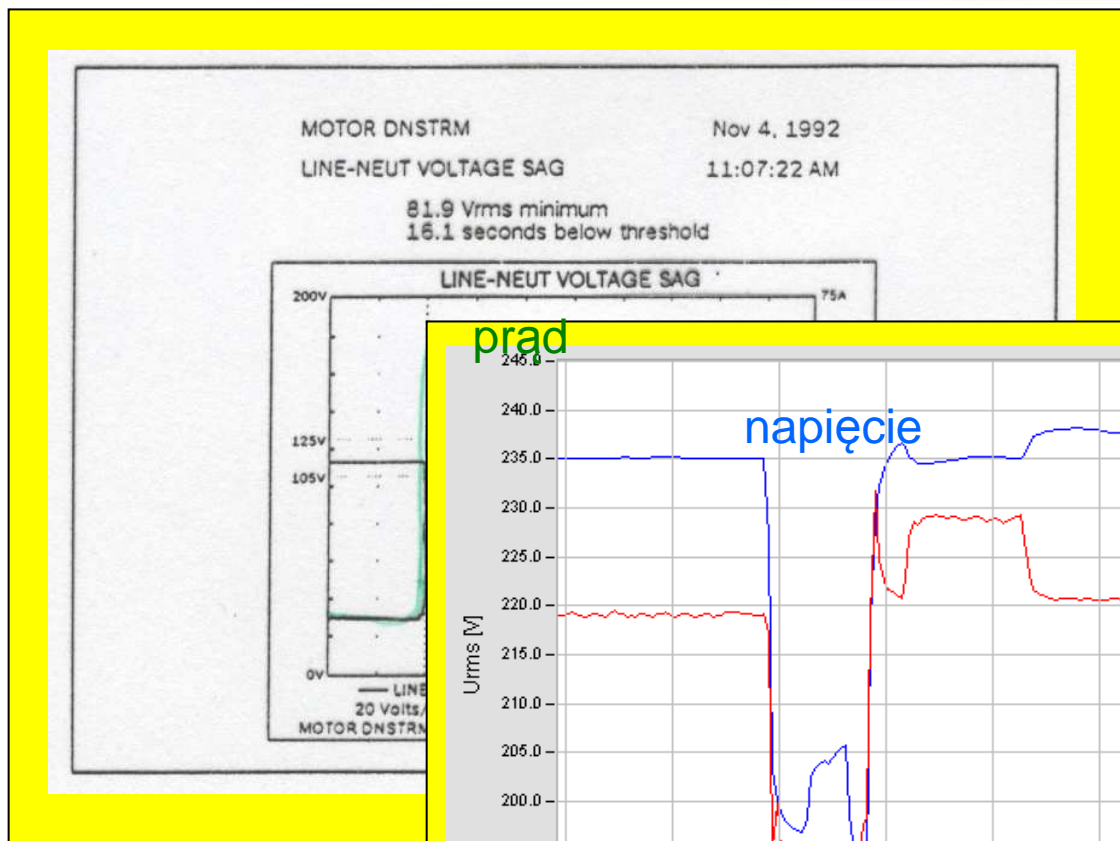


# ŹRÓDŁA ZAPADÓW





# LOKALIZACJA ŹRÓDŁA





# Skutki

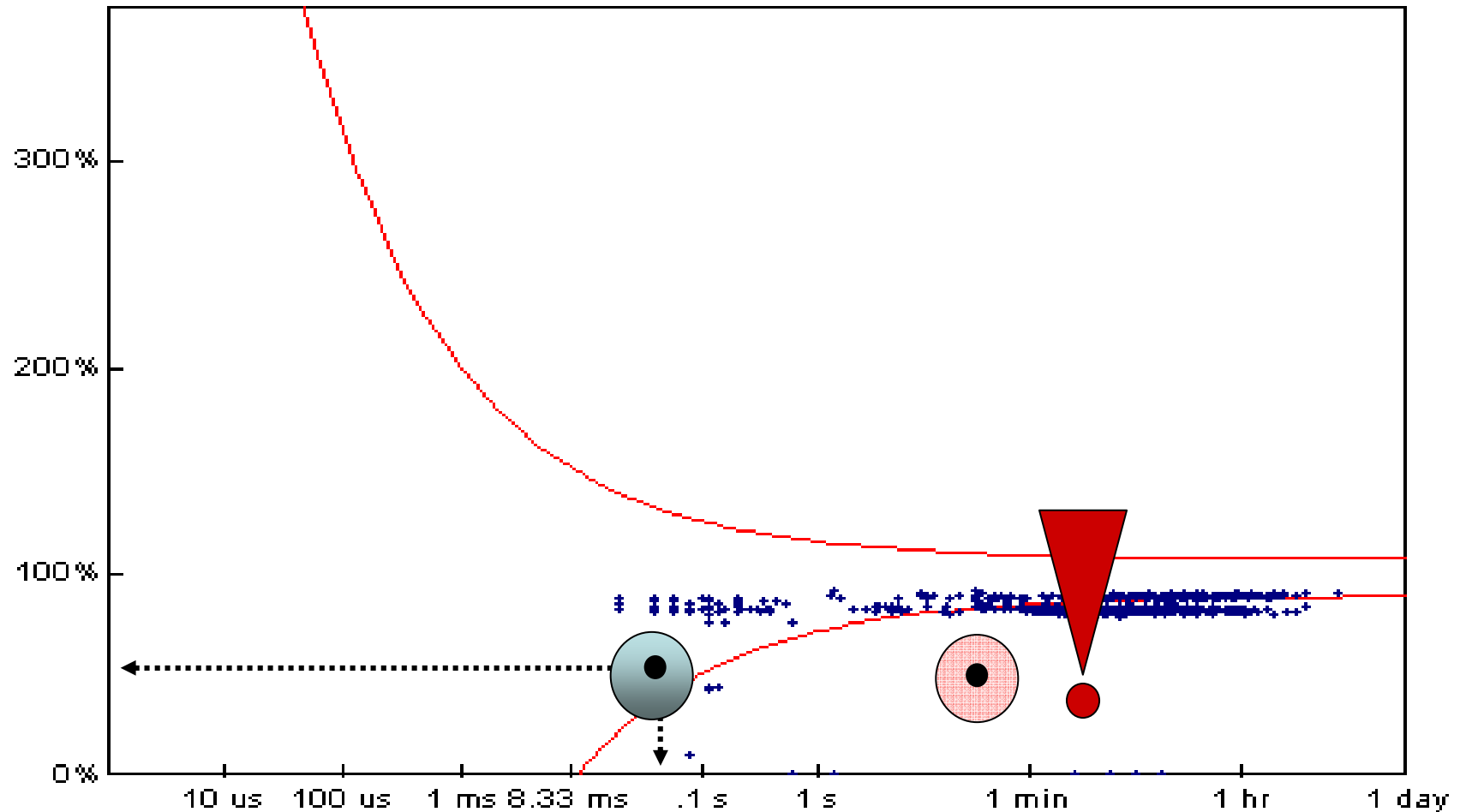


# SKUTKI ZAPADÓW



## Kinga (Trafo 11 str wtór całosc) (CBEMA)

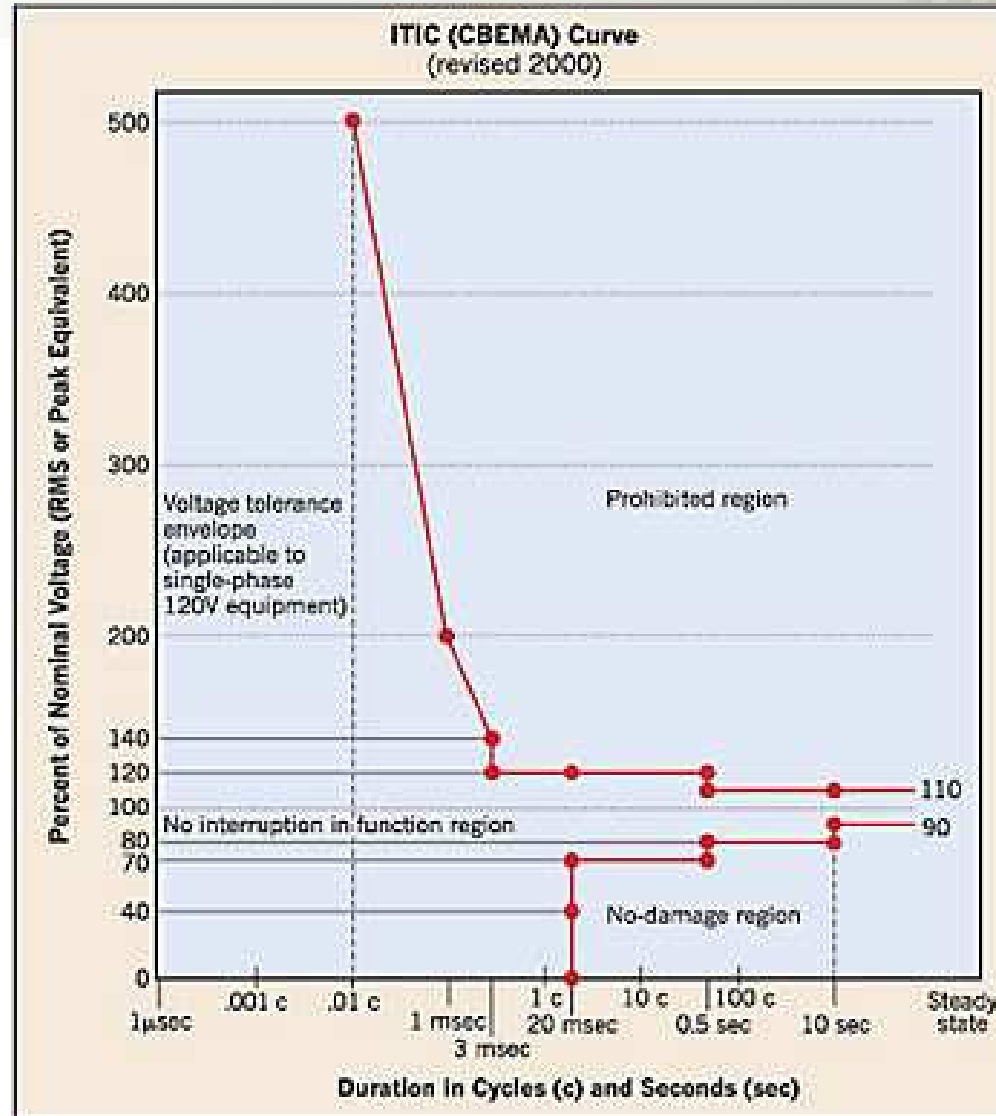
Phase A Event Tolerance Summary. March 08, 2002. 743 events.





# 1996 ITIC Curve1

Information Technology Industry Council

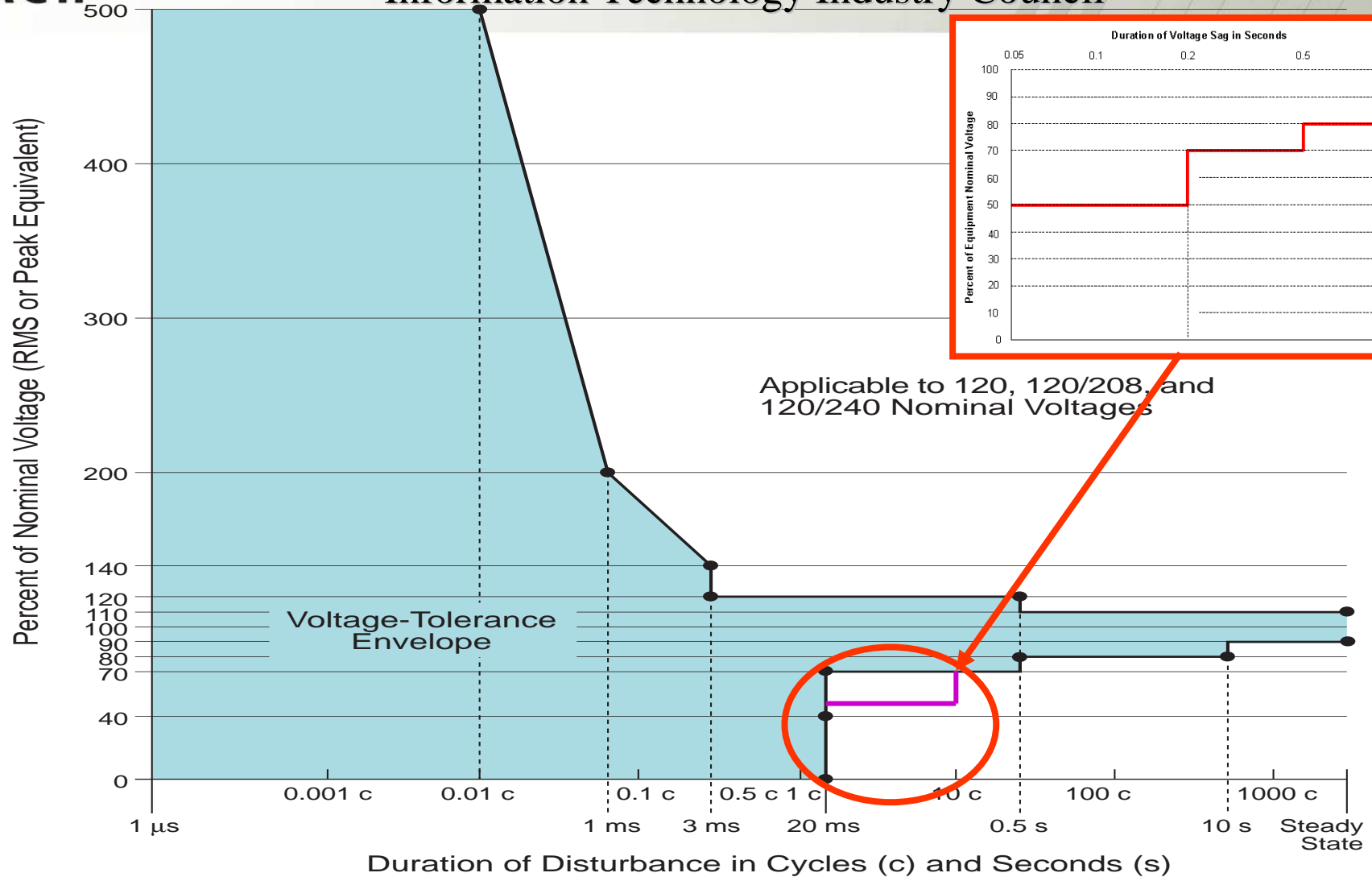




AGH

# 1996 ITIC Curve - 2

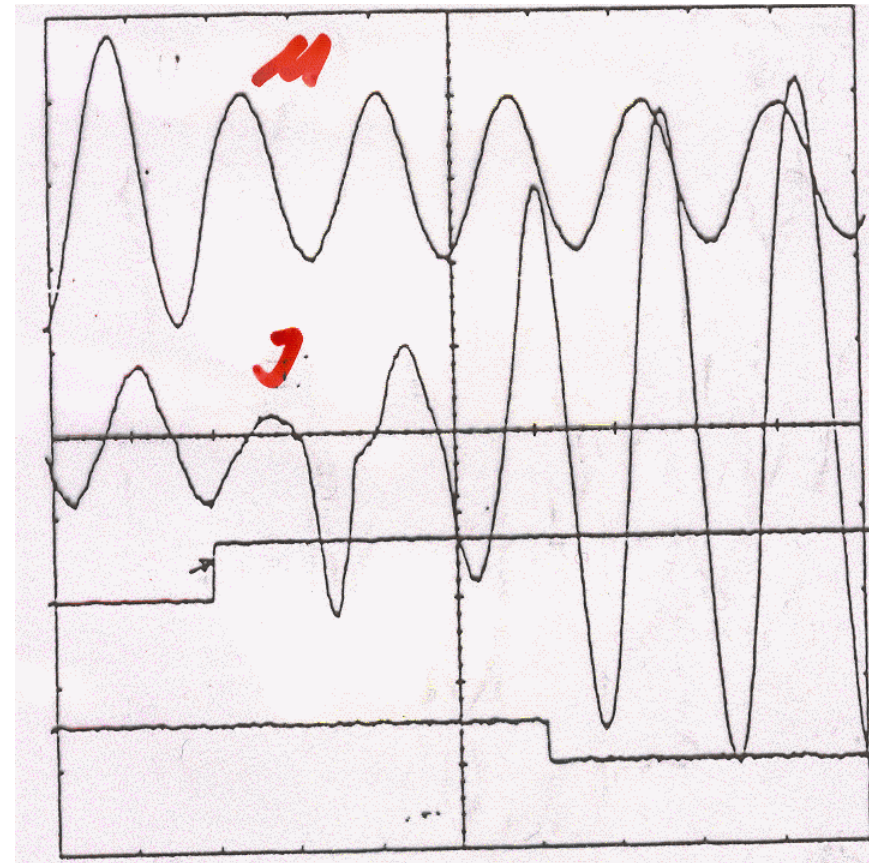
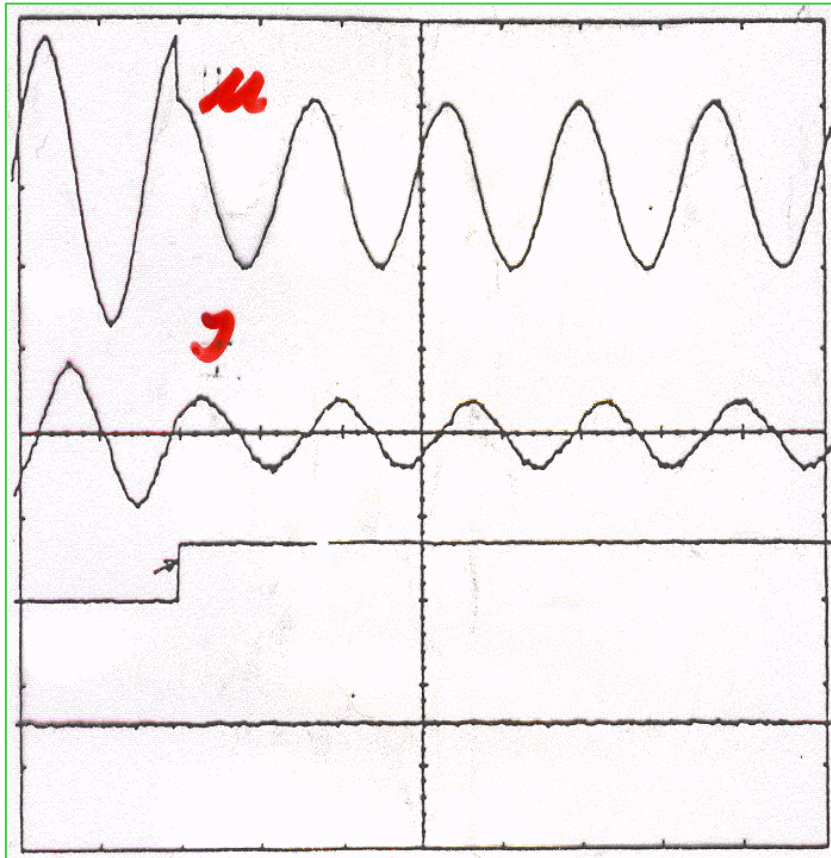
Information Technology Industry Council



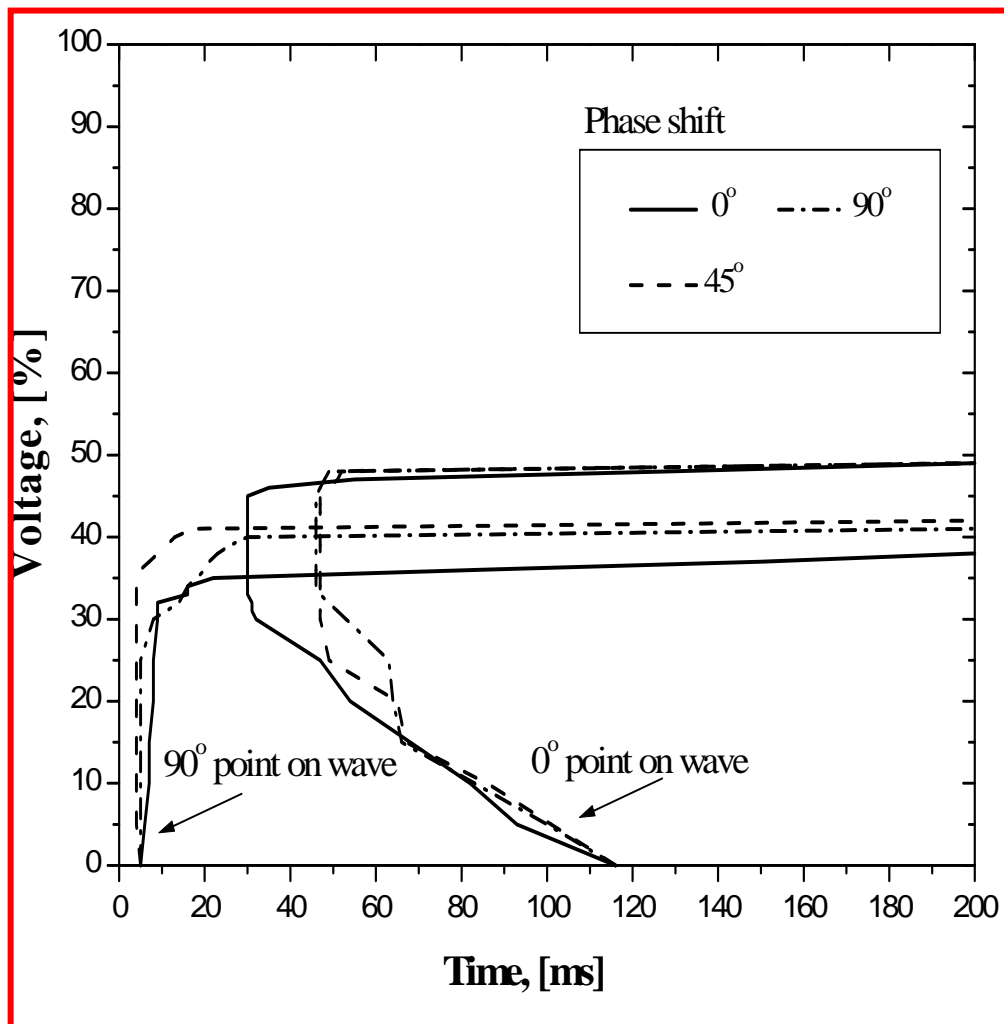


# SKUTKI ZAPADÓW NAPIĘCIA

- Styczniki i przekaźniki
- Silniki indukcyjne
- Maszyny synchroniczne
- Regulowane napędy elektryczne
  - system sterowania
  - część energoelektroniczna
  - utrata kontroli nad prędkością i momentem nie tolerowana przez wiele technologii.
- Lampy wyładowcze

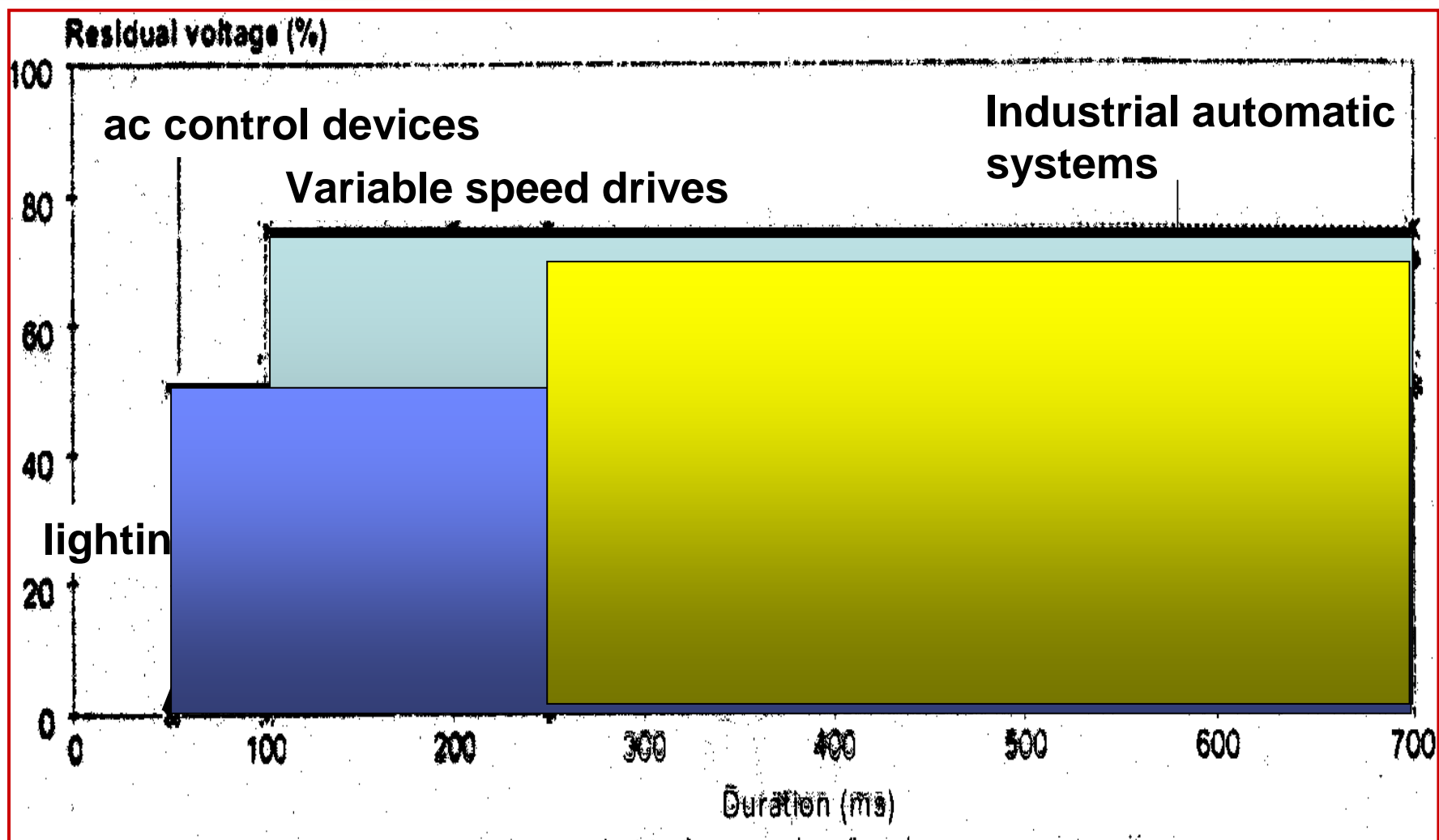


# Styczniki





# Zapady napięcia





# Sposoby redukcji skutków



**AGH**

# **SPOSOBY POPRAWY**

- redukcja liczby zwarć
- skrócenie czasu eliminacji zwarć
- usprawnienie lokalizacji uszkodzeń
- eliminacja zwarć za pomocą automatyki SPZ
- zmiana konfiguracji systemu zasilającego
- rezerwowanie zasilania
- stosowanie odpornego sprzętu
- stabilizatory napięcia
  - układy gromadzące energię (UPS, SMES, koła zamachowe ...)
  - układy bez możliwości gromadzenia energii



## **ZMNIEJSZENIE LICZBY ZWARCĆ**

**Zastępowanie linii napowietrznych liniami kablowymi (długi czas naprawy)**

**Stosowanie pokrytych przewodów w liniach napowietrznych**

**Rygorystyczne przestrzeganie okresów przycinania drzew**

**Stosowanie odgromników**

**Podwyższenie poziomu izolacji**

**Zwiększenie dbałości podczas napraw i przeglądów**



# **SKRÓCENIE CZASU ELIMINACJI ZWARĆ**

**Zmiana systemu zabezpieczeń, brak redukcji  
liczby zwarć**

**szybkie bezpieczniki ograniczające prąd  
zwarciovowy (mniej niż połowa okresu, głównie  
odbiorcy końcowi niskiego napięcia)**

**czas działania wyłącznika + czas podejmowania  
decyzji przez zabezpieczenie**



# **USPRAWNIENIE LOKALIZACJI USZKODZEŃ**

**Nowoczesne środki łączności, transportu i zdalnego sterowania łącznikami (telemechanika)**

**Wskaźniki przepływu prądu zwarciovego (średnie napięcie)**

**Systemy zdalnego monitorowania stanu sieci**



# **POPRAWA ODPORNOŚCI SPRZĘTU**



# POPRAWA ODPORNOŚCI SPRZĘTU

Zgromadzenie informacji o systemie

Uzyskanie informacji o czułości sprzętu

Okreslenie kosztów potencjalnego zakłócenia





# POPRAWA ODPORNOŚCI SPRZĘTU

**Dla układów jednofazowych stosowanie bardziej złożonych zasilaczy dc/dc tolerujących większe zmiany napięcia wejściowego**

**Zasilacze dc nie powinny być przeciążone**

**Wspólne sterowanie układami zasilaczy**

**Projektowanie sprzętu z wykorzystaniem odpornych elementów składowych np. przekaźników, styczników, układów rozruchowych; unikanie stosowania w odpowiedzialnych układach styczników powszechnego zastosowania**

**Unikanie stosowania sprzętu o niedostosowanym napięciu zasilającym**

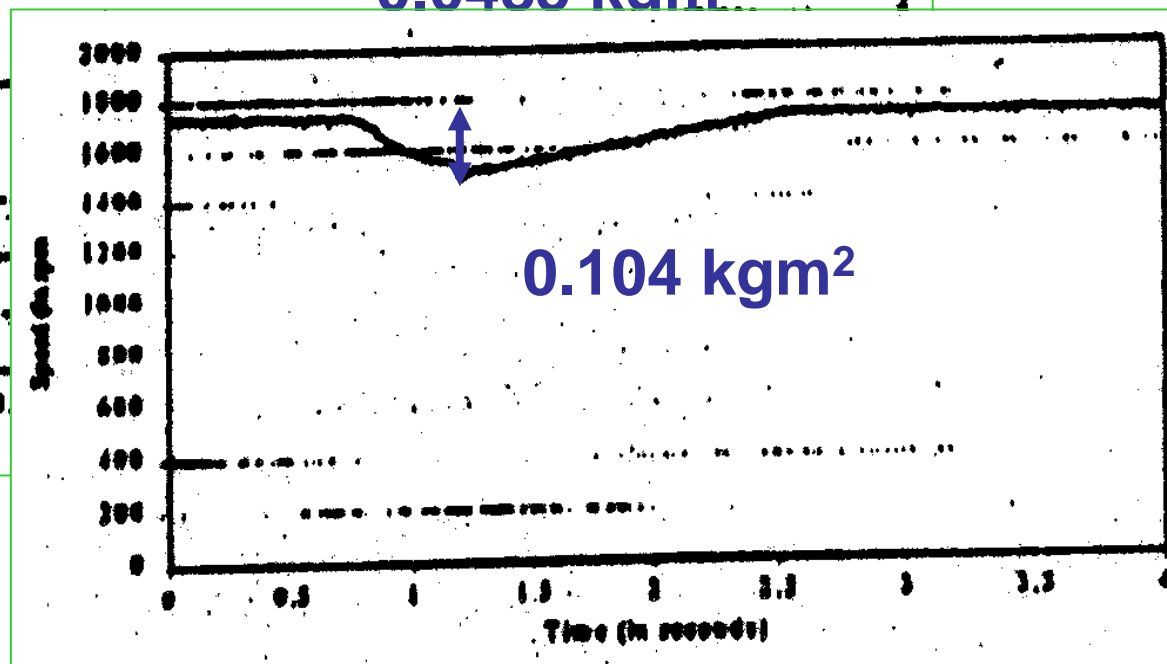
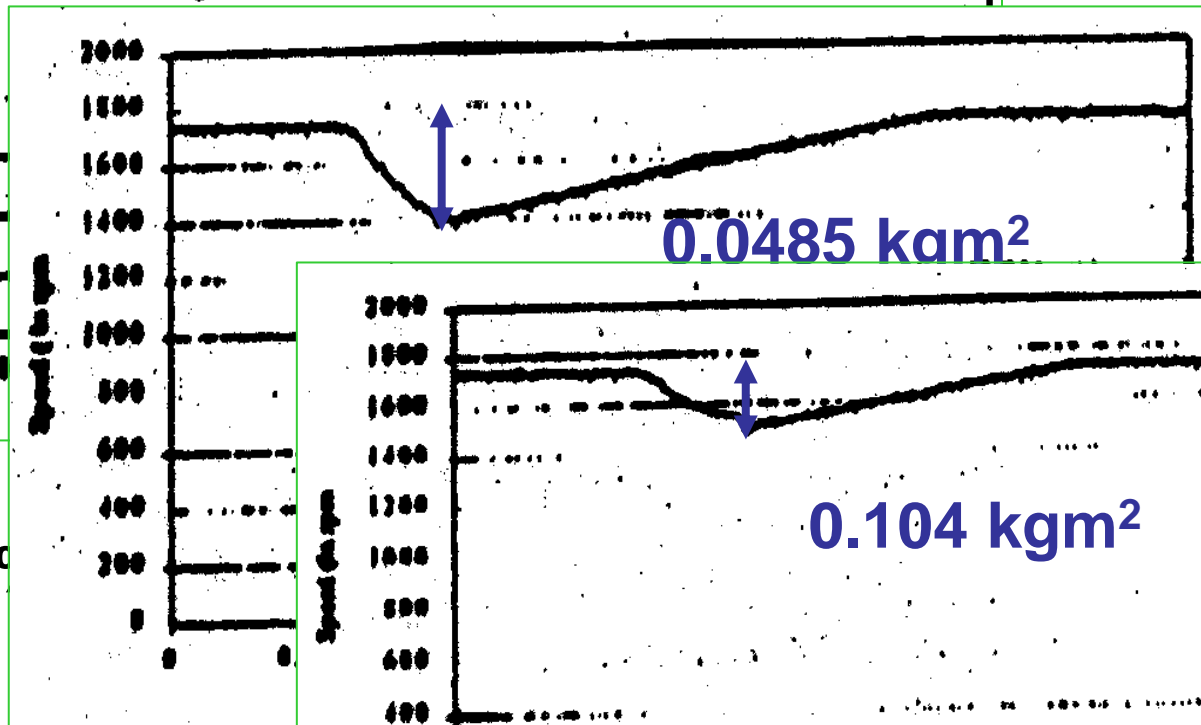
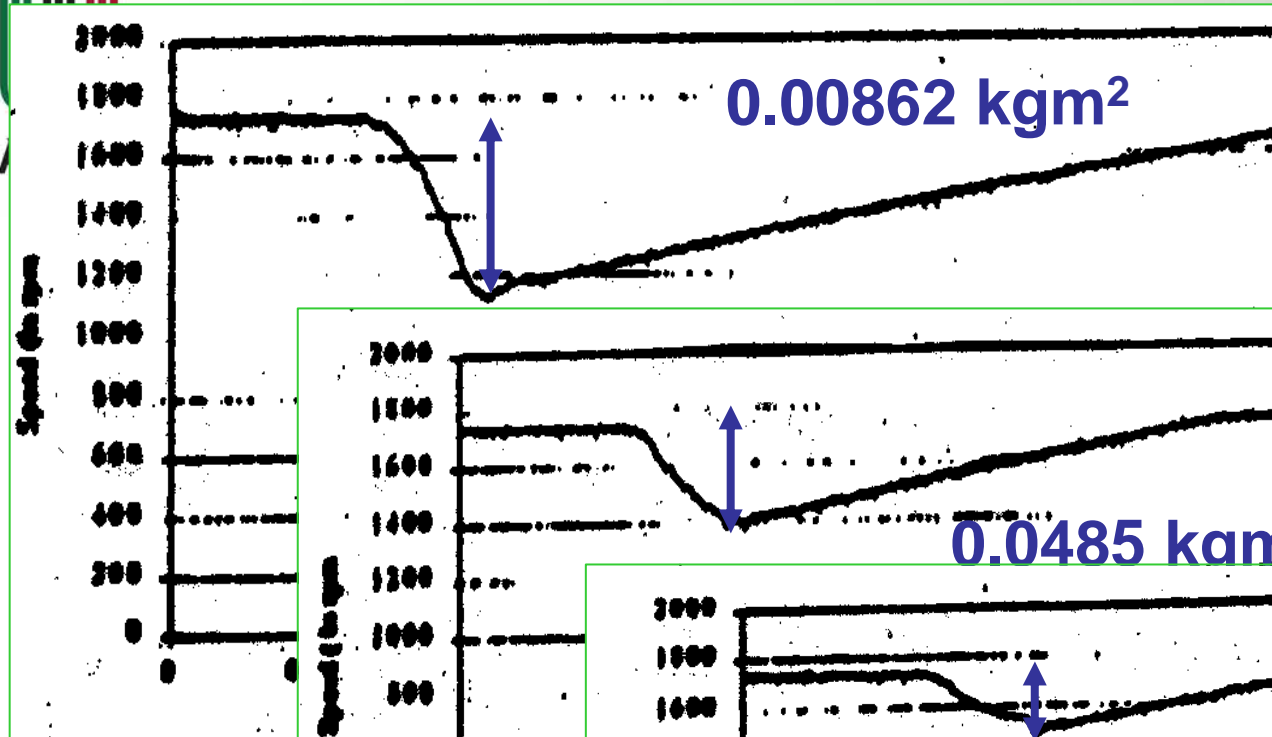


# POPRAWA ODPORNOŚCI SPRZĘTU

**Wyłączniki i bezpieczniki powinny być wymiarowane na większe prądy łączeniowe**

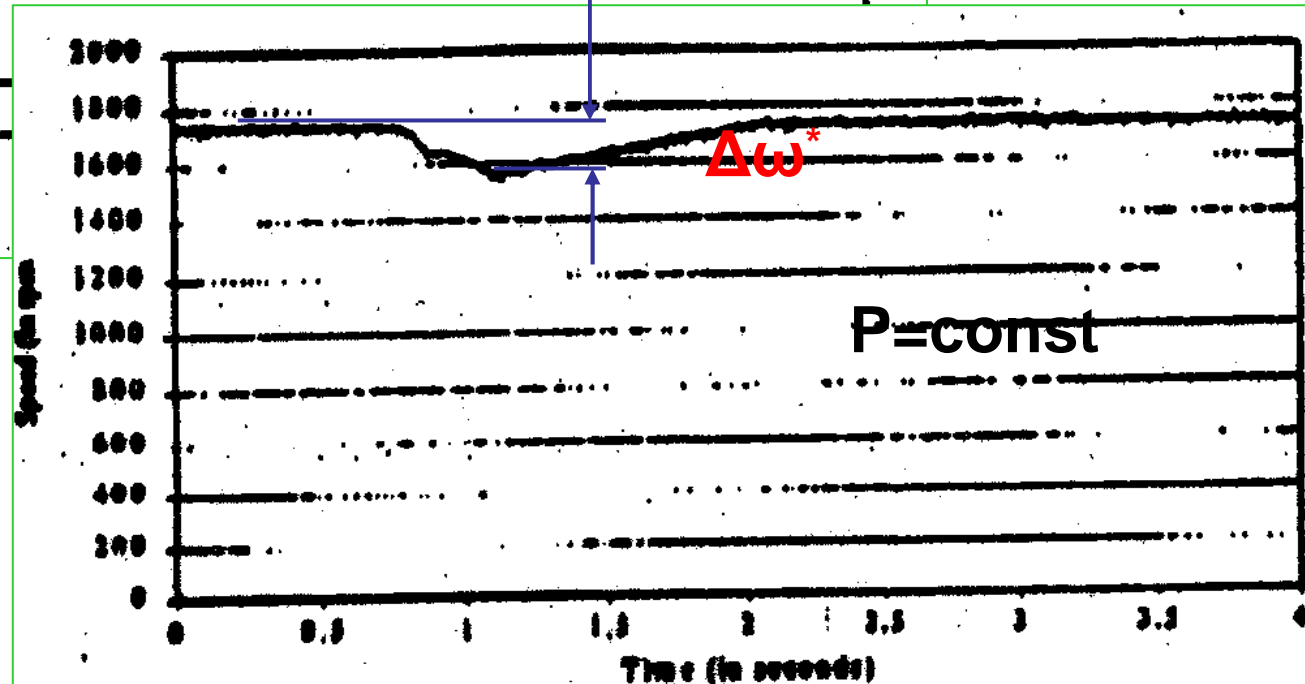
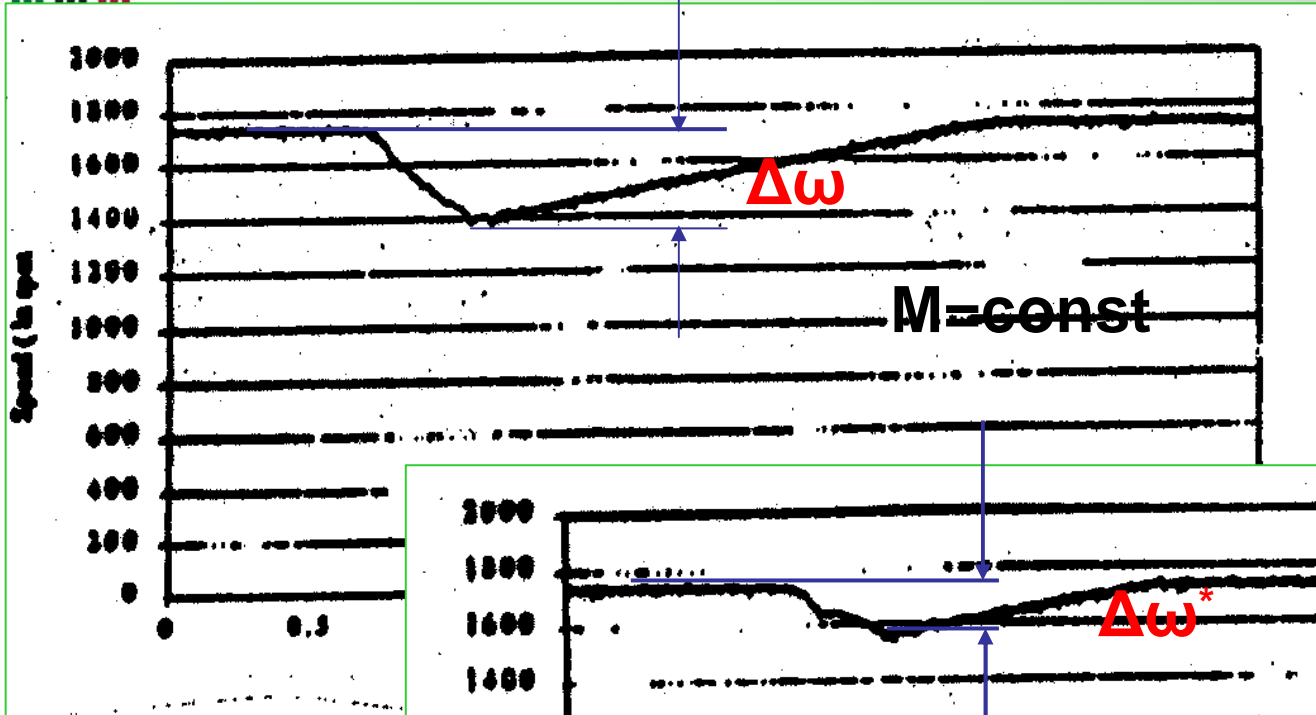
**Unikanie stosowania pamięci „ulotnych”**

**Przewidzieć na etapie projektowania możliwość zmiany parametrów procesu technologicznego na skutek zapadu napięcia**



Zapad: 30  
167 ms,  
M=const

# Zapad: 30 % i 167 ms





## **Podwyższenie odporności regulowanego napędu na zapady napięcia**

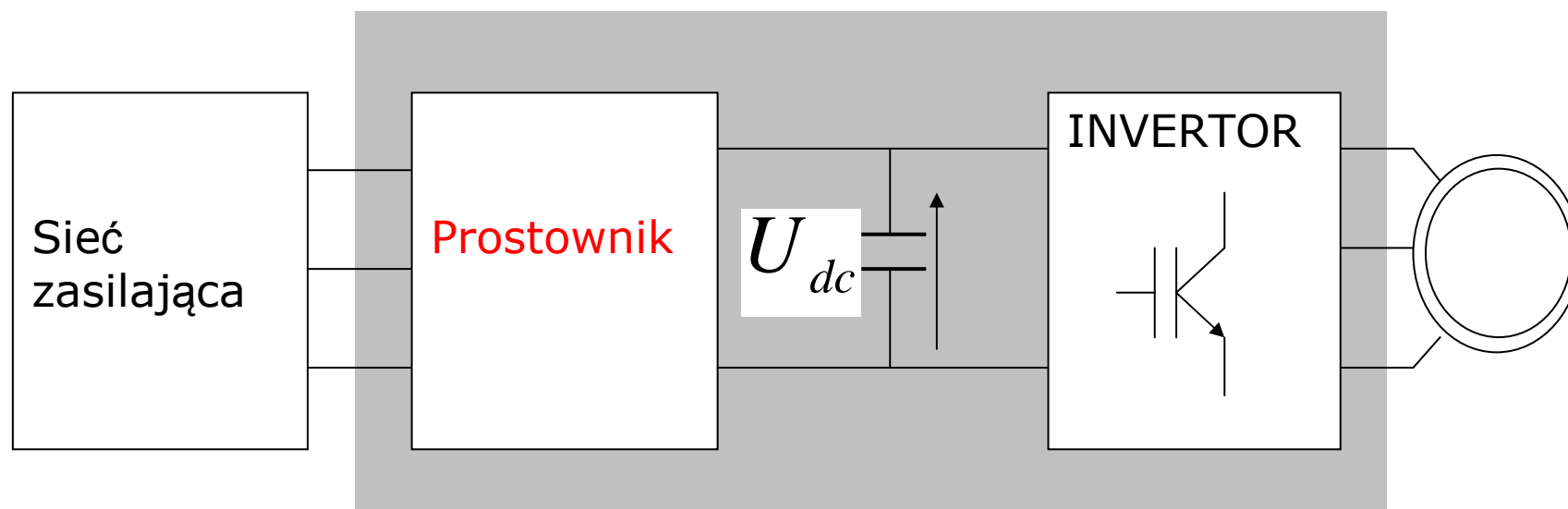
**Zmiana trybu pracy napędu i modyfikacja układu sterowania;**

**Modyfikacja topologii układu energoelektronicznego;**

**Alternatywne zasilanie;**

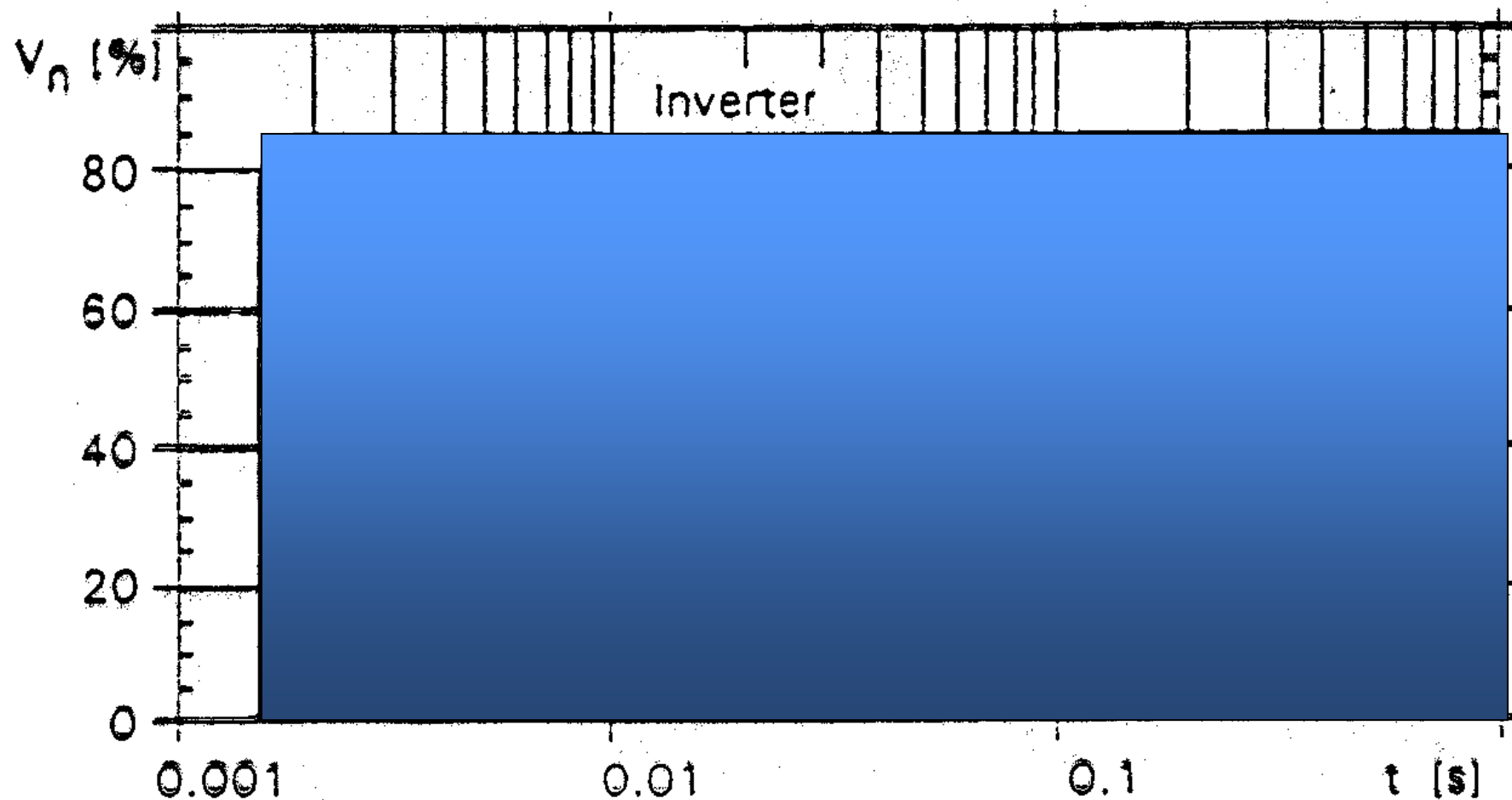
**Instalacja układów kompensujących.**

# Podwyższenie odporności regulowanego napędu na zapady napięcia



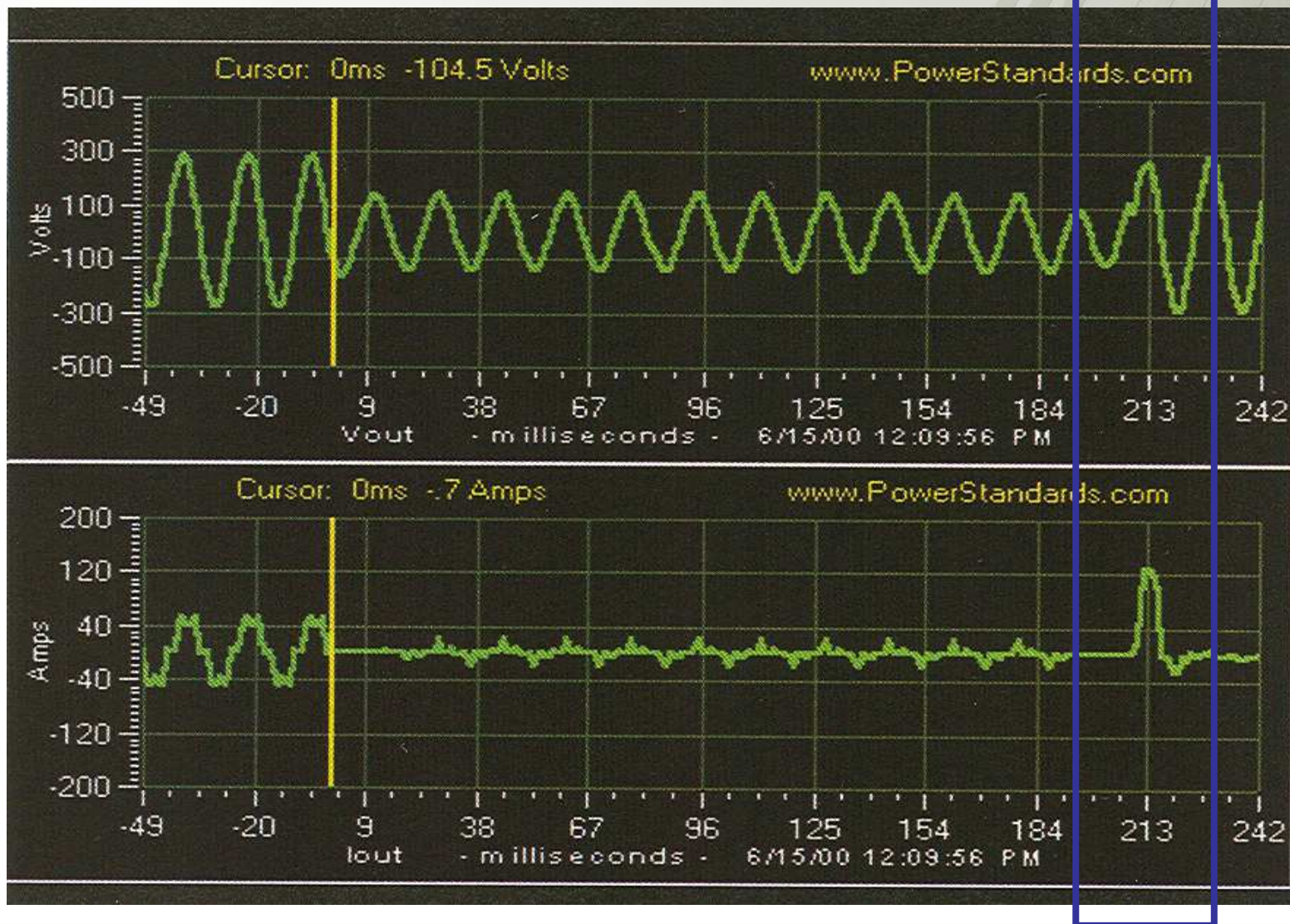
**Schemat ideowy regulowanego napędu VSI**

# Podwyższenie odporności regulowanego napędu na zapady napięcia





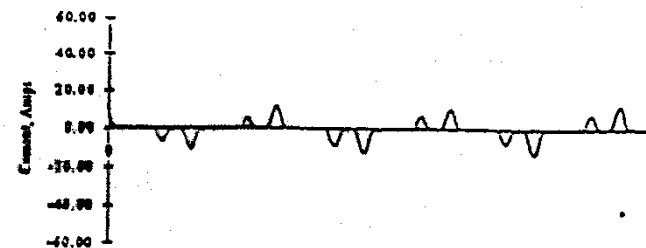
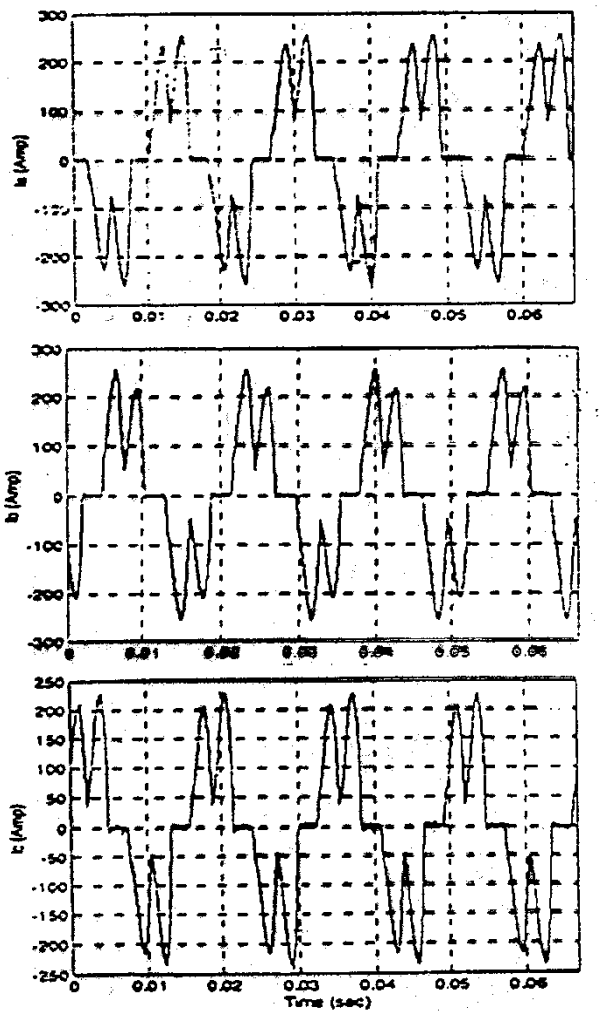
# Podwyższenie odporności regulowanego napędu na zapady napięcia



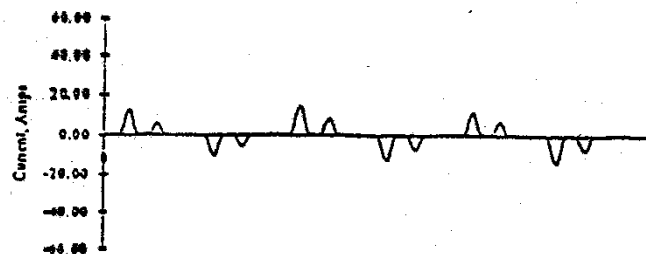




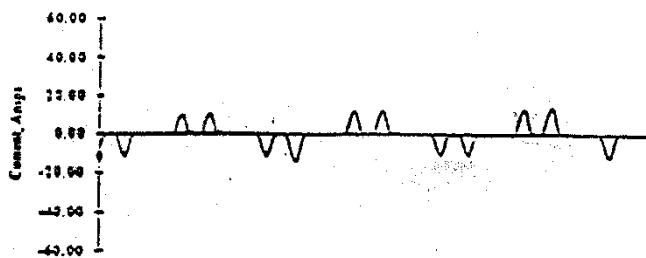
# Podwyższenie odporności regulowanego napędu na zapady napięcia



Phase B Current

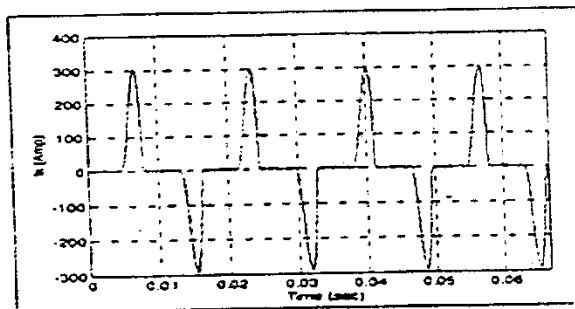


Phase C Current

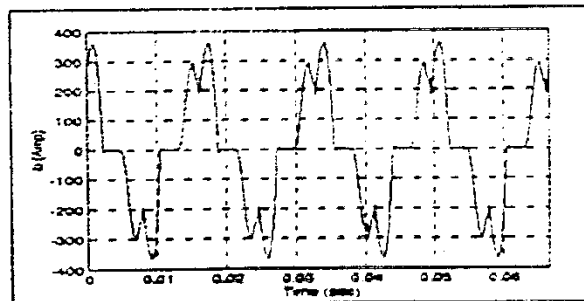




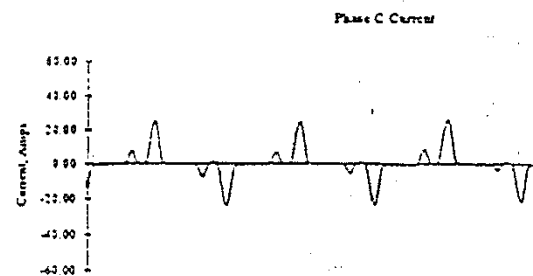
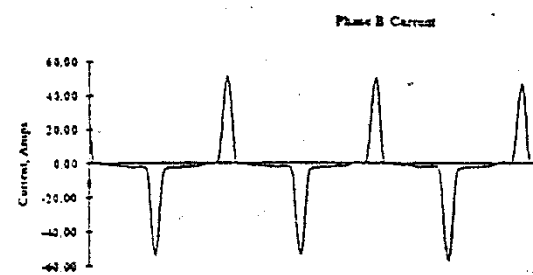
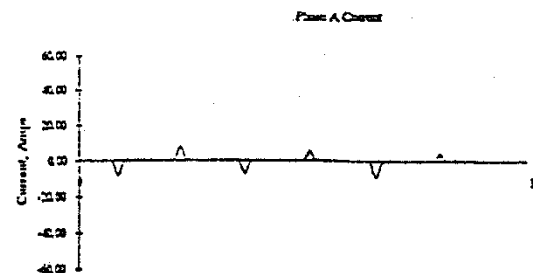
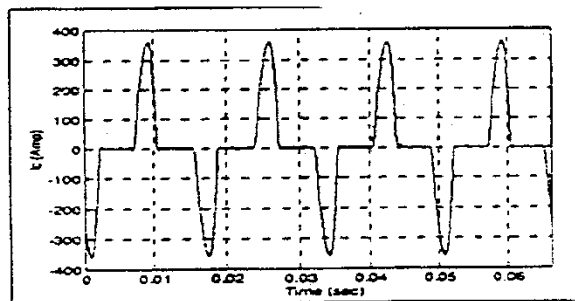
# Podwyższenie odporności regulowanego napędu na zapady napięcia



a) Phase A current



b) Phase B current





# Podwyższenie odporności regulowanego napędu na zapady napięcia

## 1 METODA

Ręczny lub automatyczny ponowny rozruch napędu po określonym czasie zwłoki podczas którego prędkość silnika maleje do zera.

## 2 METODA

Szybkie zahamowanie napędu i konwencjonalny ponowny rozruch.

## 3 METODA

Automatyczny rozruch silnika po upływie określonego czasu (zależnego od stałej czasowej wirnika, typowo kilkaset ms).



# **Podwyższenie odporności regulowanego napędu na zapady napięcia**

## **4 METODA**

**Synchronizacja napięciowa inwertora.**

## **5 METODA**

**Modyfikacja sterowania z wykorzystaniem energii kinetycznej wirujących mas.**

## **6 METODA**

**Redukcja prędkości/momentu obciążenia.**



# Podwyższenie odporności regulowanego napędu na zapady napięcia

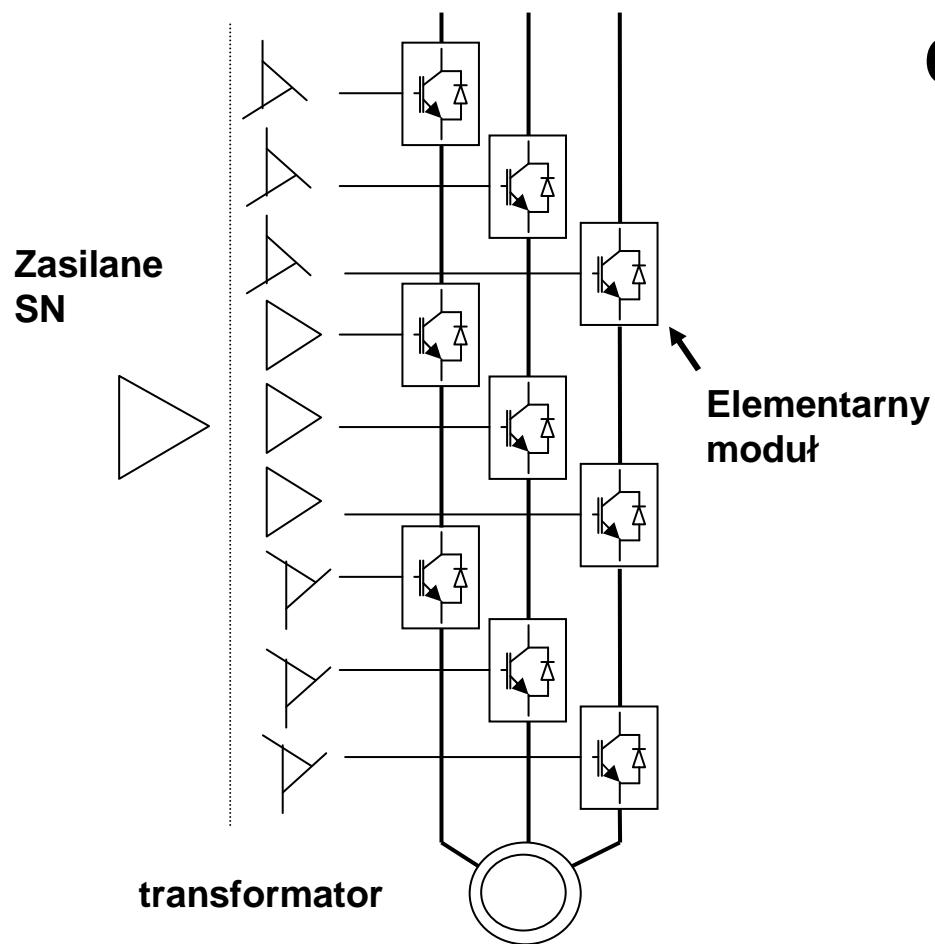
## 7 METODA

Przewymiarowanie napięciowe przekształtników.

## 8 METODA

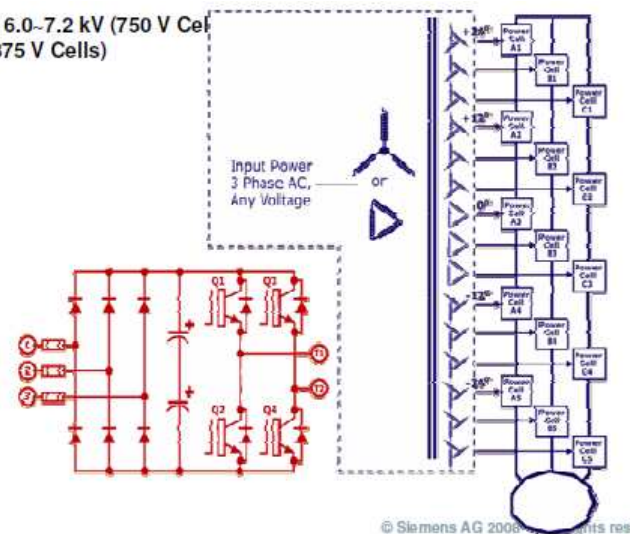
Zwiększenie pojemności kondensatorów w obwodzie DC.

# Podwyższenie odporności regulowanego napędu na zapady napięcia



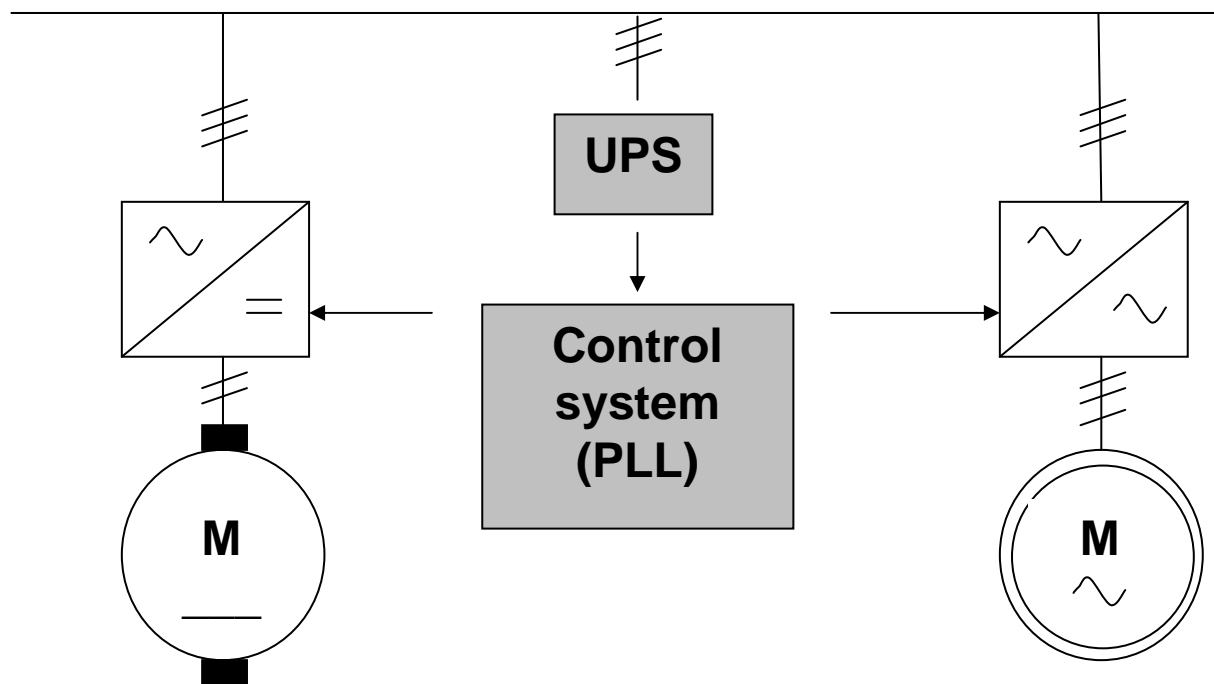
## CI-ML-VSI

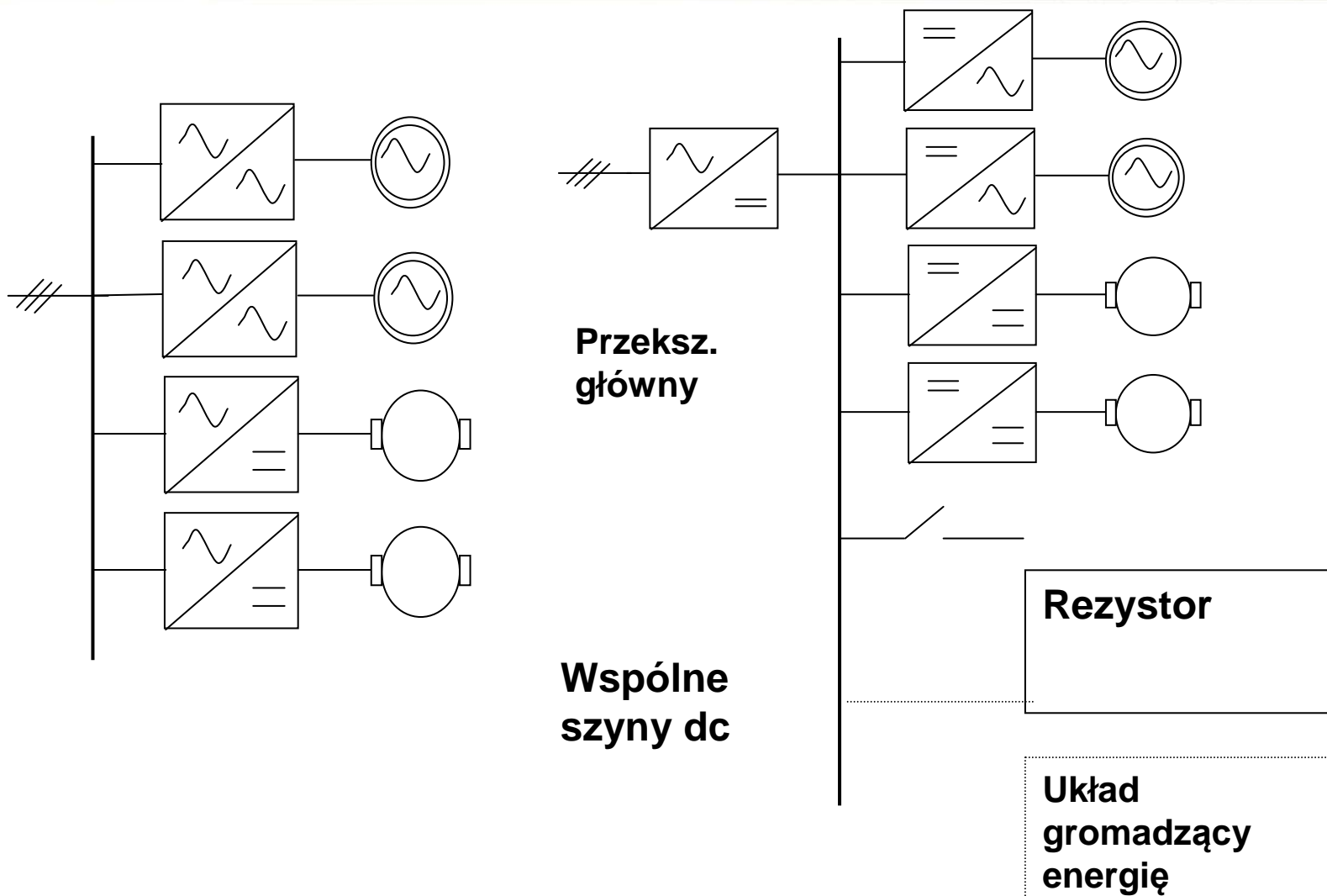
Przełącznik 6.0–7.2 kV (750 V Cells)  
lub 11 kV (1375 V Cells)



## 9 METODA

### Poprawa warunków zasilania układu regulacji

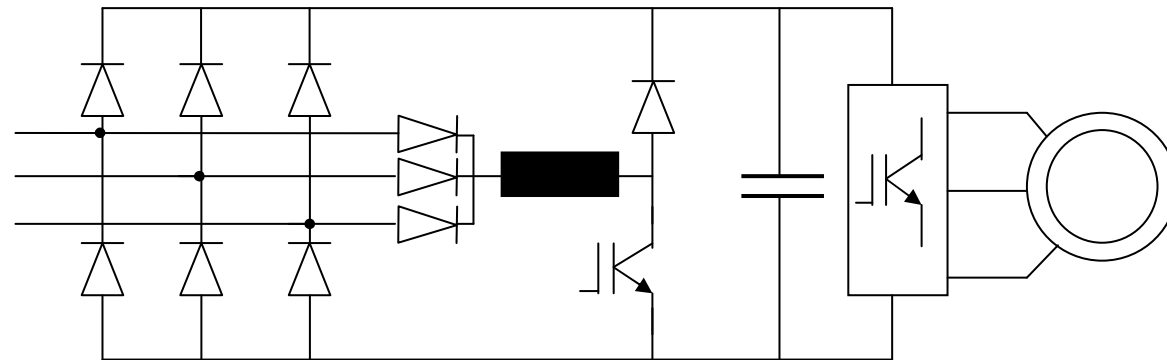
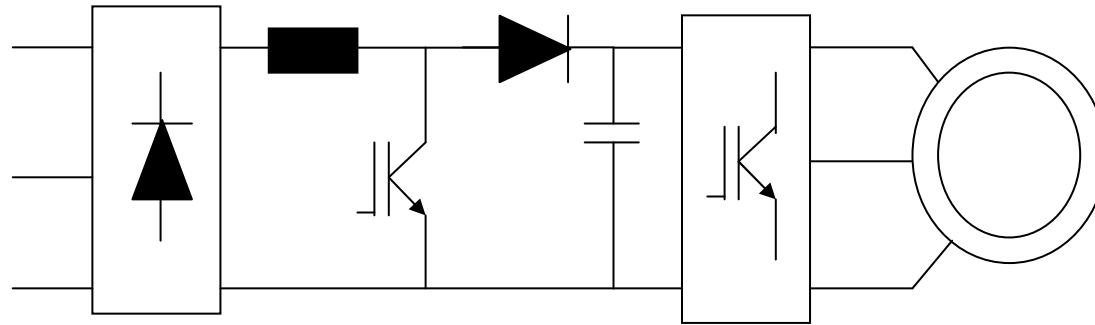




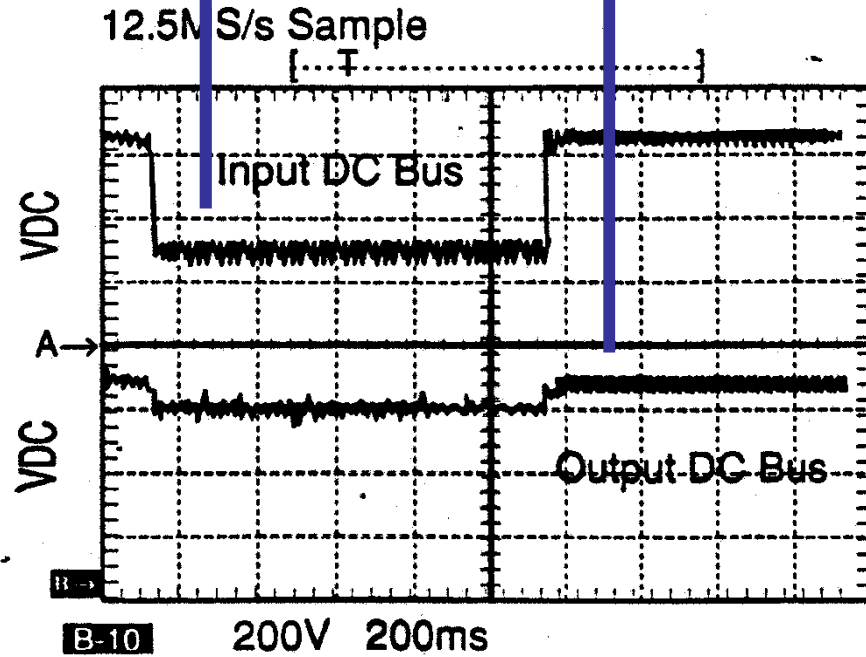
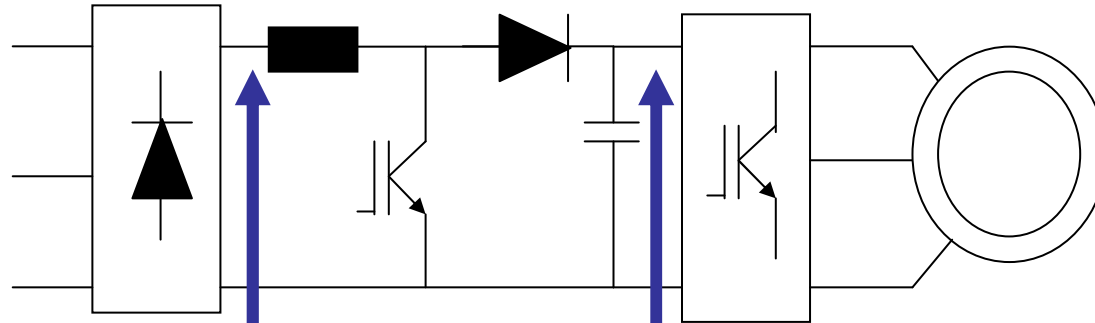


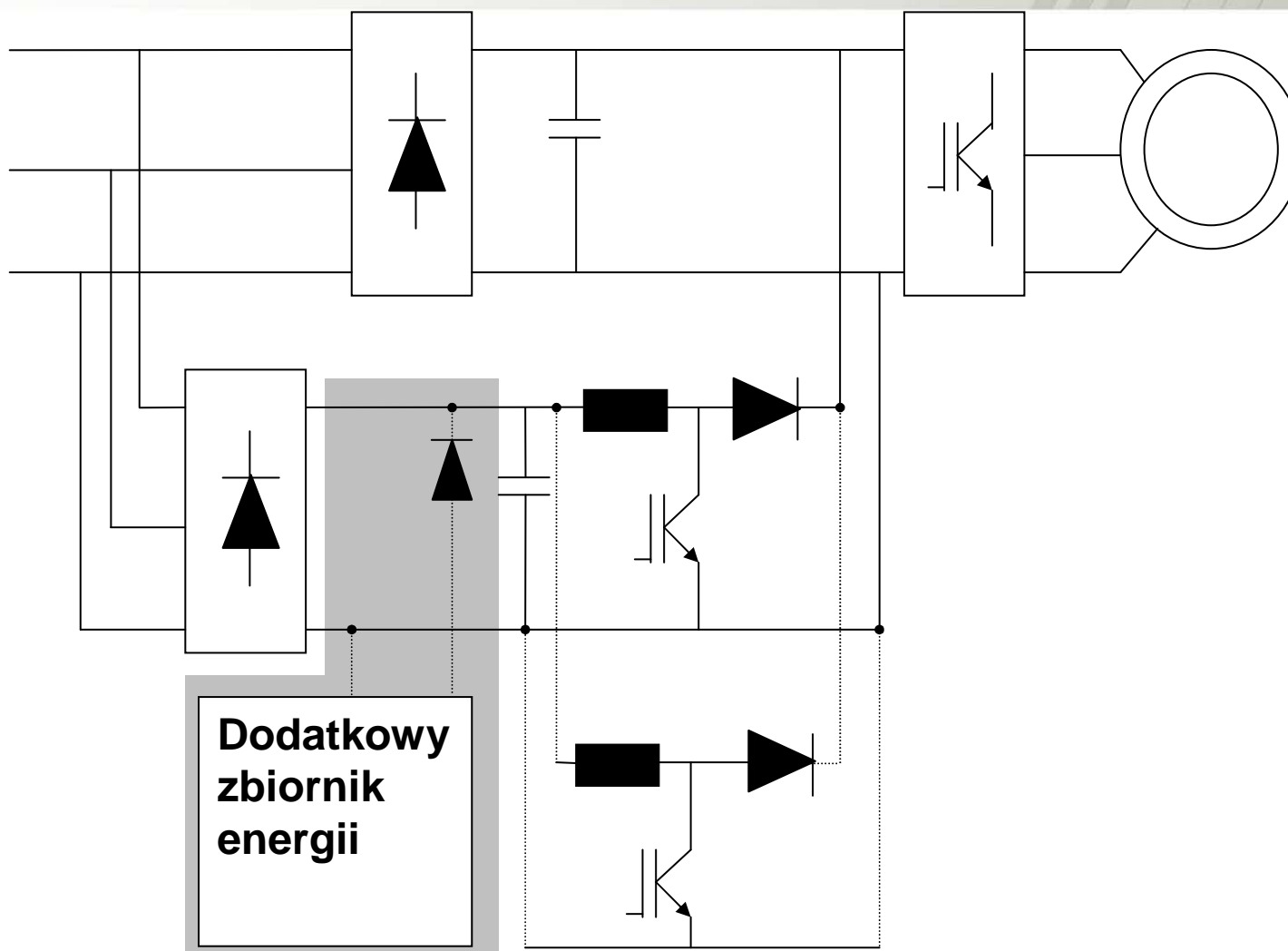
# 11 METODA

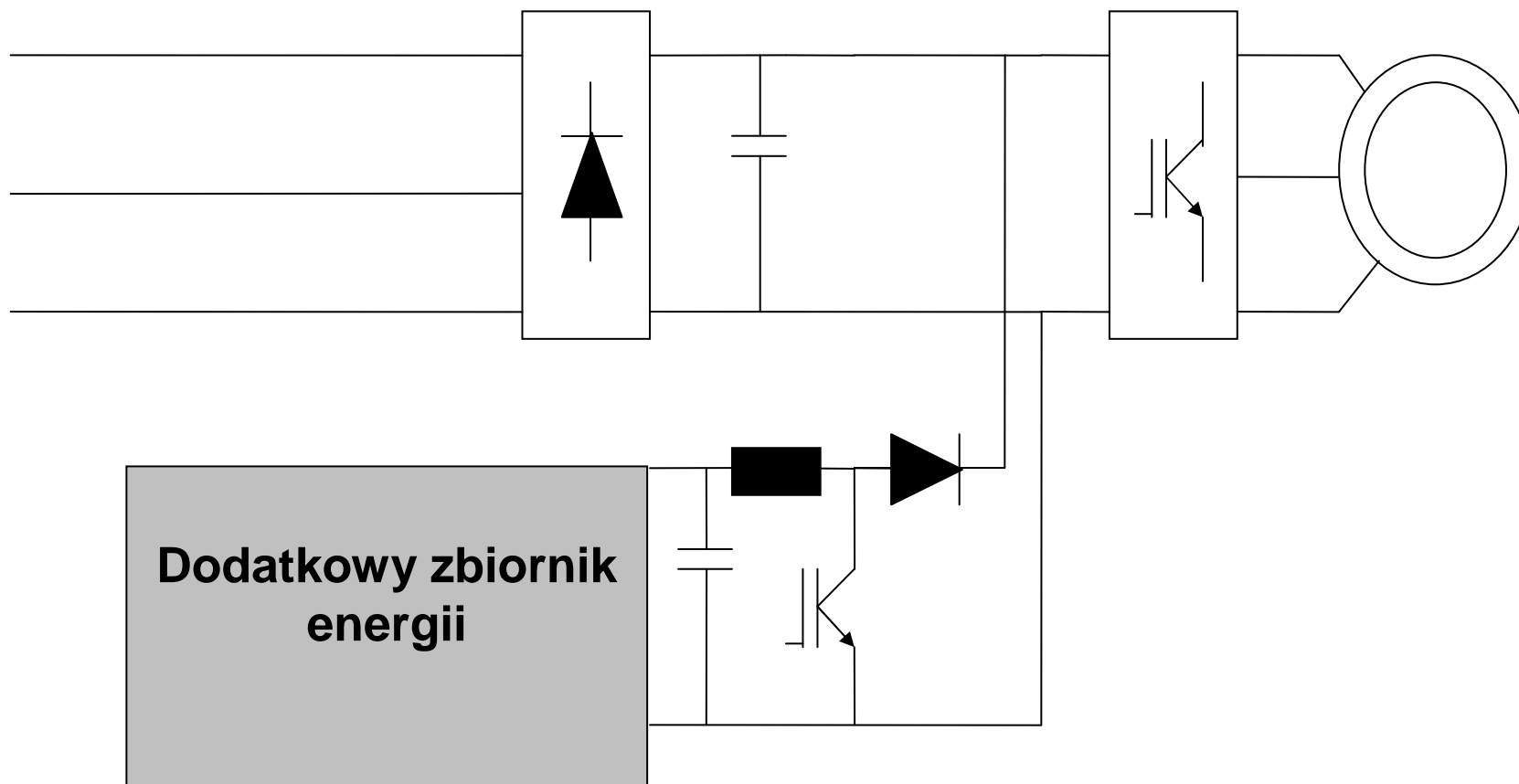
## Stabilizator

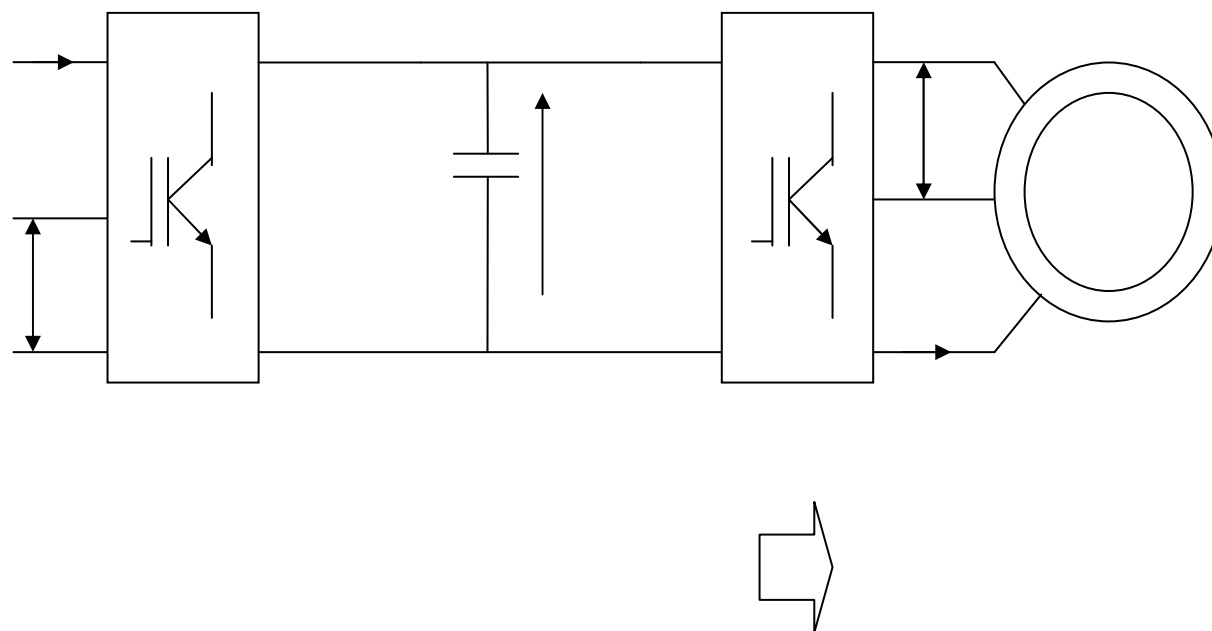


# 11 METODA









**Aktywny przekształtnik wyjściowy**



# **POMIAR ZAPADÓW NAPIĘCIA**



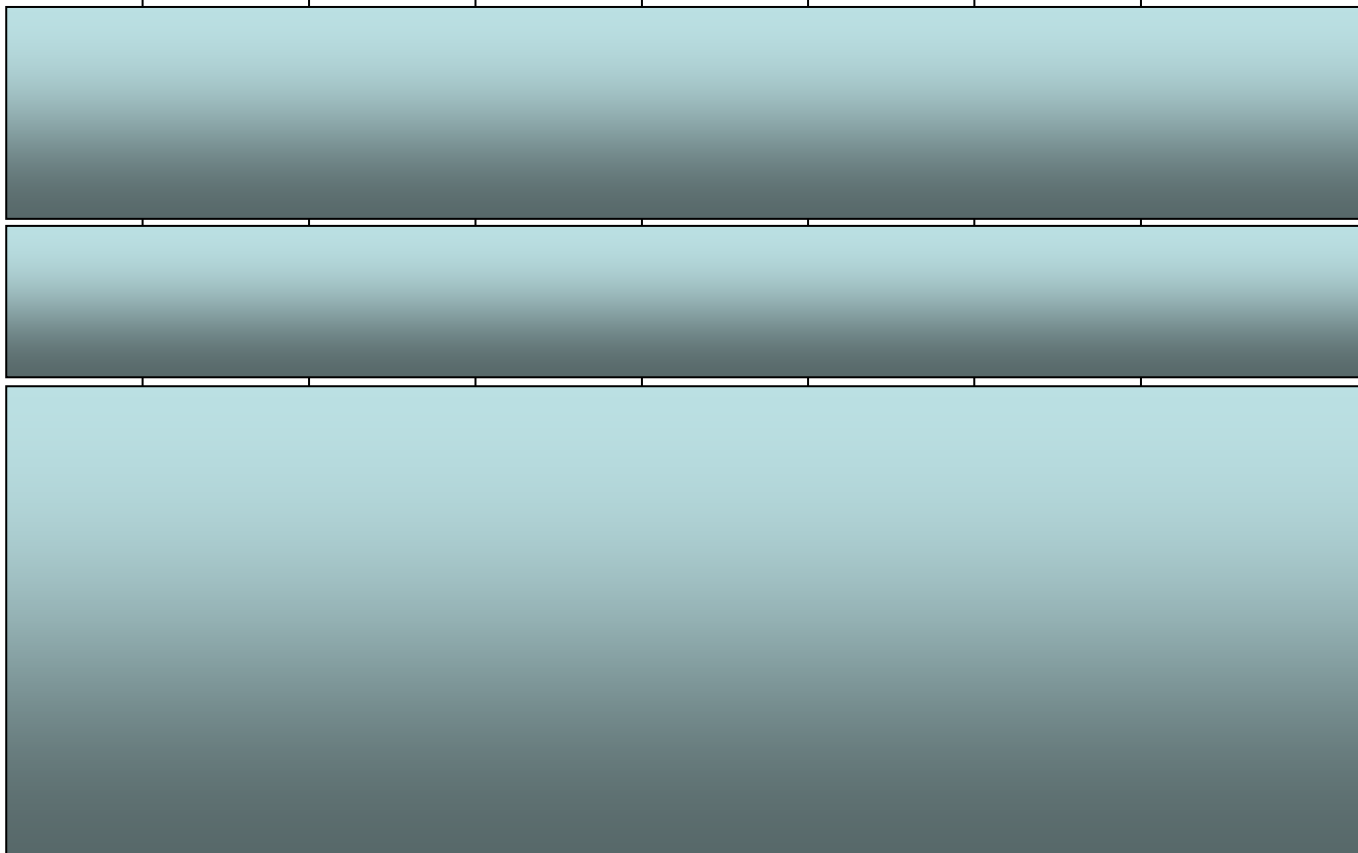
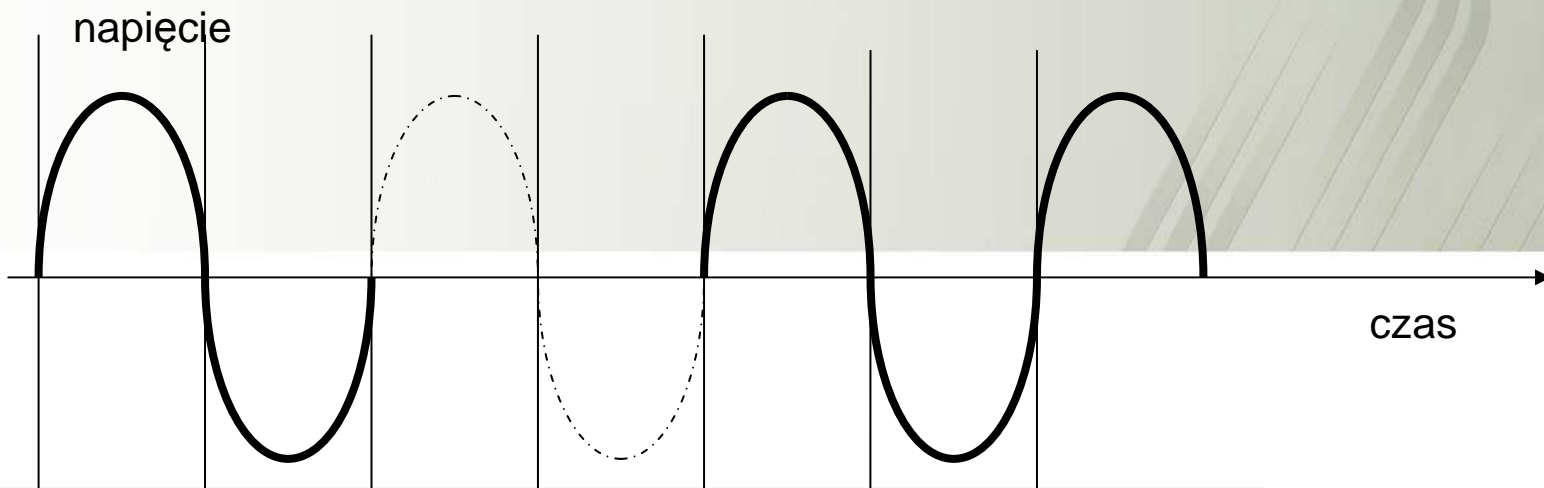
$$U_{rms(1/2)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N u^2}{N}}$$

$$U_{rms-200-ms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N u^2}{N}}$$

$$U_{rms-3-s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} U_{rms-200-ms}^2}{15}}$$

$$U_{rms-10-min} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{200} U_{rms-3-s}^2}{200}}$$

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







**System Average RMS (Variation)  
Frequency Index<sub>Voltage</sub> (SARFI<sub>X</sub>)  
0.5 cycle-1 min.**

$$SARFI_X = \frac{\sum N_i}{N_T}$$

**X = 90, 80, 70, 50, 10 %**

**System Momentary RMS (Variation) Frequency  
Index<sub>Voltage</sub> (SMARFI<sub>X</sub>)**

**30 okresów-3 s**

**System Temporary Average RMS (Variation)  
Frequency Index<sub>Voltage</sub> (STARFI<sub>X</sub>)**

**3-60 s**

SARFI Index	0-0.2 seconds	0.2-0.5 seconds	0.5-3 seconds	3-60 seconds	TOTAL
SARFI(90)					
SARFI(80)					
SARFI(70)					
SARFI(50)					
SARFI(10) - Interruptions					



# POMIAR ZAPADÓW NAPIĘCIA

retained voltage U	Duration t			
	$20 \leq t < 150$ (ms)	$150 \leq t < 600$ (ms)	$0.6 \leq t < 3$ (s)	
$90 > U \geq 85$	Y			
$85 > U \geq 80$				
$80 > U \geq 70$	S		Z1	
$70 > U \geq 60$			X1	Z2
$60 > U \geq 40$			X2	
$40 > U \geq 0$	T			

NRS-048-2:2003  
IEEE P1564 draft5

Południowa Afryka

## Energia zapadu napięcia

$$E_{VS} = \int_0^T \left[ 1 - \left\{ \frac{U(t)}{U_{nom}} \right\}^2 \right] dt$$

$$E_{VS} = \left[ 1 - \left( \frac{U}{U_{nom}} \right)^2 \right] T$$

$$SEI = \sum_{i=1}^n E_{VS-i}$$

$$E_{VS} = (E_{VS-A} + E_{VS-B} + E_{VS-C})$$



AGH

## Indeksy oparte na zmianach napięcia

### Strata napięcia

$$L_U = \int (1 - U(t)) dt$$

$$S = (1 - R) T$$

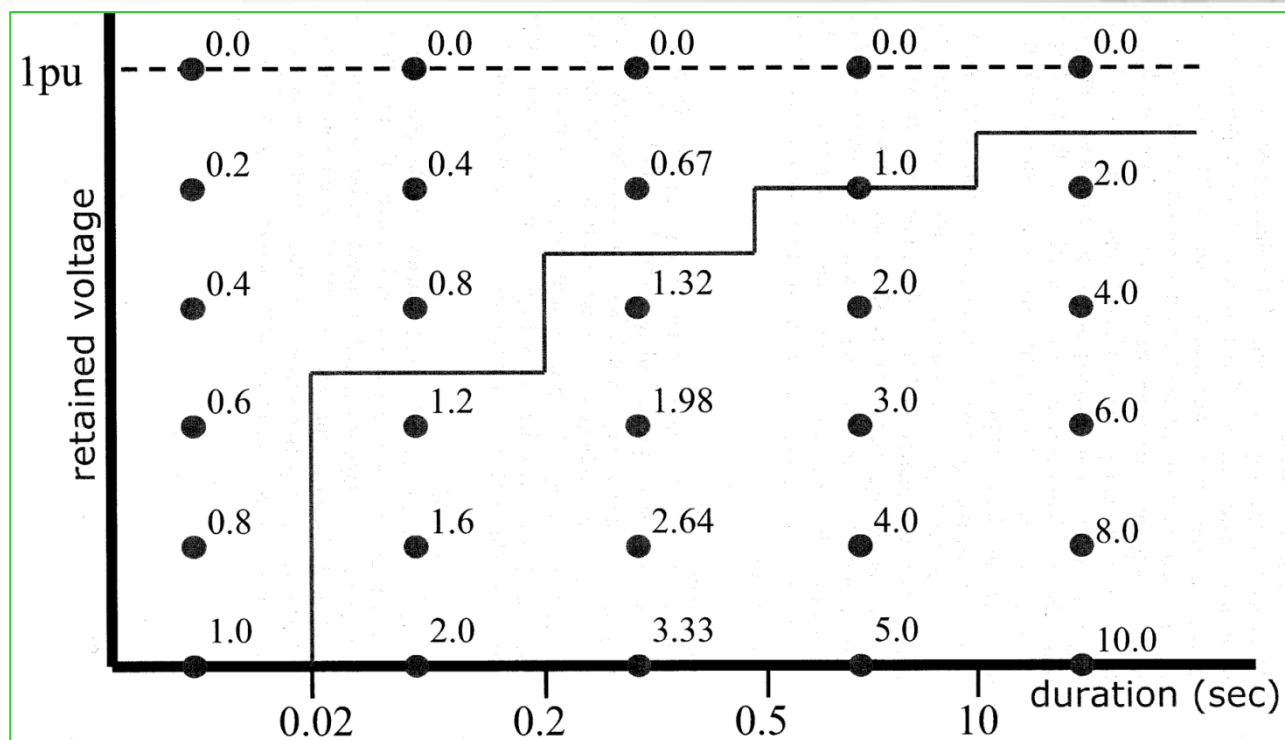
### Wskaźnik odniesiony do charakterystyki referencyjnej

$$S_e = \frac{1 - U}{1 - U_{ref}(d)}$$

**$U$** : wartość resztkowa napięcia podczas zapadu o czasie trwania  $d$ ,

**$U_{ref}(d)$** : wartość zapadu na charakterystyce referencyjnej dla czasu trwania zaburzenia  $d$

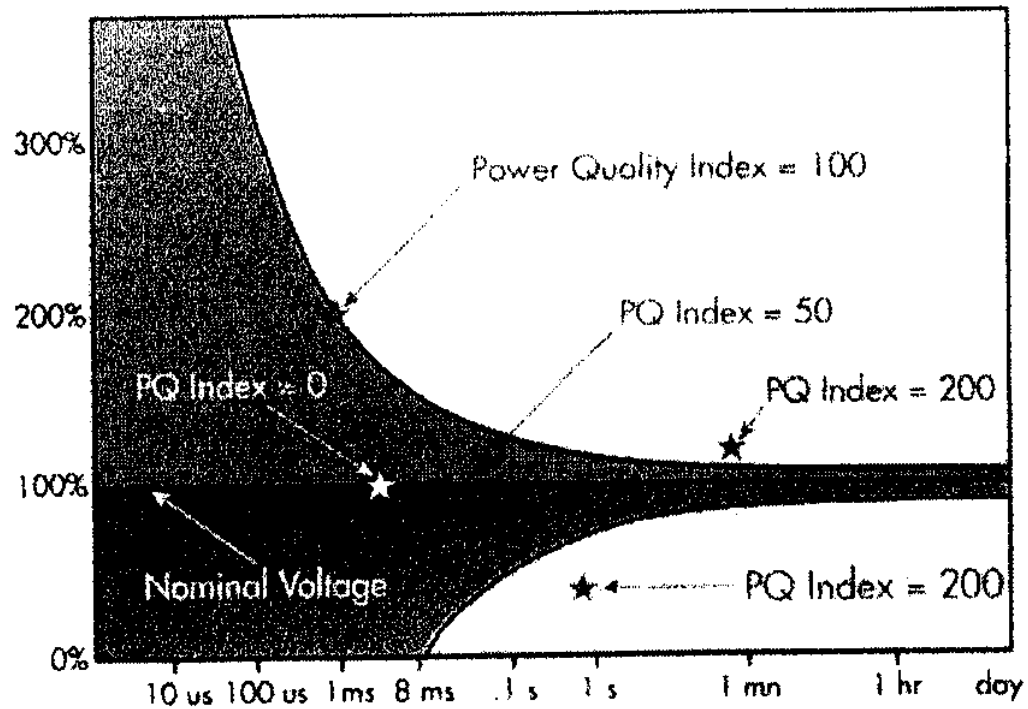
# POMIAR ZAPADÓW NAPIĘCIA



Indeks „ostrości” zapadu odniesiony do charakterystyki referencyjnej (linia ciągła) dla zaburzeń o różnym czasie trwania i różnym napięciu resztkowym

## RPM Power Quality index approach

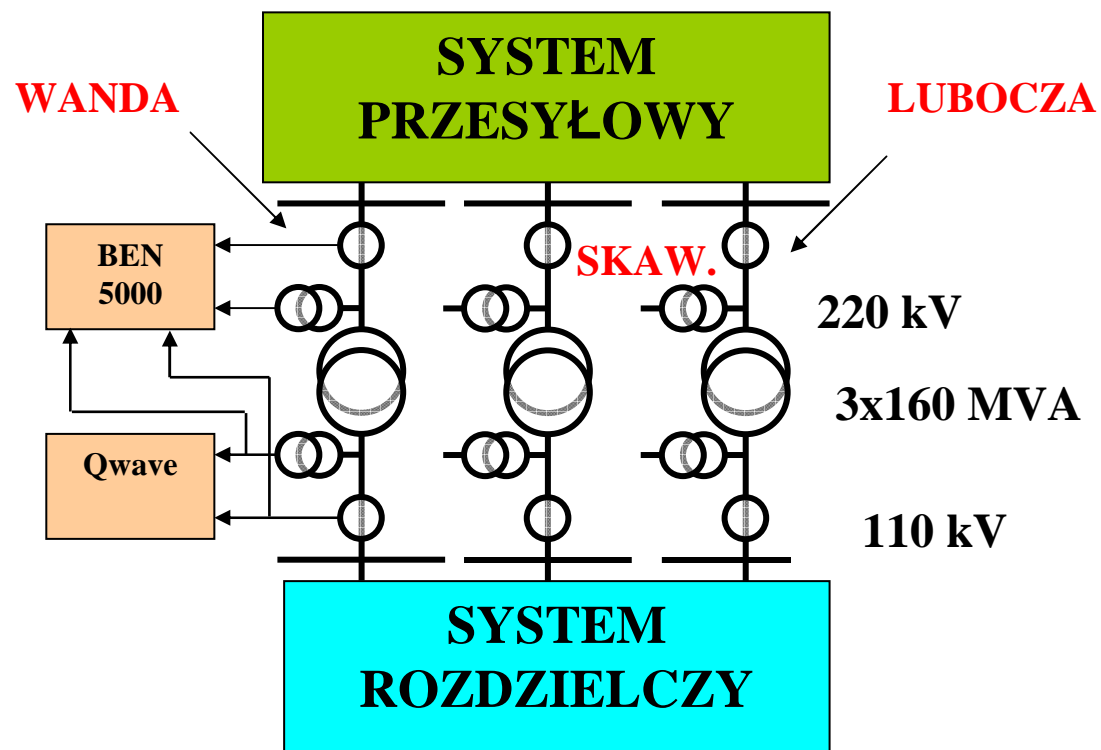
$$PQ\ Index = \left( \frac{100\% - V}{100\% - V_{CBEMA}(T)} \right) \times 100\%$$





# KONTRAKT

# KONTRAKT

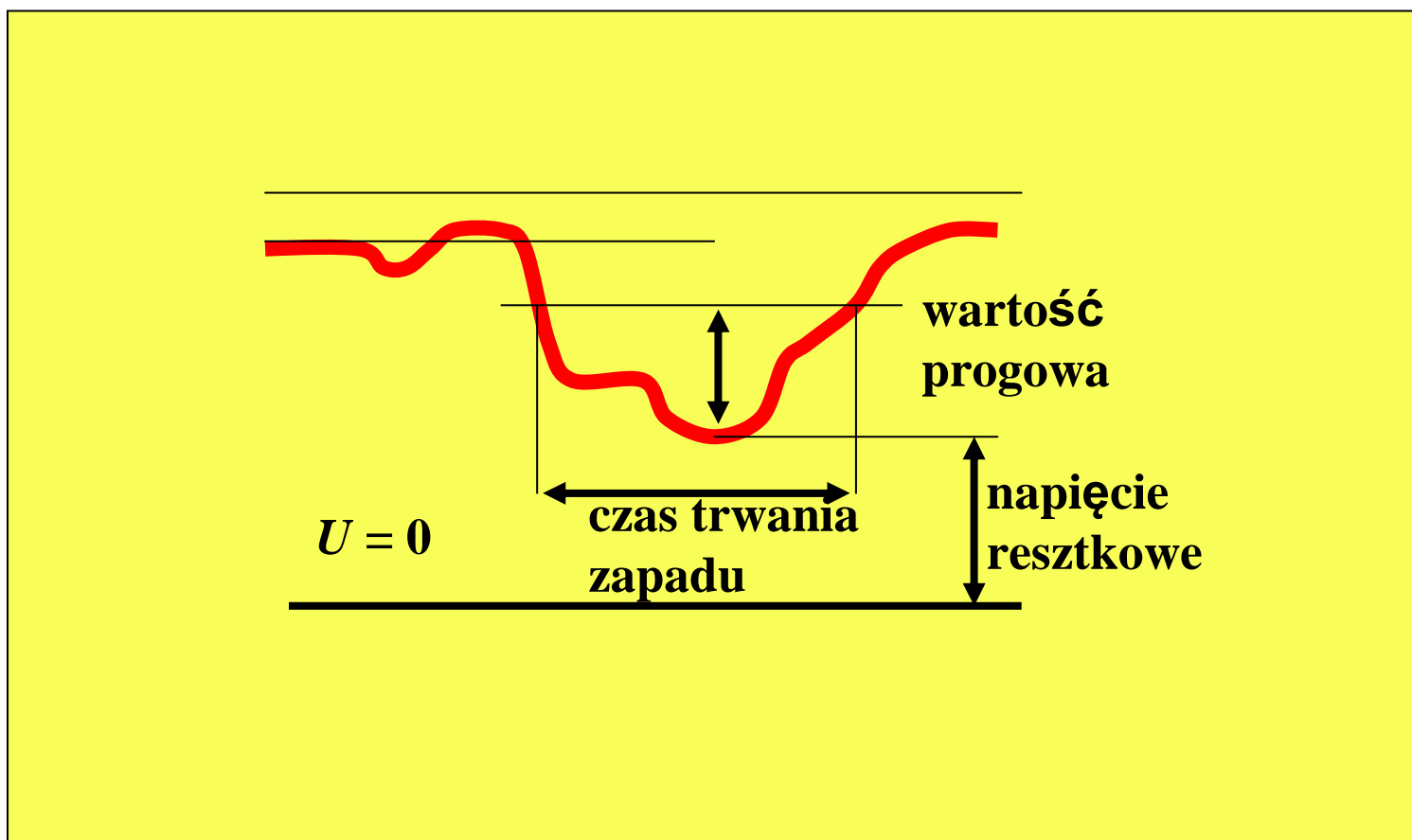


**LUBOCZA** – odbiorcy przemysłowi i komunalni,  
**WANDA** - odbiorcy przemysłowi,  
**SKAWINA** – w pobliżu elektrociepłowni



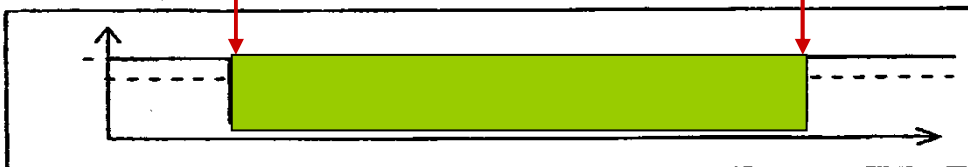
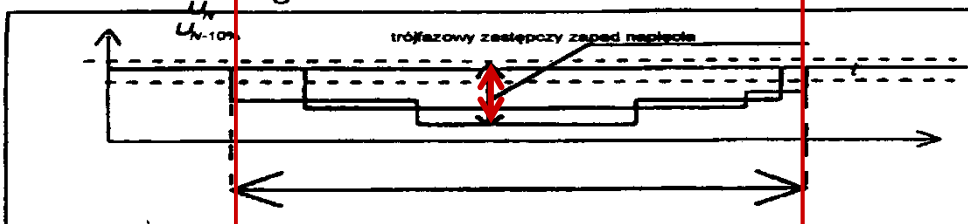
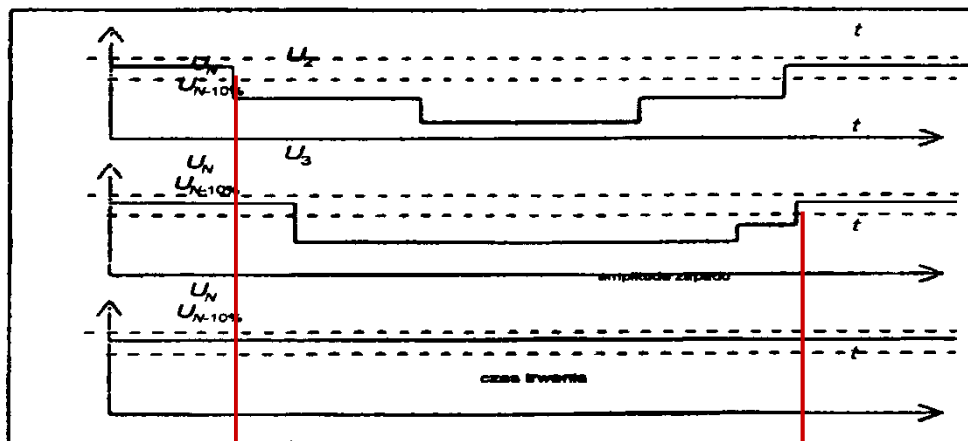
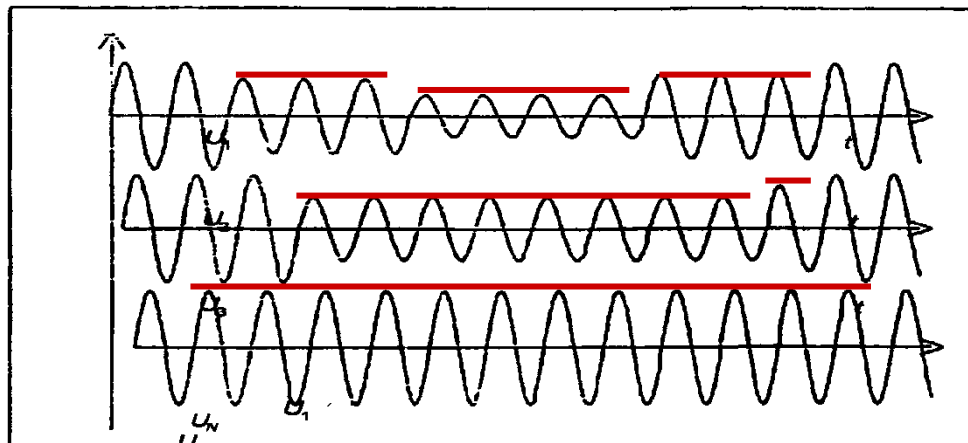
# Decyzja 1:

## Wybór wielkości opisujących zapad

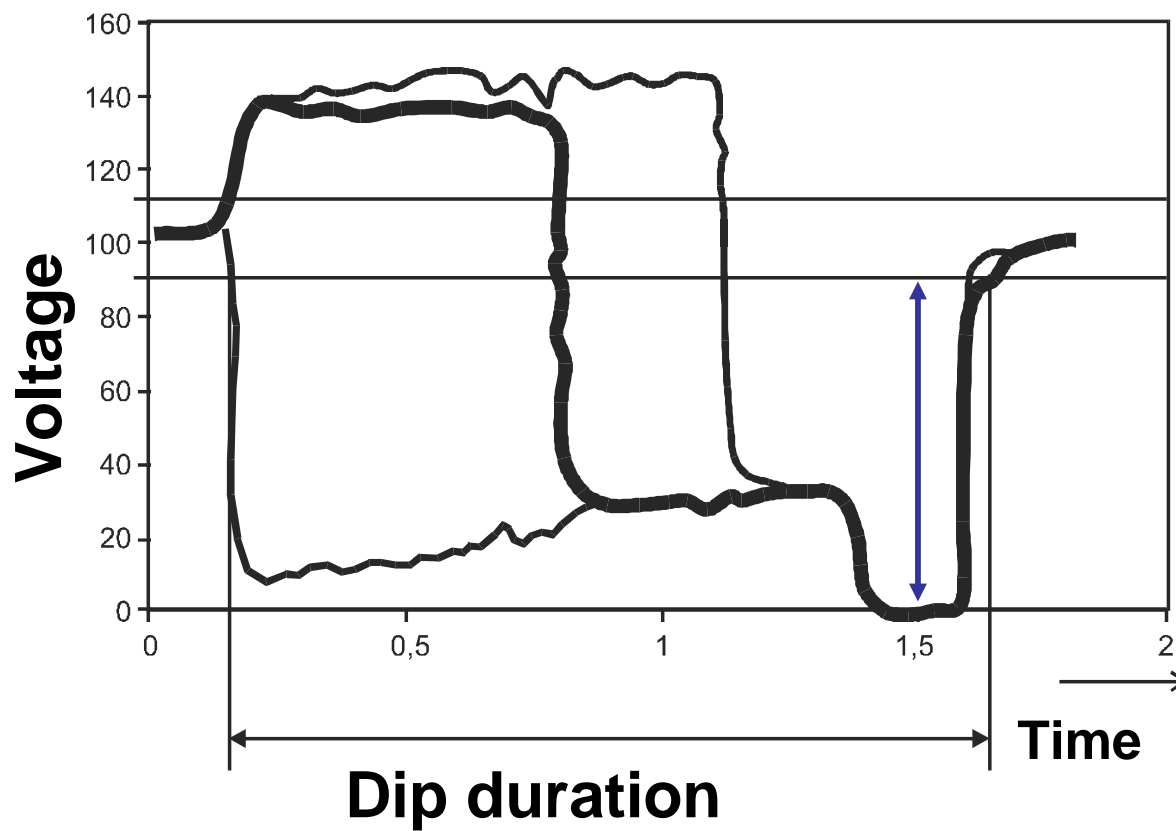


## Decyzja 2:

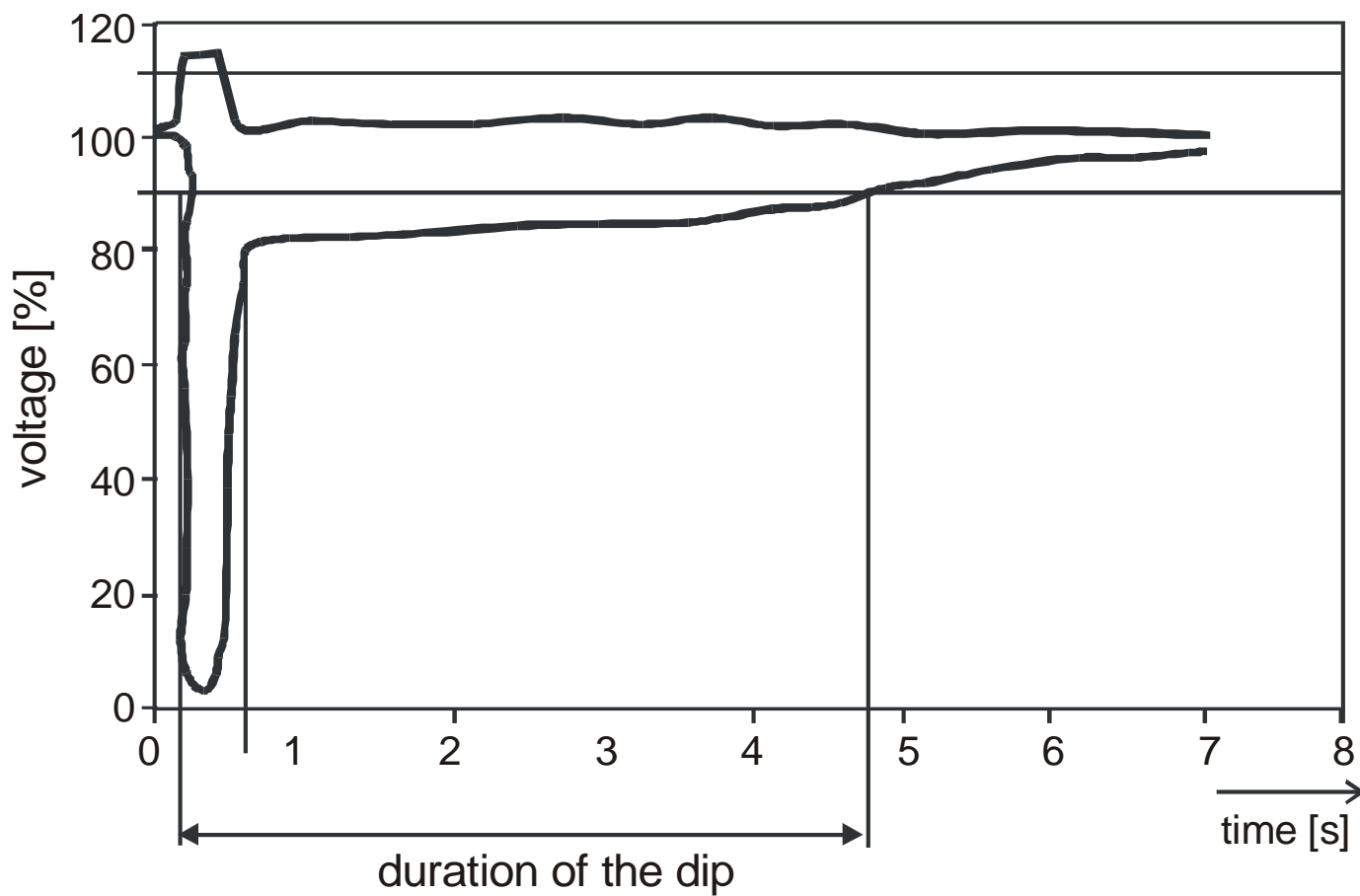
### Agregacja fazowa?



## Agregacja fazowa



## Agregacja fazowa



## Decyzja 3:

### Sposób raportowania wyników pomiaru:

Czas trwania	10 -	20 -	100 -	500 ms-	1 - 3 s	3 -	20- 60 s	60 - 180 s
Napięcie resztkowe $u$ [%]	20 ms	100 ms	500 ms	1 s		20 s		
$90 > u \geq 85$								
$85 > u \geq 70$								
$70 > u \geq 40$								
$40 > u \geq 10$								
$10 > u \geq 0$								
UWAGA 1: Wyniki pomiarów w pierwszej kolumnie i pierwszym wierszu są odpowiednio zwiększone przez przepięcia i zmiany obciążenia.								



## Zapady napięcia bez agregacji (WANDA)

Zapady [%]	10 - 100ms	100 - 500ms	500 ms - 1s	1 - 3s	3 - 20s	20 - 1min
10 - 15	1/3/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
15 - 30	1/0/4	2/3/3	1/1/1	0/0/0	0/0/0	0/0/0
30 - 60	0/1/3	0/0/1	0/0/1	0/0/0	0/0/0	0/0/0
60 - 90	1/1/1	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
90 - 100	1/2/3	0/0/0	0/0/0	0/0/2	2/1/3	0/1/0

Liczba zarejestrowanych zapadów: 44



## Agregacja fazowa (WANDA)

Zapady [%]	10 - 100ms	100 - 500ms	500ms - 1s	1 - 3s	3 - 20s	20s - 1min
10 - 15	3	0	0	0	0	0
15 - 30	5	5	1	0	0	0
30 - 60	4	1	1	0	0	0
60 - 90	3	0	0	0	0	0
90 - 100	6	0	0	2	6	1
Liczba zarejestrowanych zapadów: 38						

## Decyzja 4:

### Pomiar wartości skutecznej napięcia

#### Norma PN EN 61000-4-30

$$U_{rms(1/2)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N u^2}{N}}$$

$$U_{rms-200-ms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N u^2}{N}}$$

$$U_{rms-3-s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15} U_{rms-200-ms}^2}{15}}$$

$$U_{rms-10-min} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{200} U_{rms-3-s}^2}{200}}$$

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





## **Decyzja 5:**

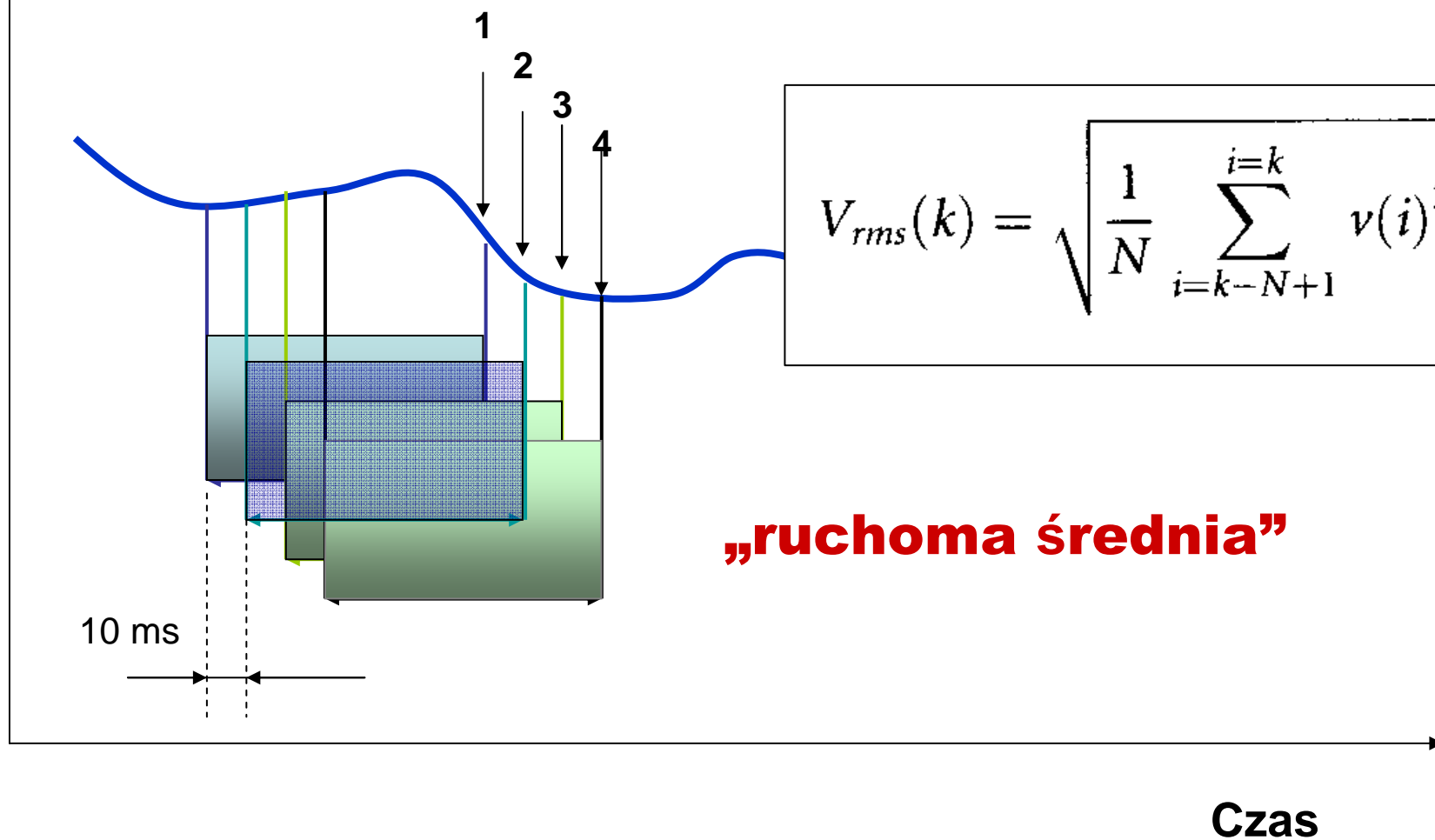
### **Napięcie referencyjne przyjmowane dla celów pomiarowych**

**napięcie znamionowe**

**napięcie deklarowane lub**

**„ruchoma średnia”.**

## Wartość skuteczna napięcia





AGH

## wartość napięcia referencyjnego

GPZ	Napięcie referencyjne	90 %	80 %	70 %	60 %
WANDA	$U_N = 110 \text{ kV}$	44	35	24	21
	$U_N = 120 \text{ kV}$	44*	41	30	21
	$U_N = U_X \text{ kV}$	44*	40	29	21
LUBOCZA	$U_N = 110 \text{ kV}$	74	59	45	42
	$U_N = 120 \text{ kV}$	74*	67	54	42
	$U_N = U_X \text{ kV}$				
SKAWINA	$U_N = 110 \text{ kV}$	19	6	0	0
	$U_N = 120 \text{ kV}$	19*	17	4	0
	$U_N = U_X \text{ kV}$	19*	12	4	0
* - niepełna liczba zapadów, $U_X$ - napięcie przed zapadem					



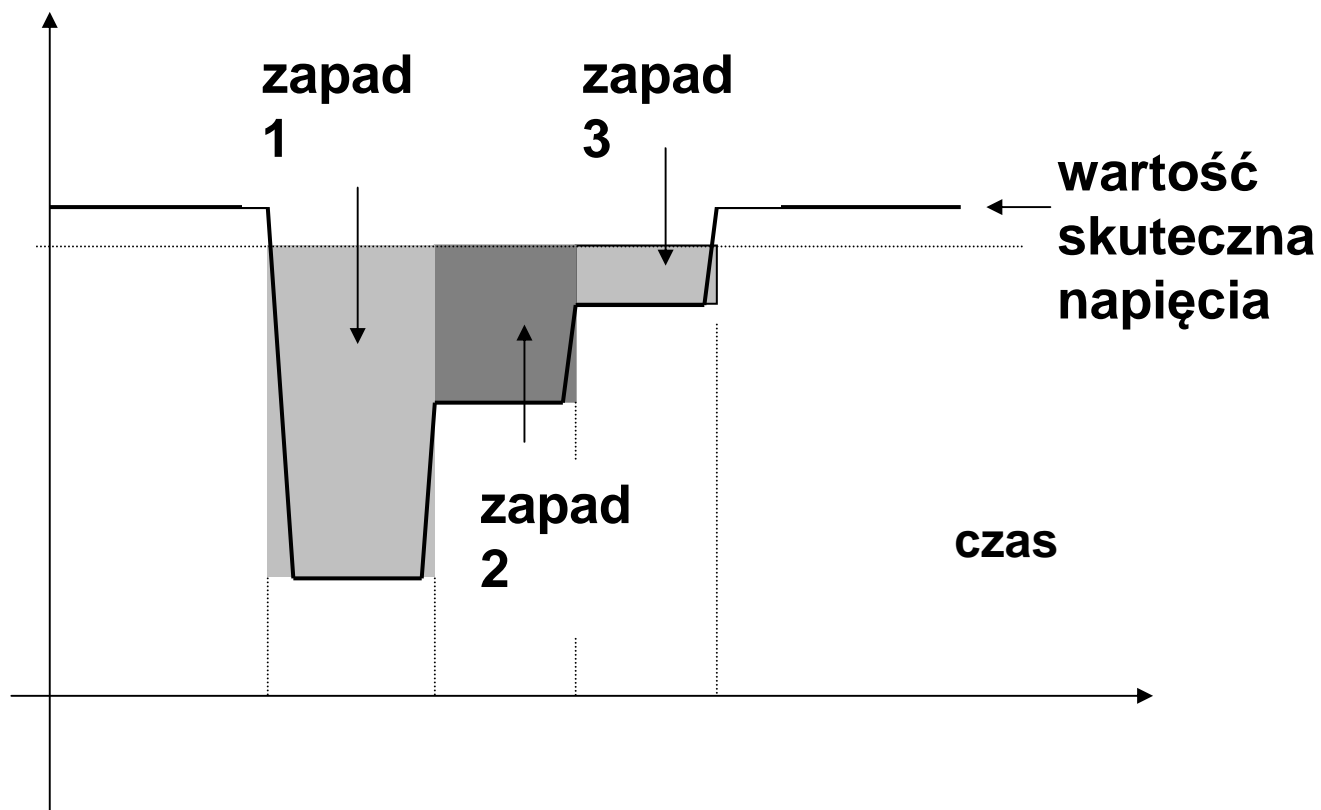
## Decyzja 6:

### Wartość napięcia progowego

*stała wartość napięcia progowego*

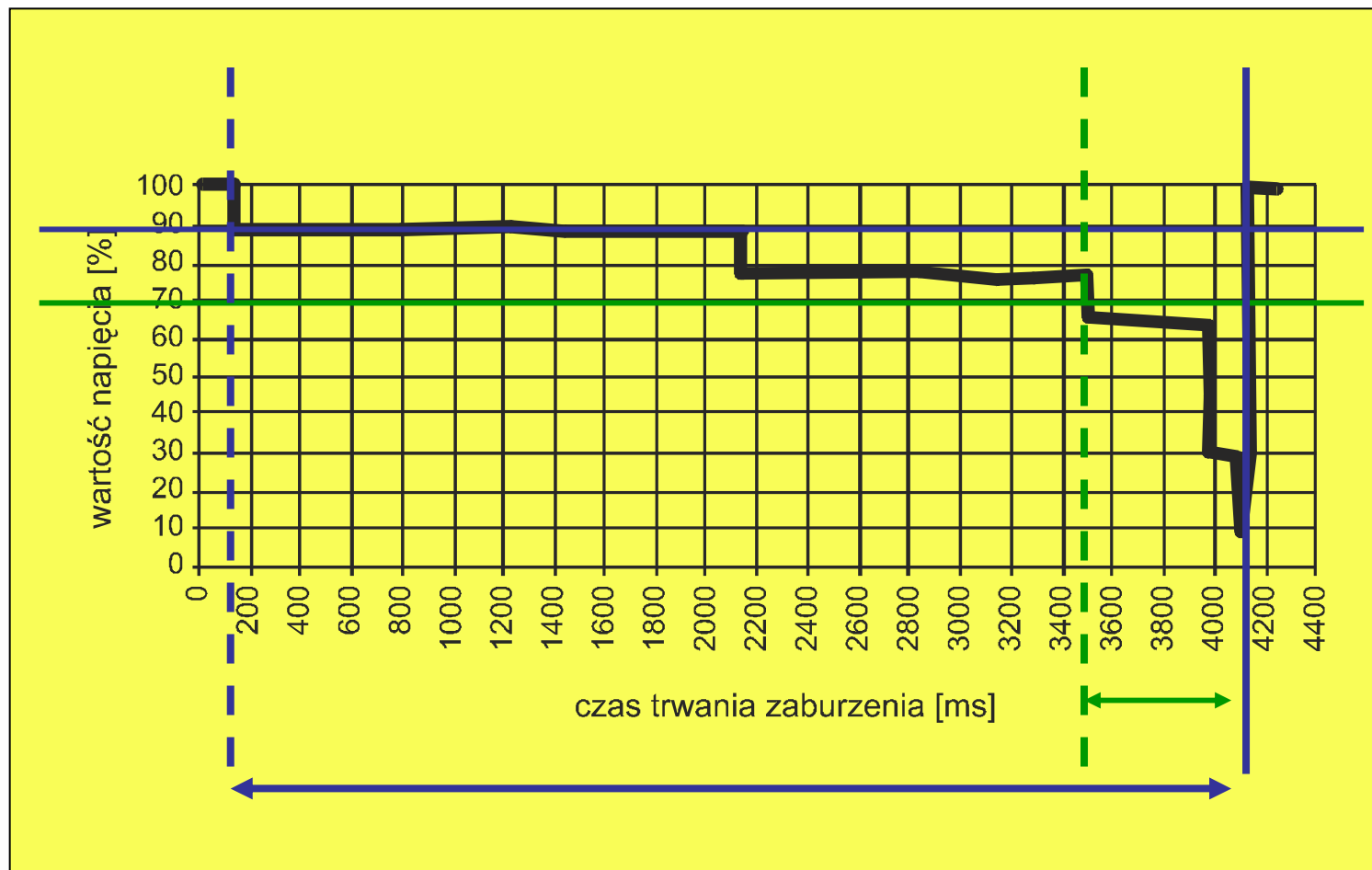
**zmienna wartość napięcia progowego (kilka napięć progowych)**

## Decyzja 6:

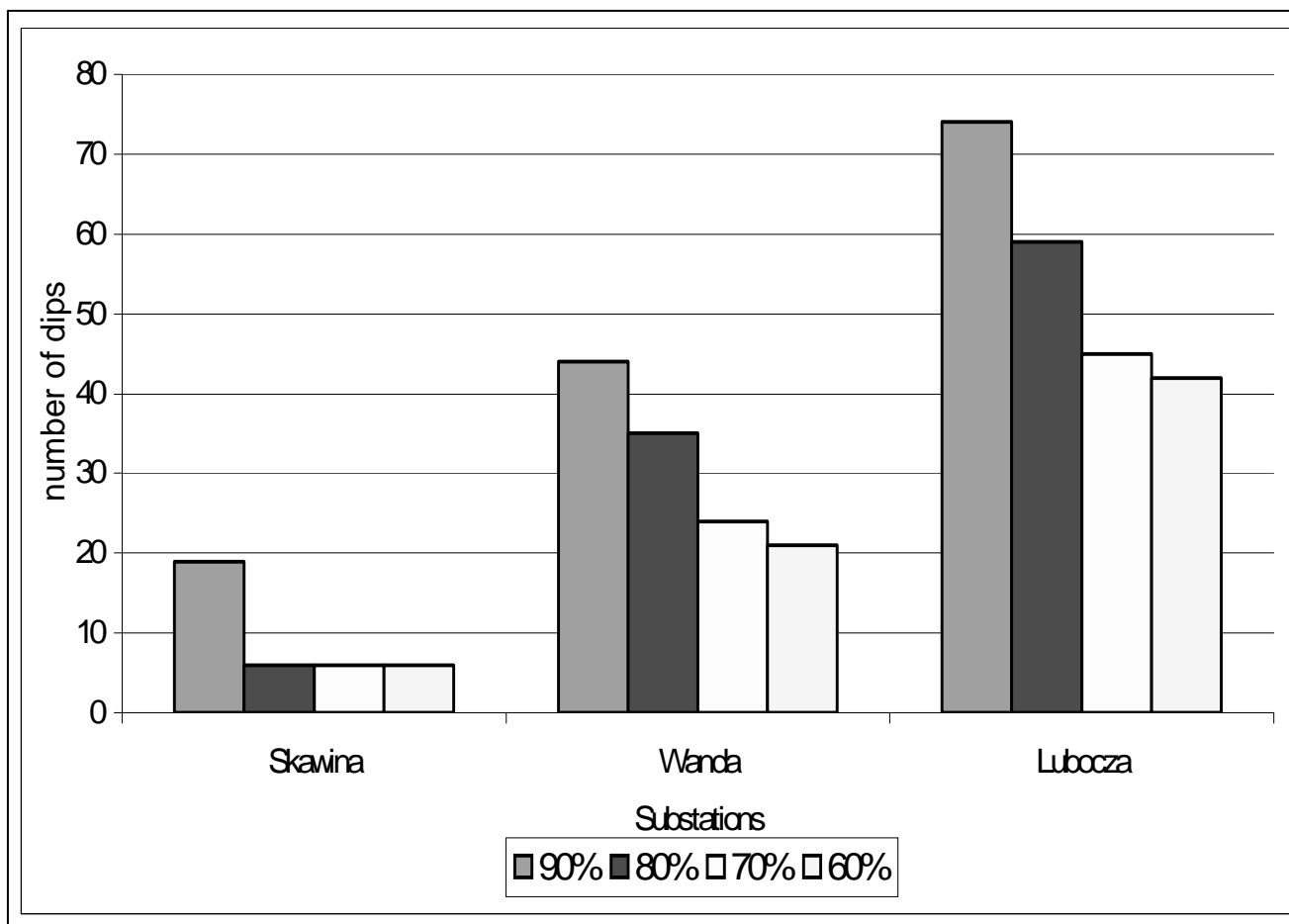


## Decyzja 6:

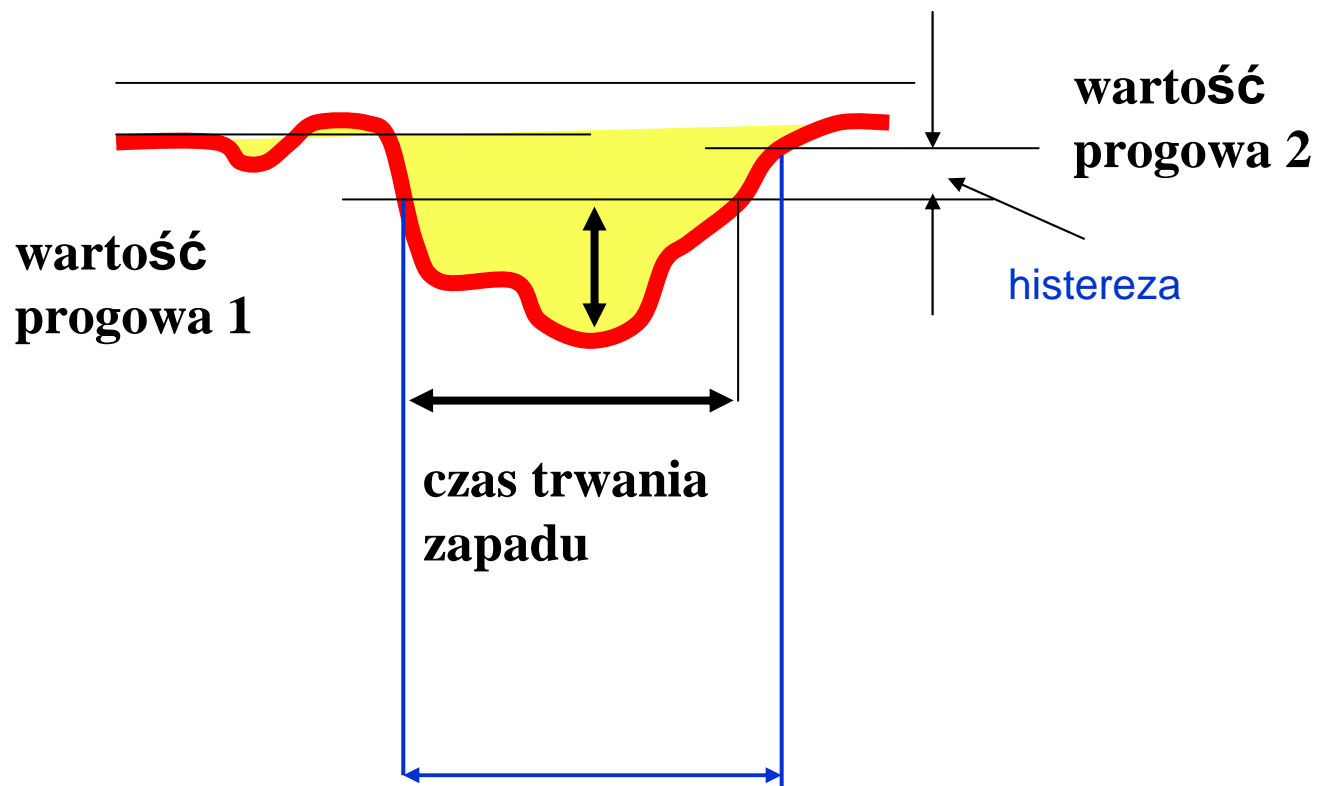
wartość progowa detekcji zaburzeń (90, 70 %)



## Zależność liczby zapadów od przyjętej wartości progowej



# Histeresa pomiarowa







## Decyzja 7:

### Rozróżnienie pomiędzy zapadem i krótką przerwą w zasilaniu

#### Krótką przerwa w zasilaniu

Nagłe zmniejszenie się napięcia we wszystkich fazach sieci elektrycznej poniżej wartości progowej, zakończone powrotem napięcia do wartości równej lub bliskiej wartości początkowej.



## **Decyzja 8:**

### **Pomiar zapadów:**

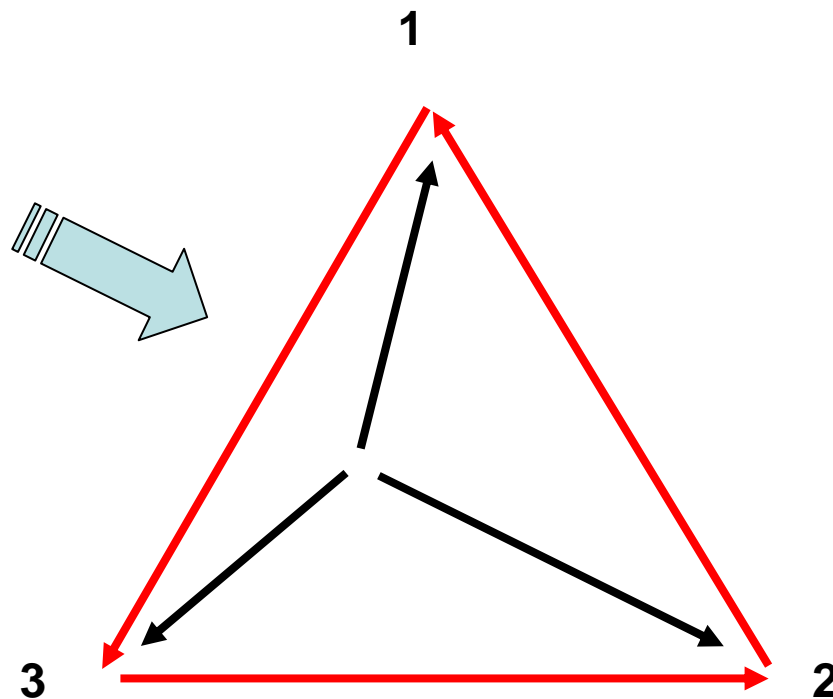
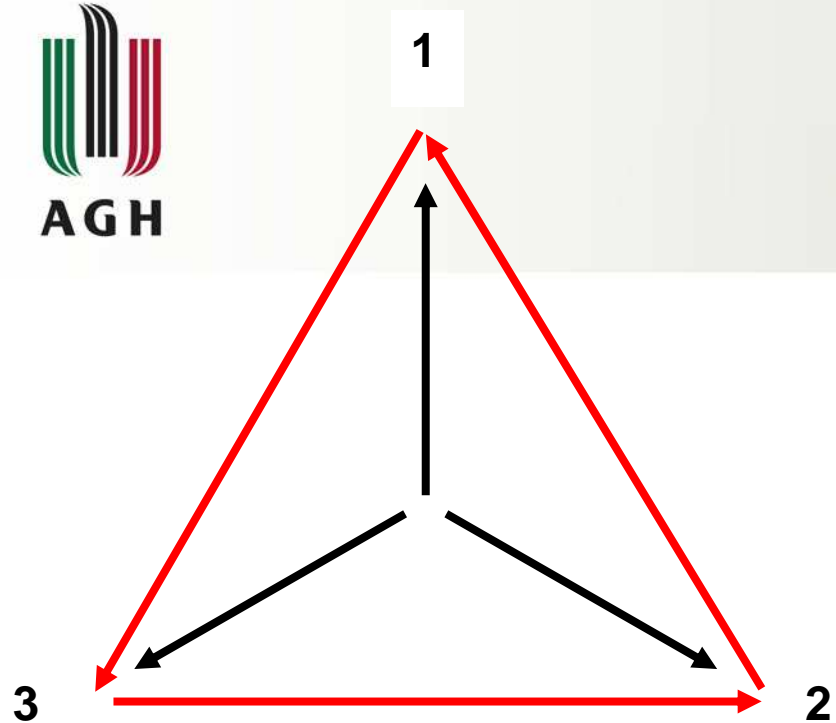
**1-fazowe**

**3-fazowe**

**napięcia fazowe**

**napięcia międzyfazowe**

# Decyzja 8:





## **Decyzja 9:**

**Czas pomiaru**

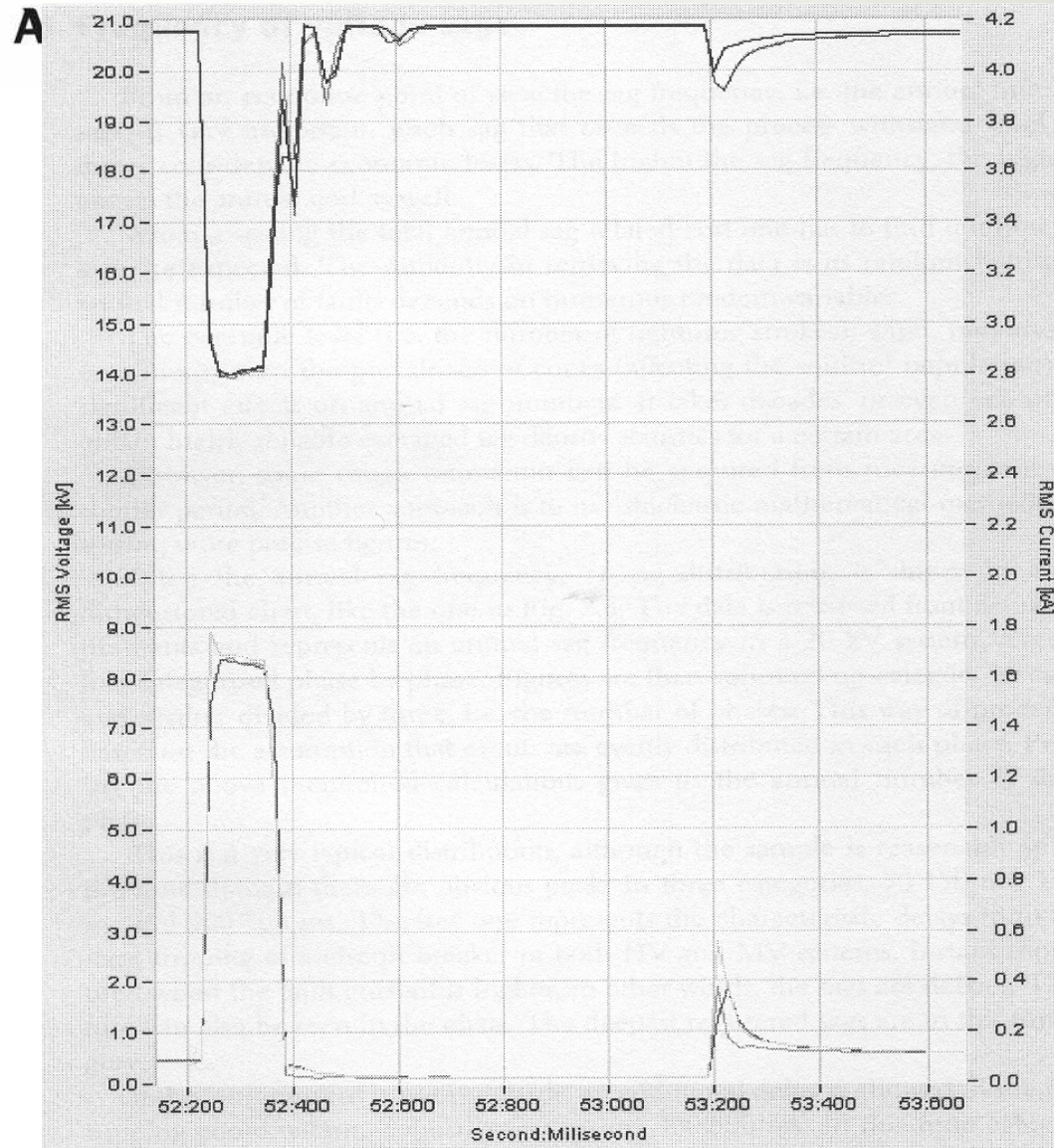
**1/2 roku, 1 rok**

## **Decyzja 10:**

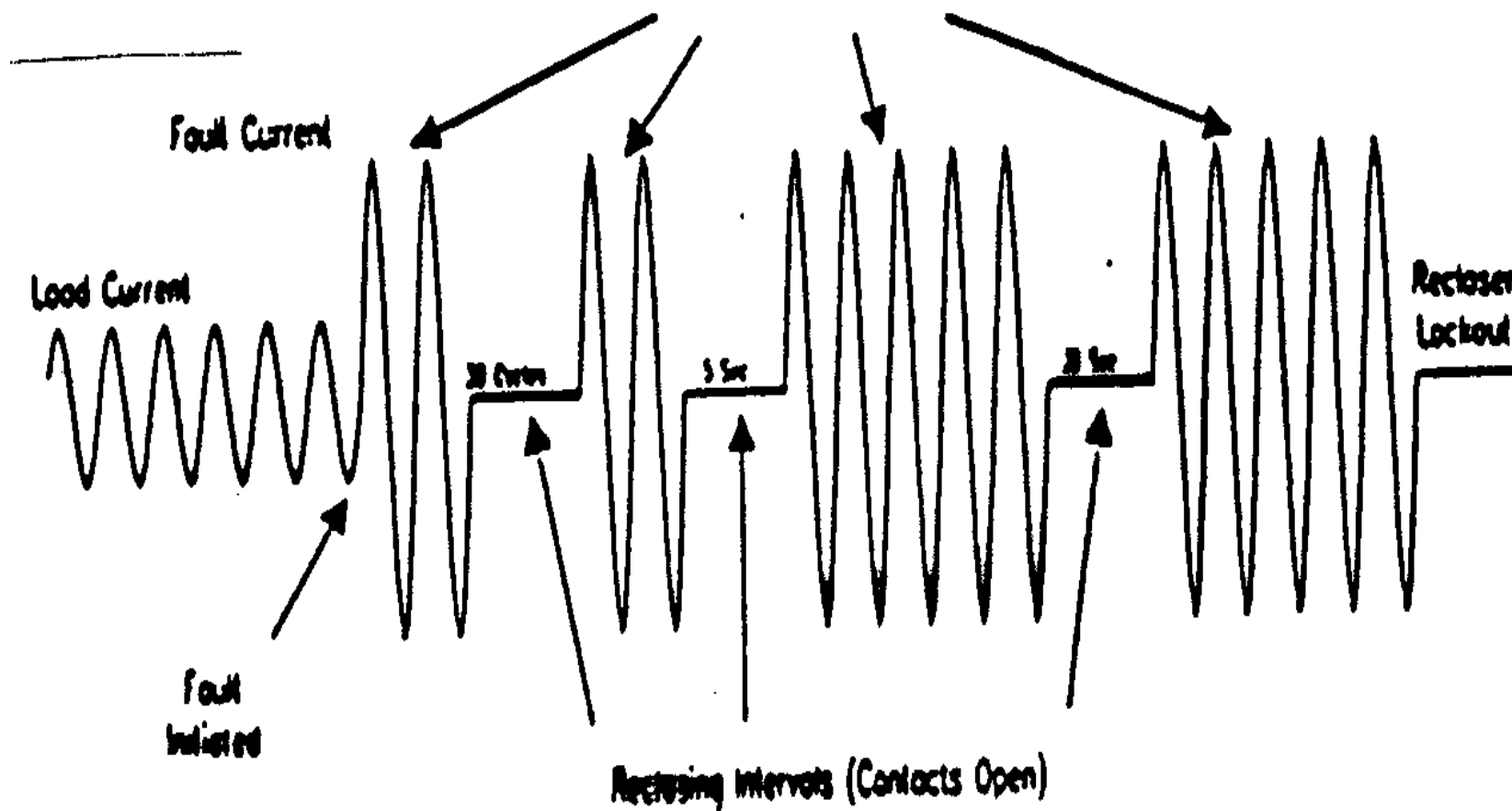
**Agregacja czasowa**



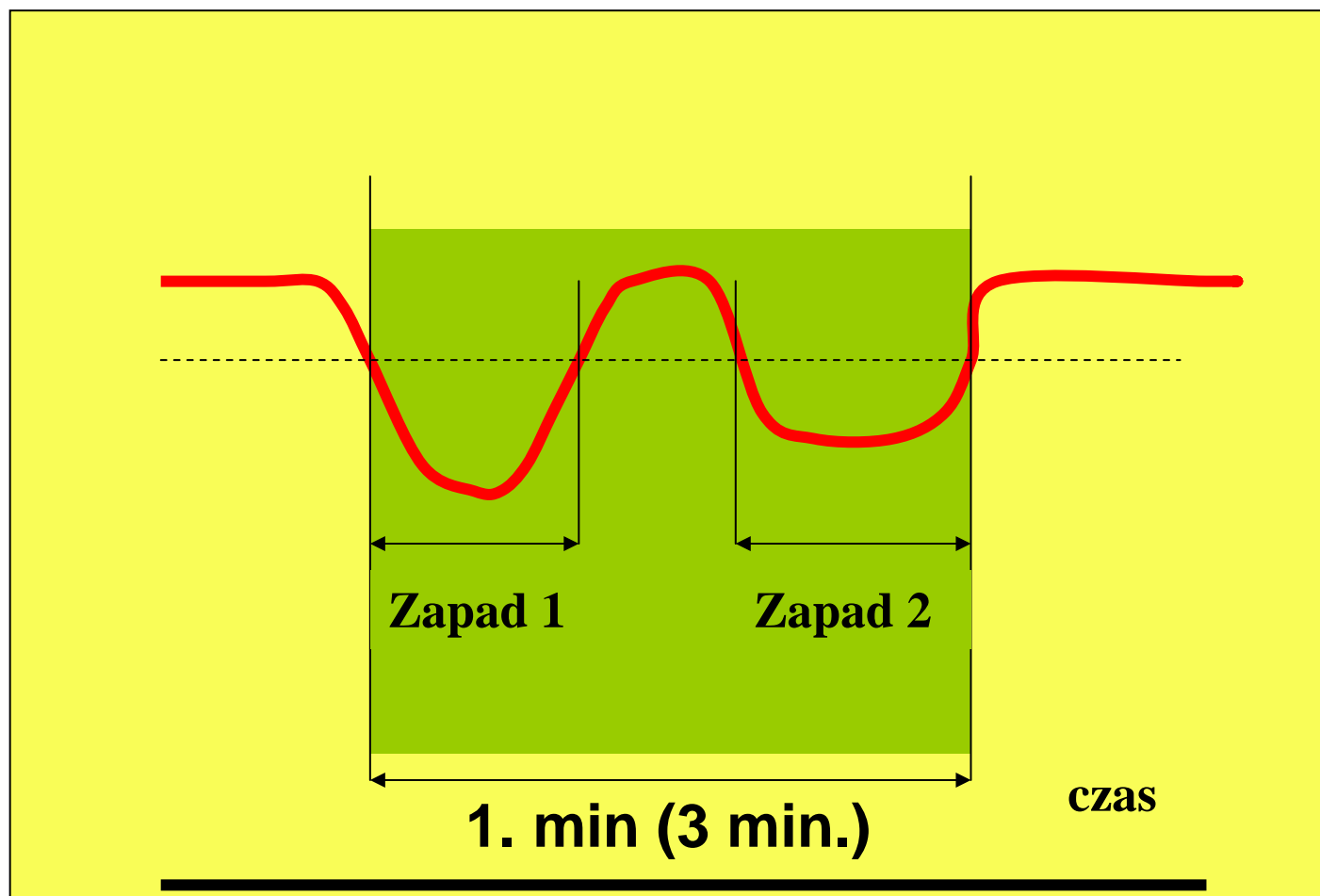
# AUTOMATYKA SAMOCZYNNEGO POWTÓRNEGO ZAŁĄCZANIA (SPZ)



# Agregacja czasowa



# Agregacja czasowa





AGH

## Agregacja 1-minutowa (WANDA)

Zapady [%]	10 - 100ms	100 - 500ms	500ms - 1s	1 - 3s	3 - 20s	20s - 1min
10 - 15	4	0	0	0	0	0
15 - 30	2	2	2	2	0	0
30 - 60	1	0	0	1	0	1
60 - 90	1	0	0	0	0	0
90 - 100	0	1	0	0	4	4

Liczba zarejestrowanych zapadów: 25

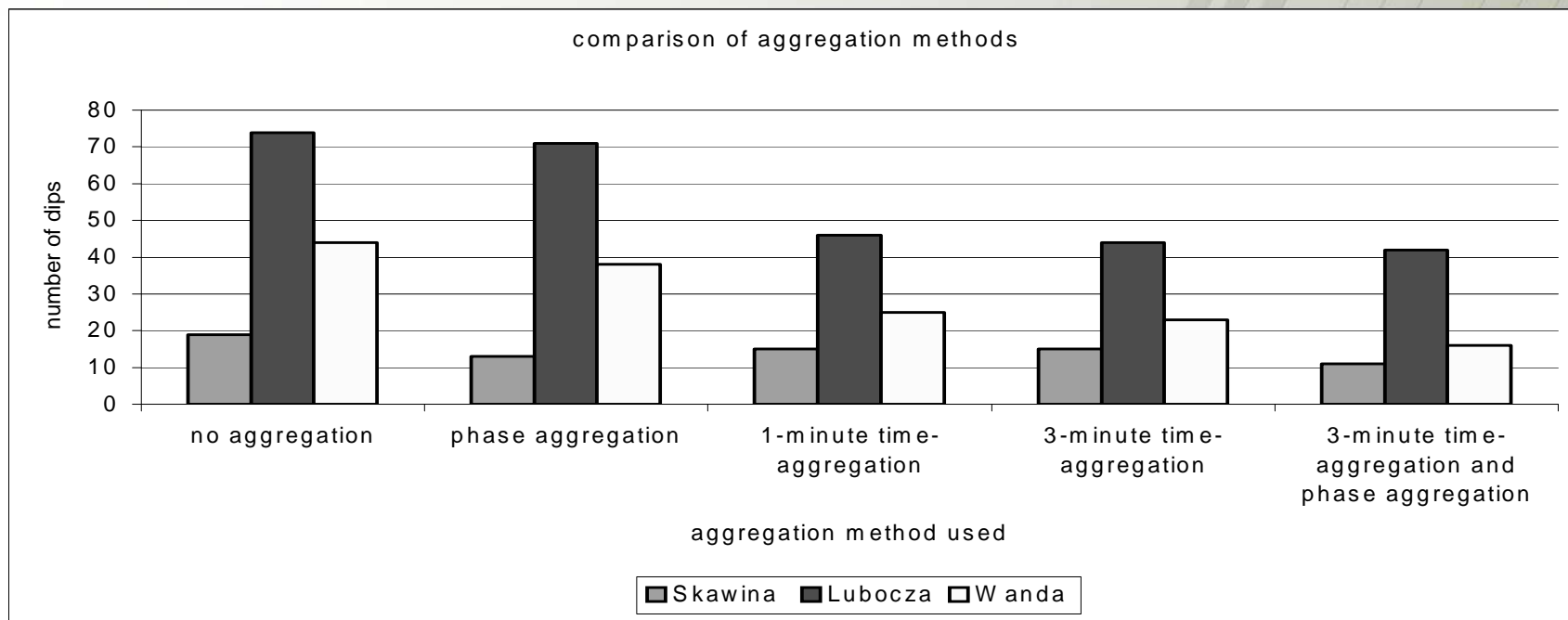




## Agregacja 3-minutowa (WANDA)

Zapady [%]	10 - 100ms	100 - 500ms	500ms - 1s	1 - 3s	3 - 20s	20s - 1min
10 - 15	4	0	0	0	0	0
15 - 30	2	2	2	2	0	0
30 - 60	1	0	0	1	0	1
60 - 90	0	0	0	0	0	0
90 - 100	0	0	0	0	3	4
Liczba zarejestrowanych zapadów: 23						

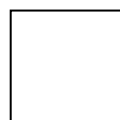
# Zależność liczby zapadów od przyjętej metody agregacji



**SKAWINA** 19/13/15/15/11



**LUBOCZA** 74/71/44/43/41



**WANDA** 44/38/25/24/16



## **Decyzja 10:**

### **Kryteria wyboru punktów pomiarowych i ich indywidualne charakterystyki**

**Liczba i lokalizacja przyrządów pomiarowych**

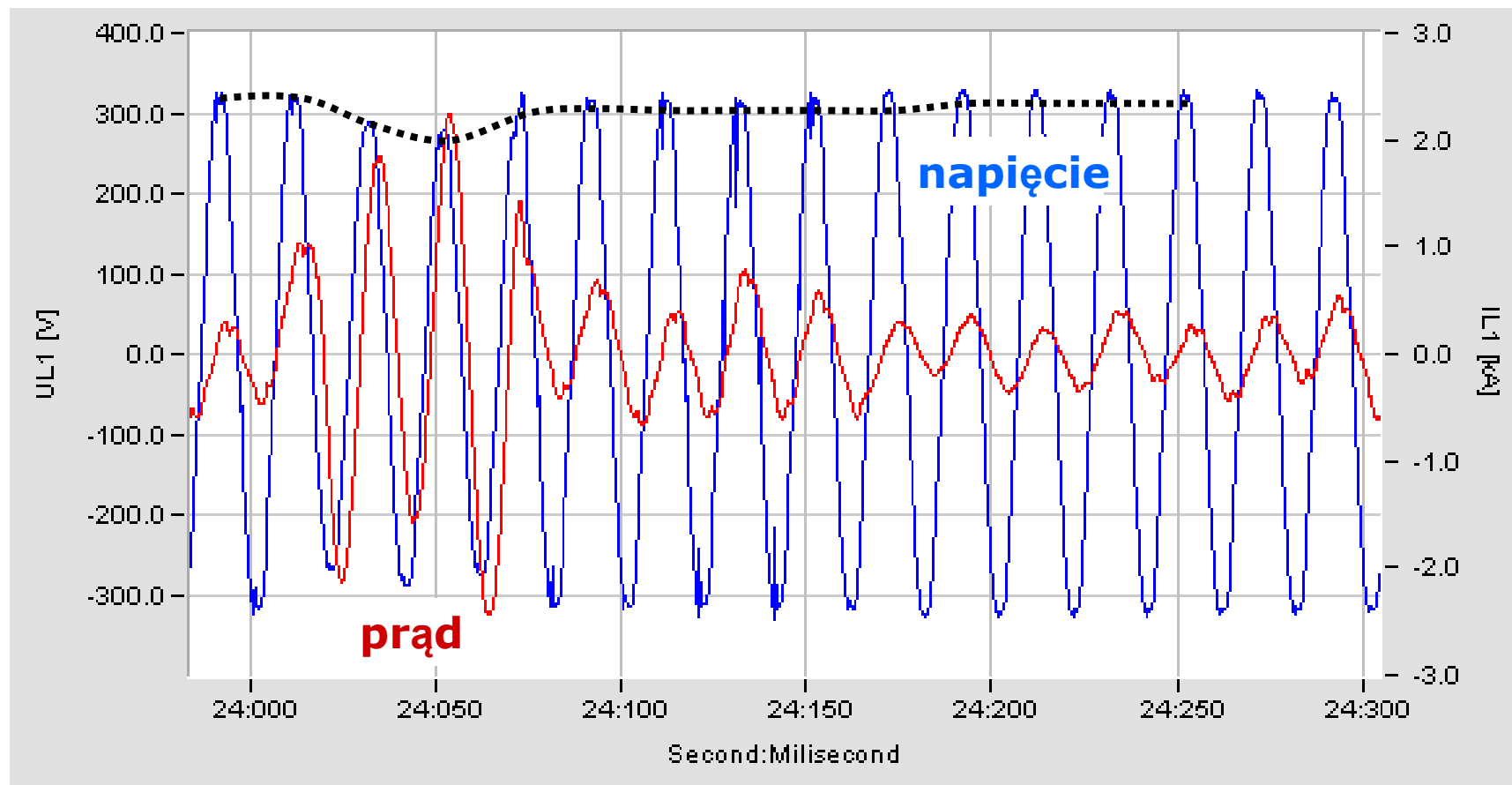
**Rodzaj sprzętu pomiarowego**

**Prezentacja danych w V lub jednostkach względnych lub w ujęciu statystycznym**

**Prezentacja wartości max., średnich, percentyli lub innych indeksów statystycznych**

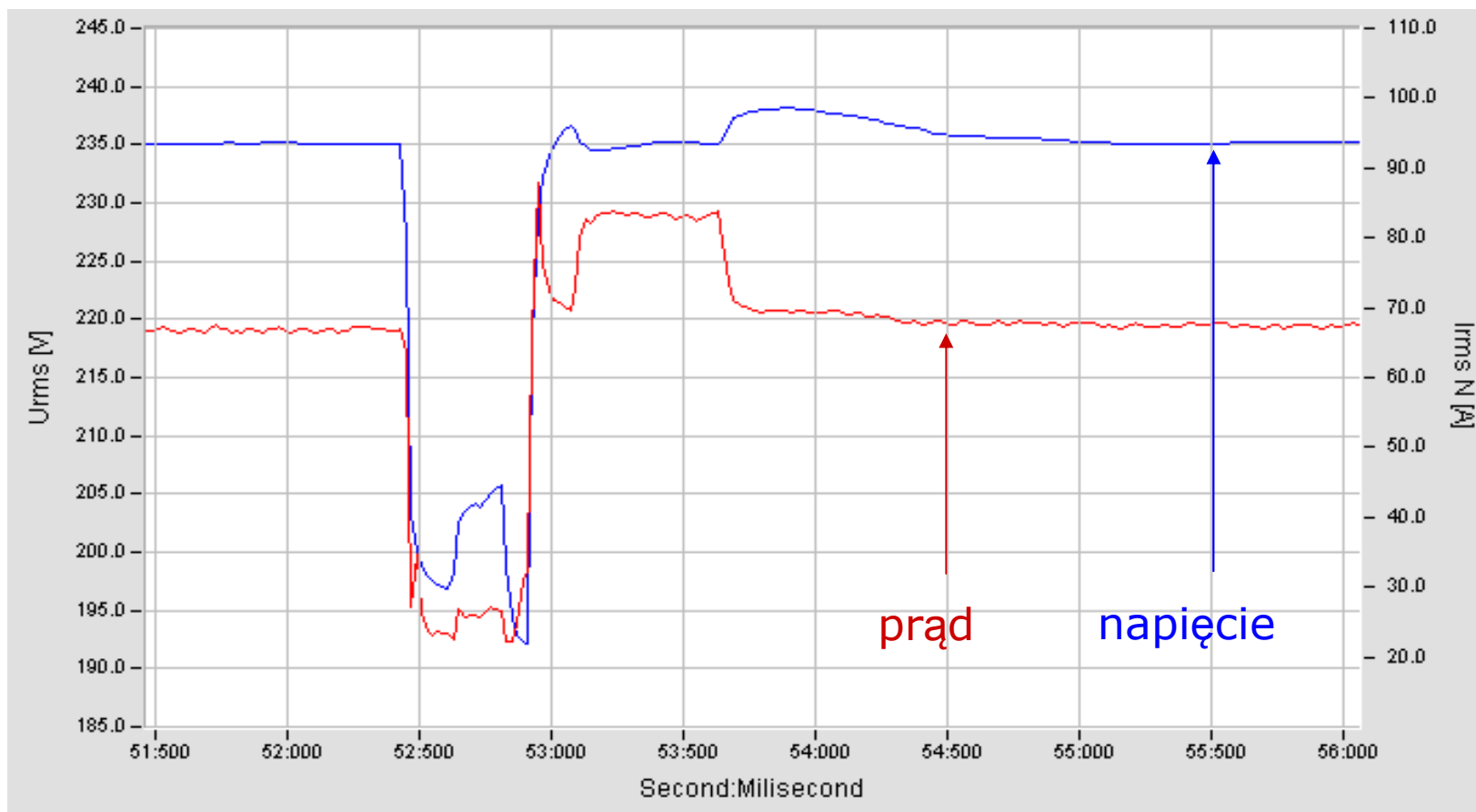
## Decyzja 11:

Pomiar tylko napięcia czy także prądu?



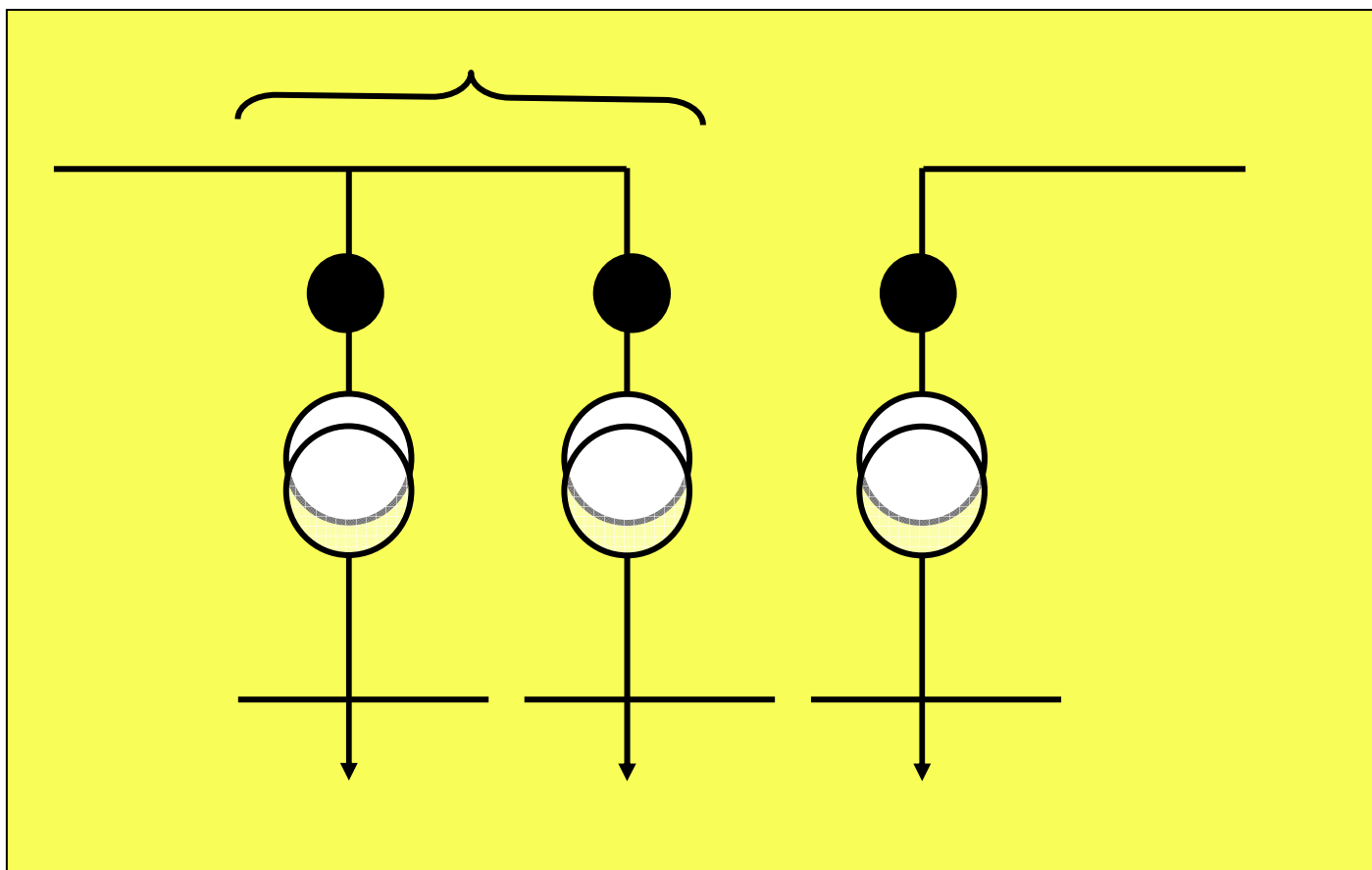
## Decyzja 11:

Pomiar tylko napięcia czy także prądu?



## Decyzja 12:

### Agregacja lokalizacyjna





# **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)**