



Instytut Inżynierii Elektrycznej  
Wydział Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji  
Uniwersytet Zielonogórski



# Zaburzenia elektromagnetyczne przewodzone w systemach elektroenergetycznych typu Smart Grid

**Robert Smoleński**



## Plan Prezentacji

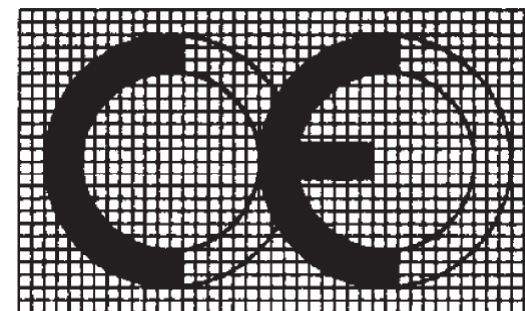
- ❑ Wprowadzenie
- ❑ Specyficzne zagadnienia związane z rozptywem zaburzeń przewodzonych w systemach Smart Grid
  - Rozptyw zaburzeń w rozległych obwodach sieci nn i SN
  - Wpływ zaburzeń generowanych przez przekształtniki z modulacją deterministyczną i pseudolosową na niezawodność przewodowej transmisji danych
  - Zaburzenia sumaryczne generowane przez grupę przekształtników
- ❑ Kompensacja napięć zaburzeń generowanych przez interfejsy energoelektroniczne
- ❑ Wnioski

DYREKTYWA 2004/108/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY

z dnia 15 grudnia 2004 r.

w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej oraz uchylająca dyrektywę 89/336/EWG

- d) „kompatybilność elektromagnetyczna” oznacza zdolność urządzenia do zadowalającego działania w środowisku elektromagnetycznym bez powodowania nadmiernych zaburzeń elektromagnetycznych w stosunku do innych urządzeniach działających w tym środowisku;

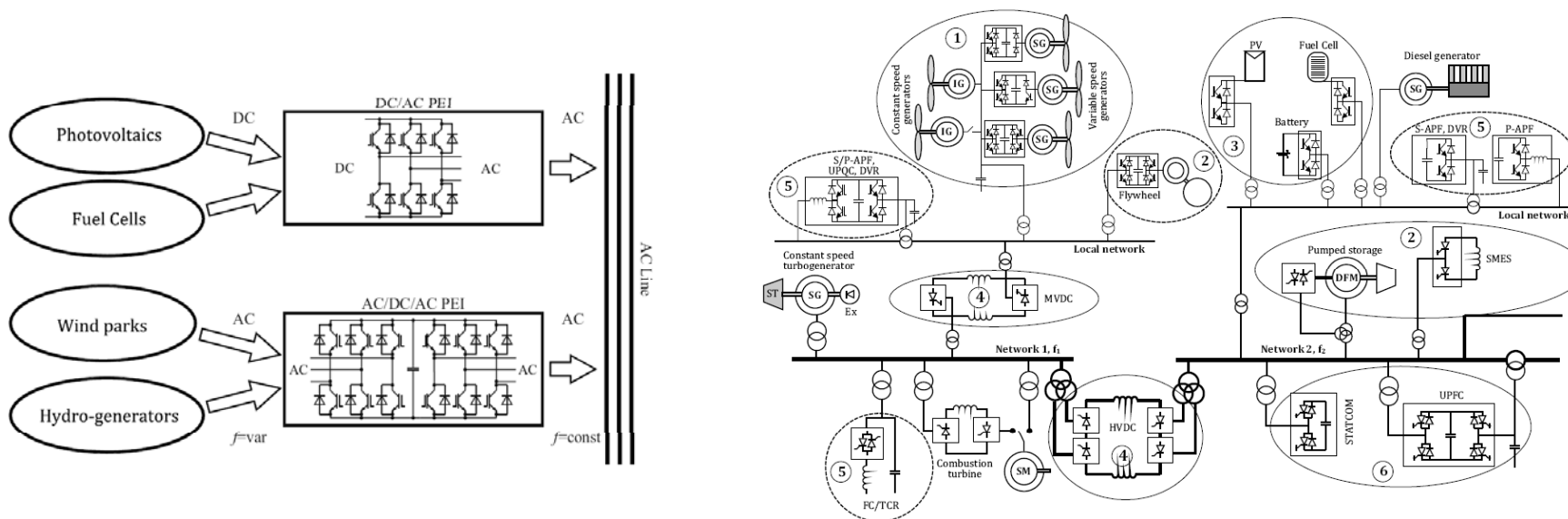


DYREKTYWA 2004/108/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY

z dnia 15 grudnia 2004 r.

w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej oraz uchylająca dyrektywę 89/336/EWG

- (17) W przypadku, gdy aparatura może występować w różnych konfiguracjach, ocena kompatybilności elektromagnetycznej powinna potwierdzić, że aparatura spełnia wymagania ochronne w konfiguracjach możliwych do przewidzenia przez producenta, jako reprezentatywne przykłady zwykłego używania zgodnie z przeznaczeniem; w takim przypadku powinno być wystarczające przeprowadzenie oceny na podstawie konfiguracji, która może powodować największe zaburzenia oraz konfiguracji najbardziej podatnej na zaburzenia.



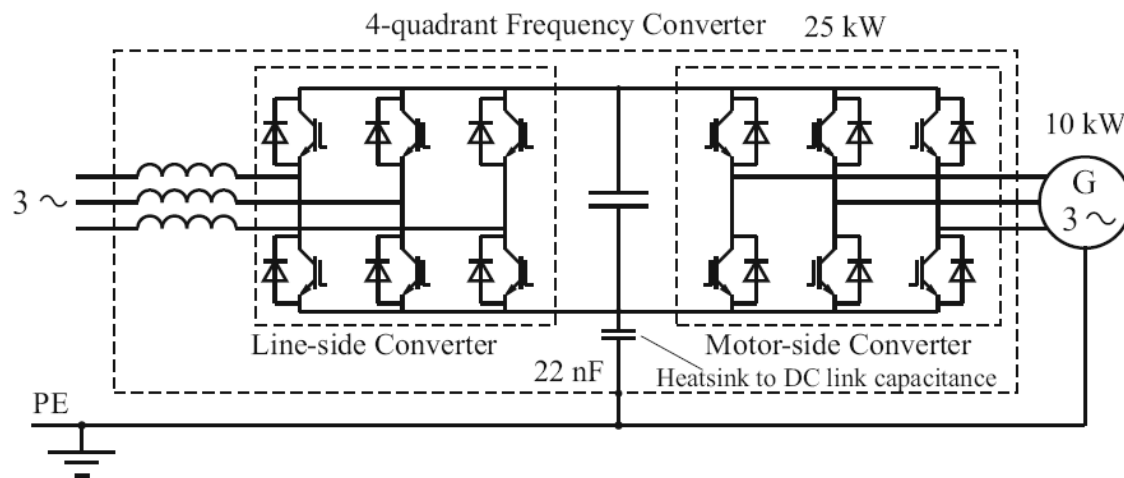
Interfejsy energoelektroniczne stosowane są w systemach Smart Grid w celu:

- ❑ dopasowania parametrów i sprzężenia odnawialnych źródeł energii z siecią dystrybucyjną lub odbiorcami,
- ❑ dopasowania parametrów i sprzężenia magazynów energii i sterowania przepływem energii,
- ❑ poprawy parametrów jakości energii.



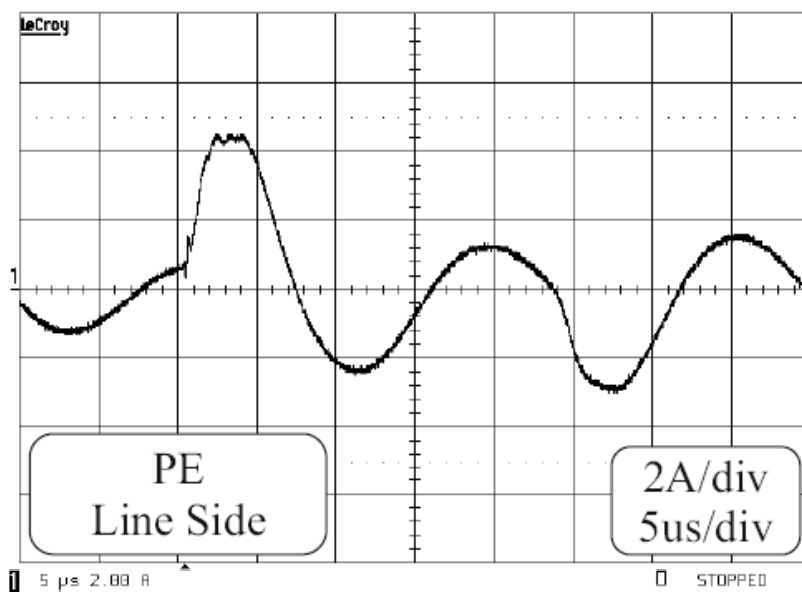
- Autobus elektryczny przekształtnik buck-boost, baterie litowo-jonowe oraz BMS
- Stacja szybkiego ładowania AC/DC130 kW
- Komunikacja CAN

# Specyficzne zagadnienia związane z rozptywem zaburzeń przewodzonych w systemach Smart Grid

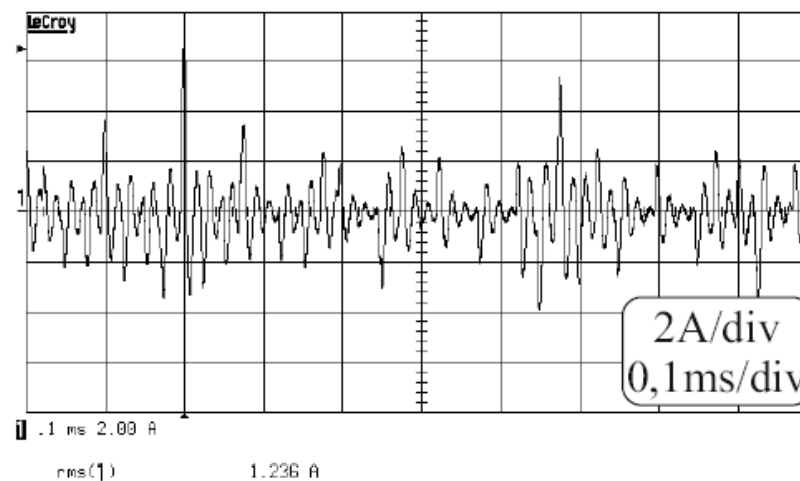


Czterokwadrantowy przemiennik  
częstotliwości z mostkiem  
diodowym 25 kW

Silnik asynchroniczny 10 kW



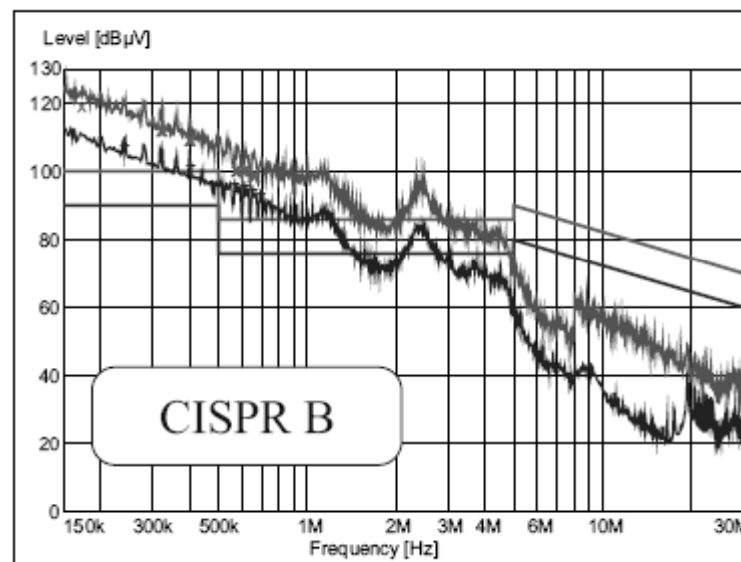
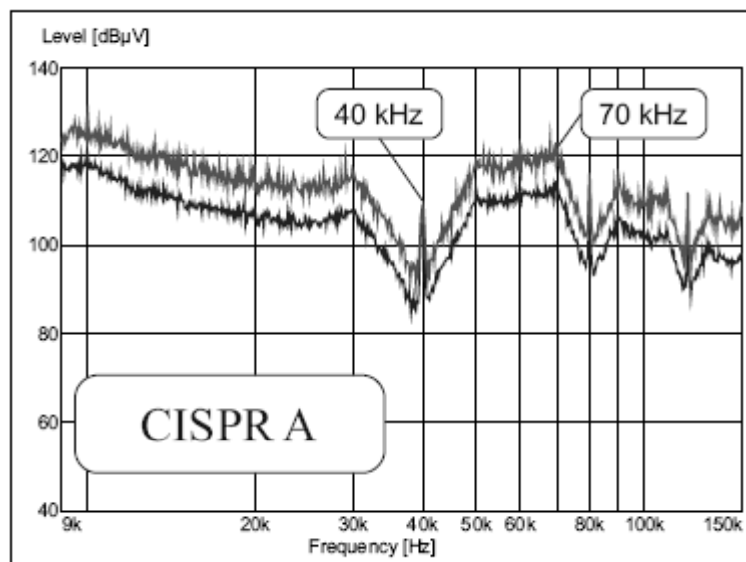
Wynik pomiarowy



Prąd zaburzeń CM zmierzony w przewodzie PE przy przekształtniku



## Wynik pomiarowy

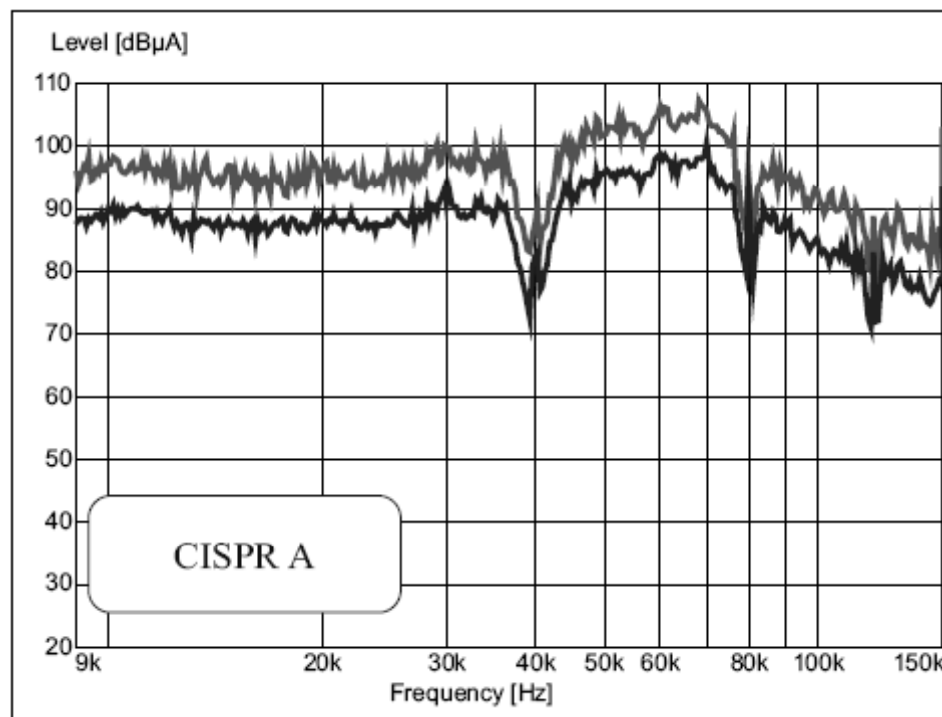


Zaburzenia przewodzone napędu przekształtnikowego zmierzone zgodnie z PN-EN 61800-3

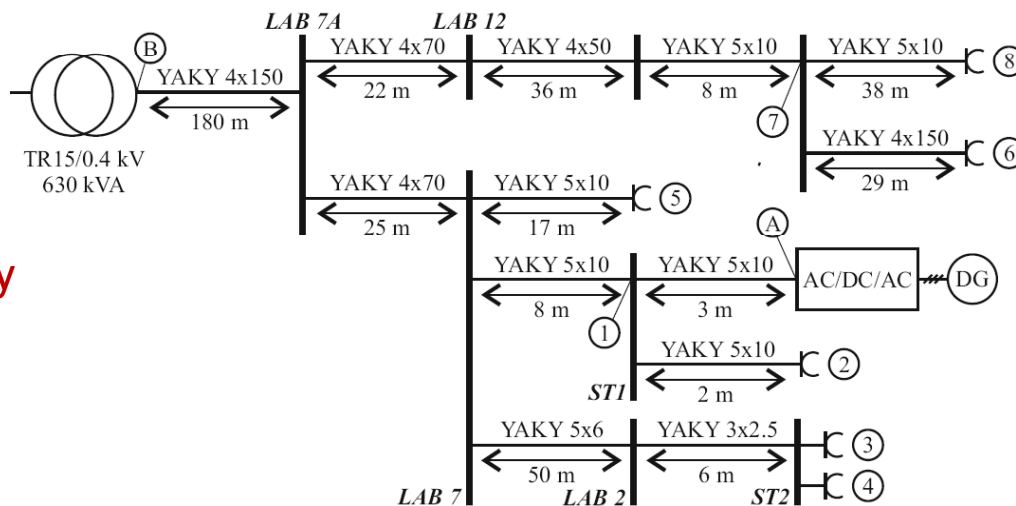
*Czterokwadrantowy przemiennik częstotliwości o mocy 25kW*

*Maszyna indukcyjna o mocy 10kW*

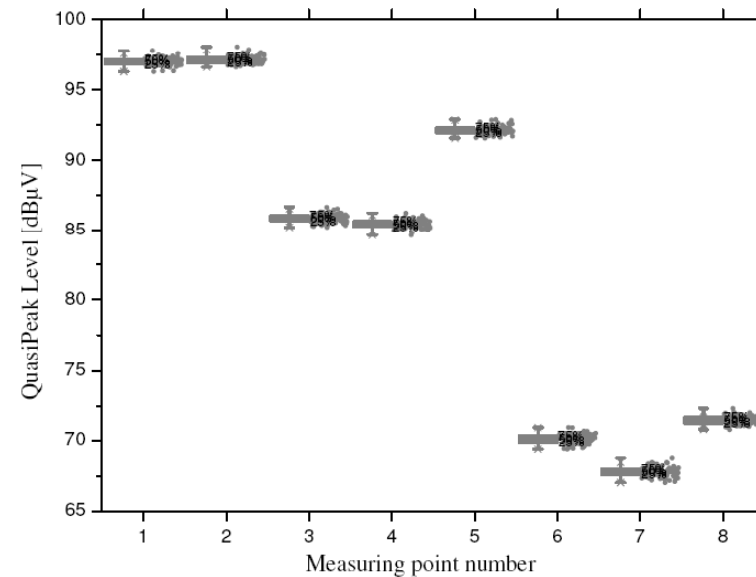
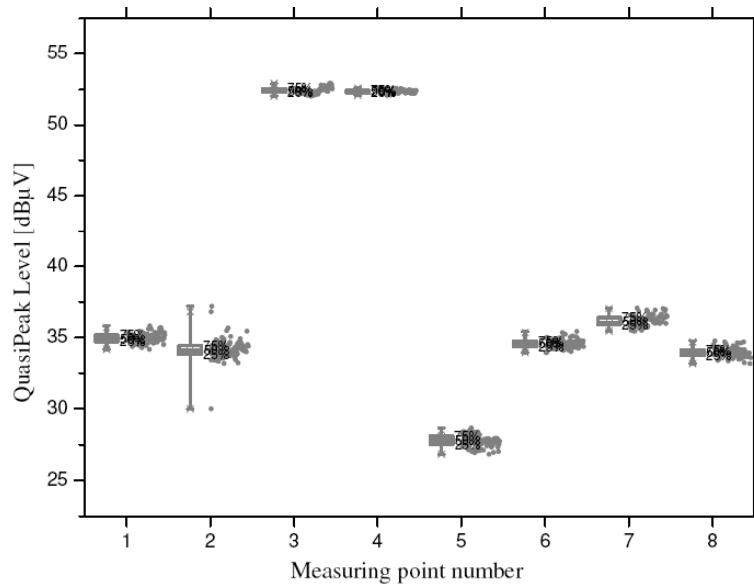
## Wynik pomiarowy



Spektrum prądu zaburzeń CM zmierzone w przewodzie PE przy przekształtniku

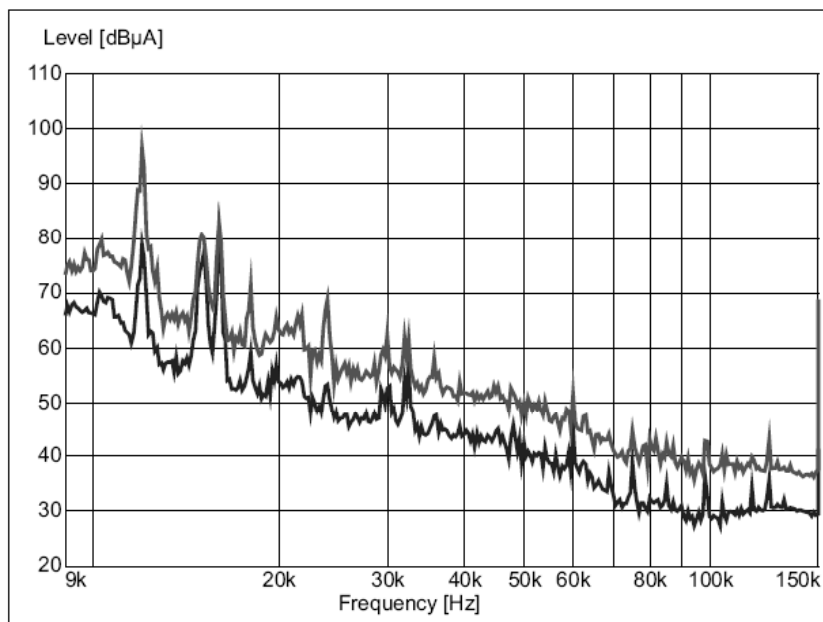


## Wynik pomiarowy

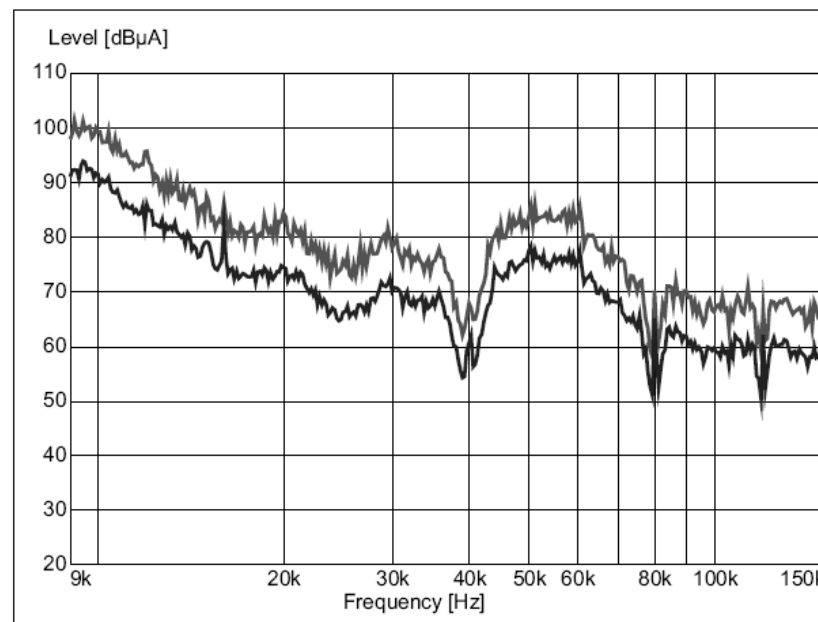


Wyniki pomiaru rozpływu zaburzeń generowanych przez przekształtnik w sieci nn hali laboratoryjnej

## Wynik pomiarowy



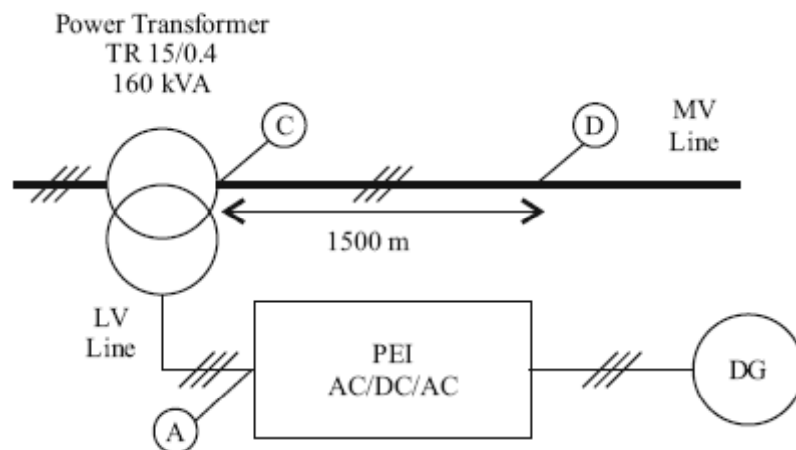
(a)



(b)

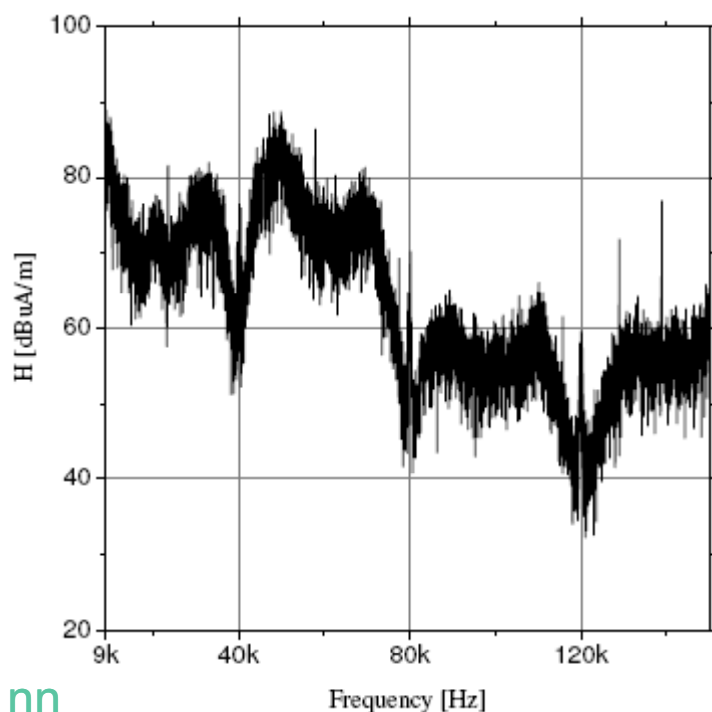
Spektrum prądu zaburzeń CM zmierzone w przewodzie PE kabla zasilającego halę laboratoryjną 300m od źródła zaburzeń:

a. przekształtnik wyłączony, b. przekształtnik włączony



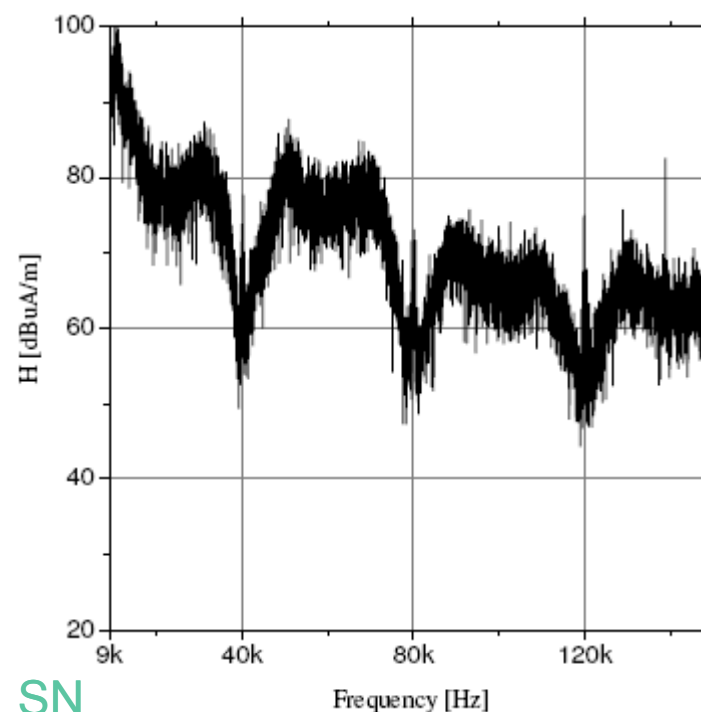
Wynik pomiarowy

Natężenie pola magnetycznego  
po stronie nn i SN transformatora  
w stacji typu miejskiego



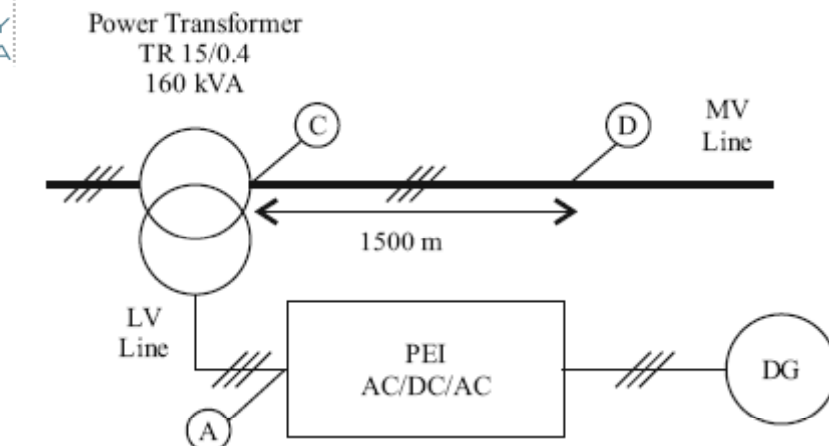
nn

(a)



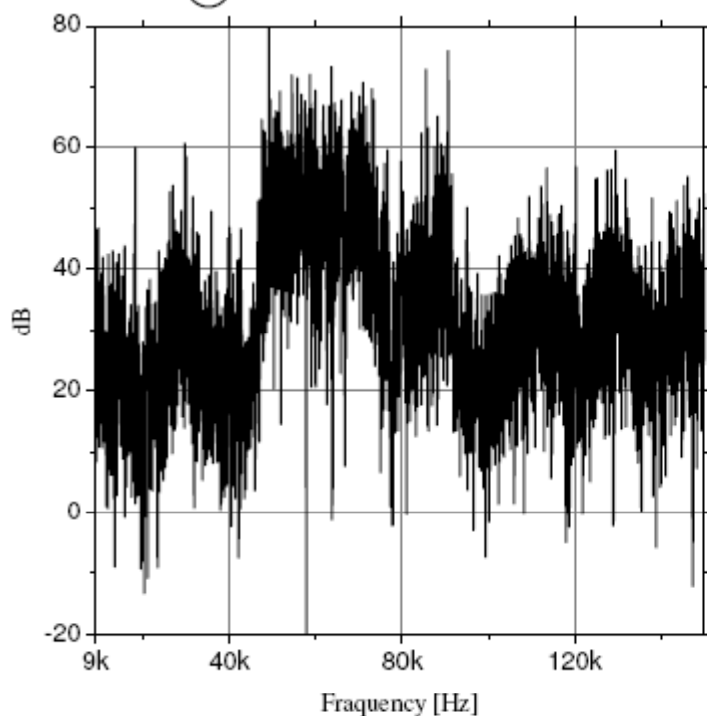
SN

(b)



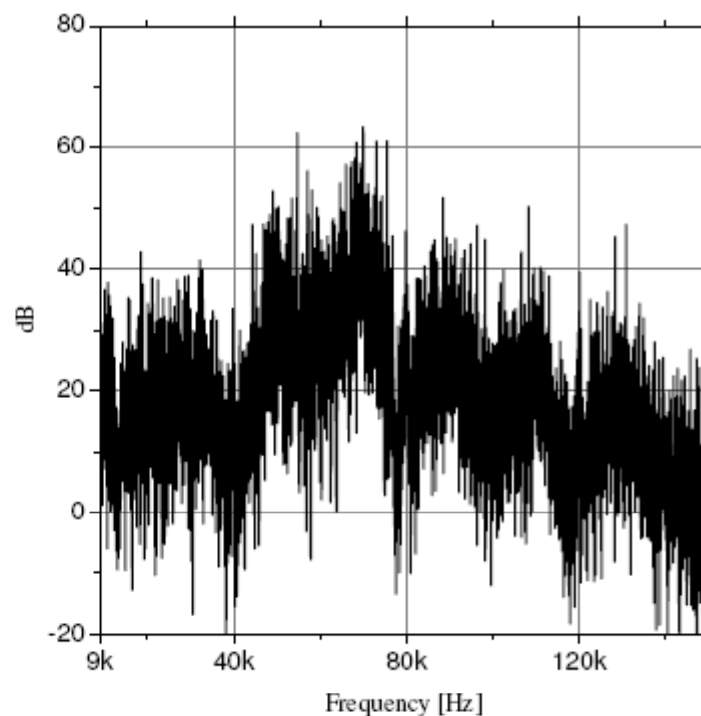
### Wynik pomiarowy

Wzrost natężenia pola magnetycznego pod linią napowietrzną SN w stosunku do zaburzeń tła po włączeniu przekształtnika



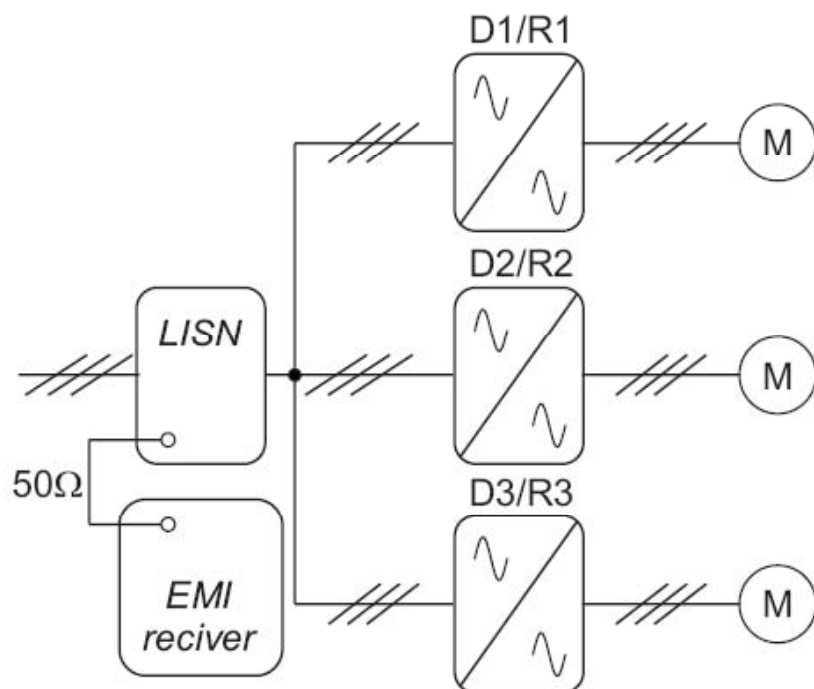
(a)

20m od źródła zaburzeń



(b)

1500m od źródła zaburzeń

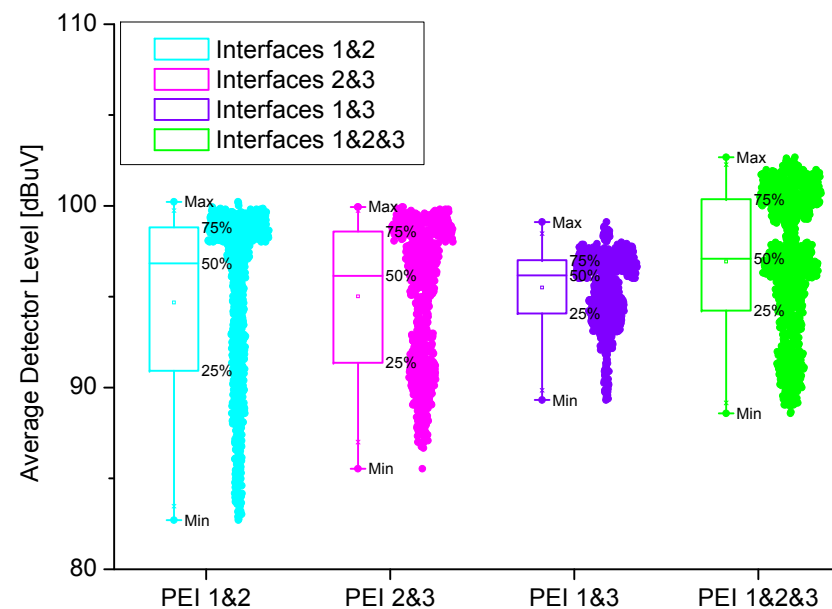
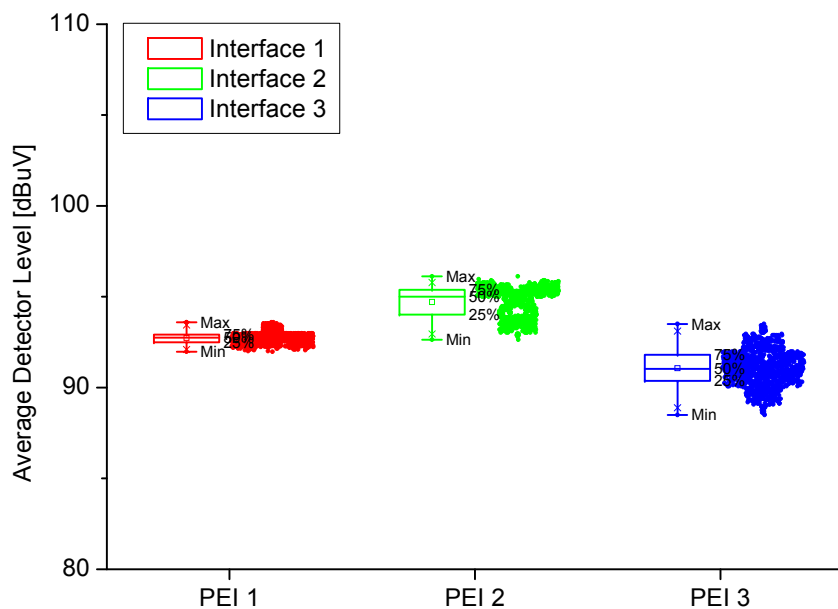


Trójfazowe przemienniki częstotliwości z mostkiem diodowym 7,5 kW  
Silniki asynchroniczne 1 kW

Układ do pomiaru zaburzeń generowanych przez grupę przekształtników  
z modulacją deterministyczną i pseudolosową

Wykresy pudełkowe:  
a.) pojedynczy przekształtnik, b.) grupa przekształtników

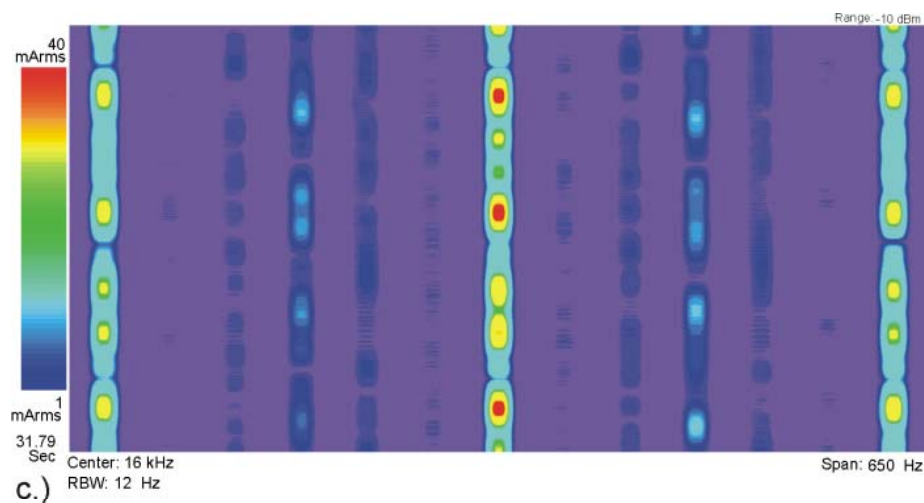
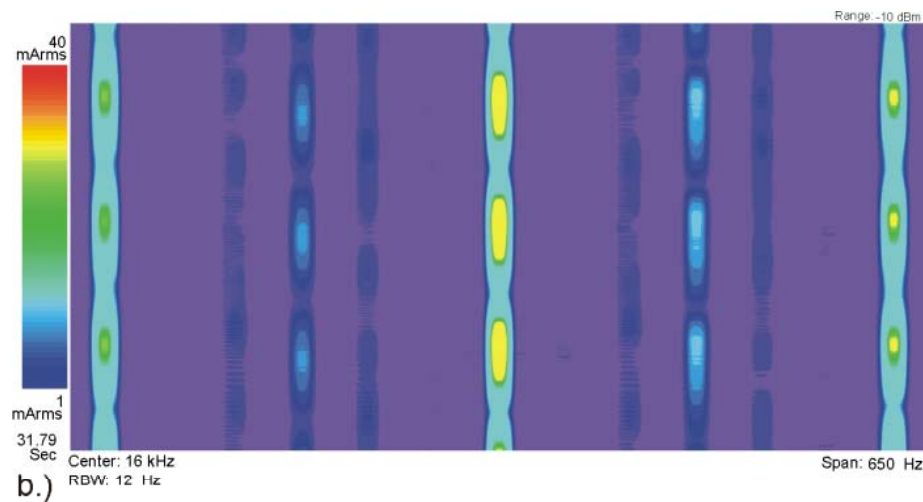
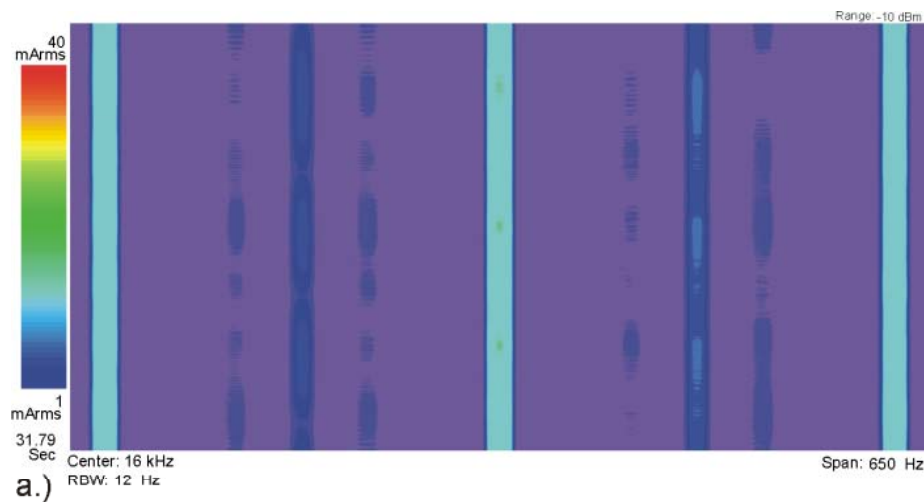
Wynik pomiarowy



- Wyniki 1000 pomiarów finalnym detektorem wartości średniej zgodnie z wymaganiami normalizacyjnymi



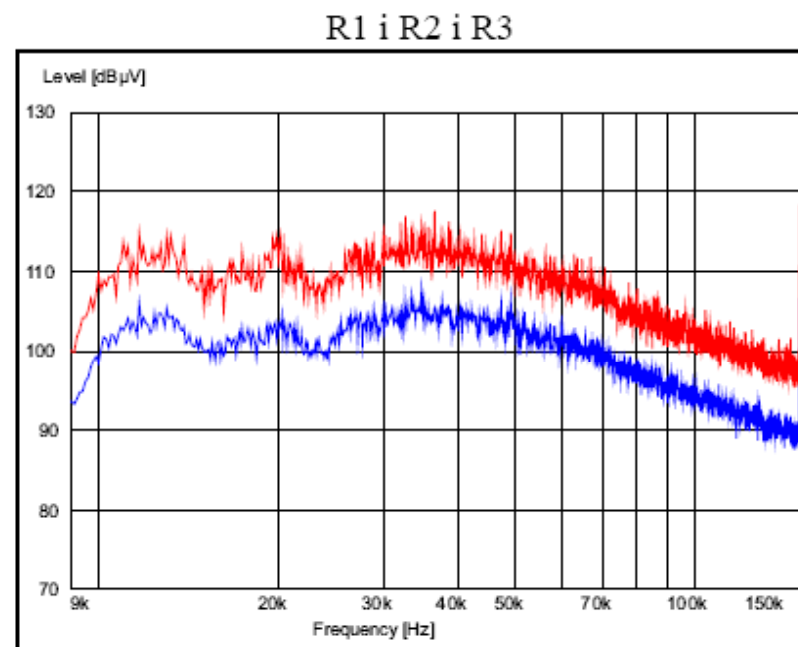
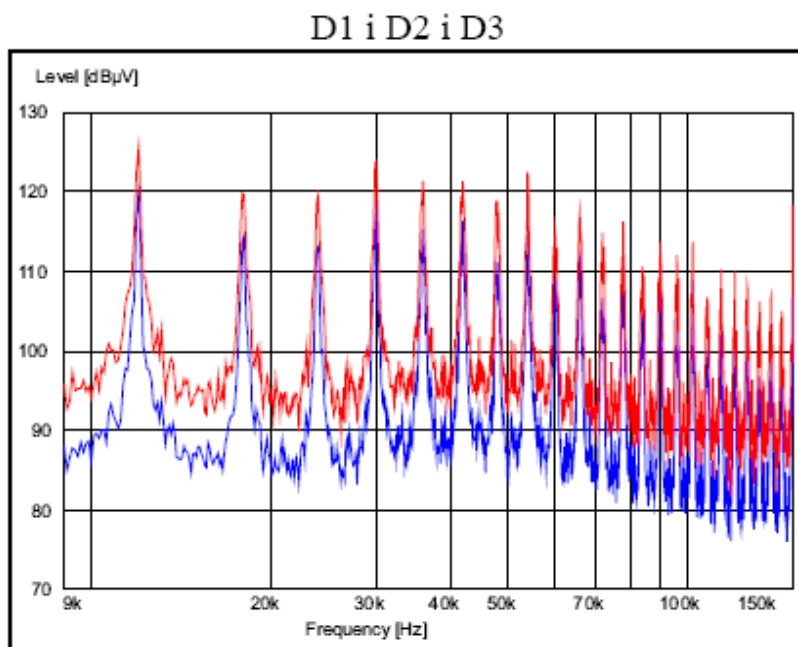
## Wynik pomiarowy



Spektrogramy przy częstotliwości łączeń falownika:

a) jeden przekształtnik, b.) dwa przekształtniki, c.) trzy przekształtniki

## Wynik pomiarowy

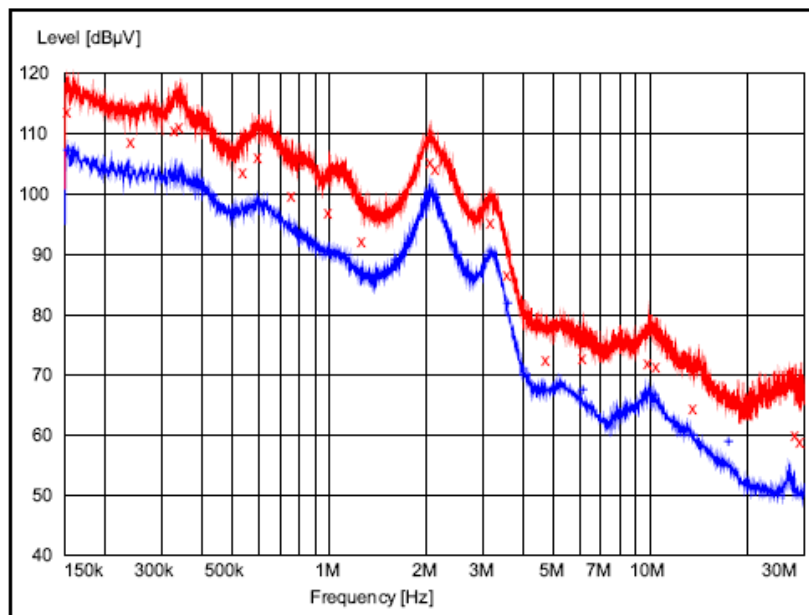


Wpływ selektywności odbiornika zaburzeń na wynik pomiaru zaburzeń zmodulowanych

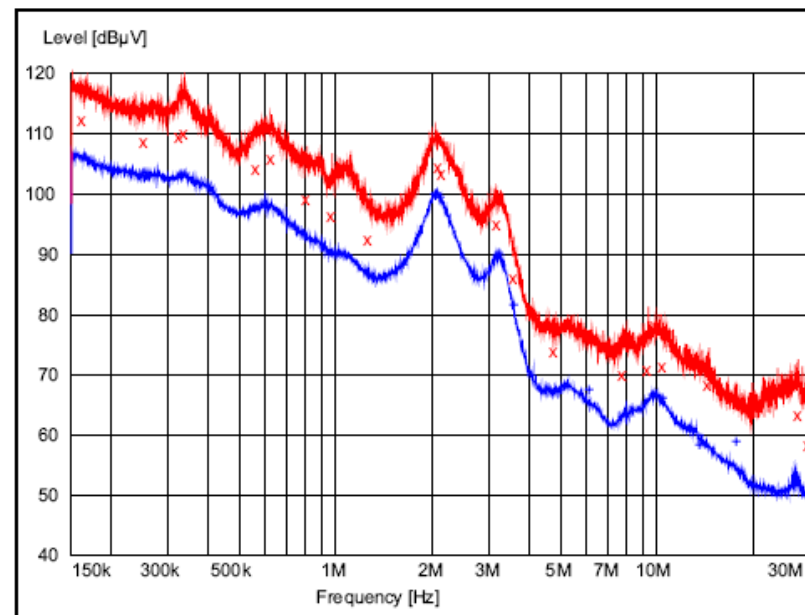
Widmo sumarycznych zaburzeń przewodzonych zmierzonych detektorem wartości szczytowej i średniej trzech przekształtników z modulacją: a.) deterministyczną b.) pseudolosową

## Wynik pomiarowy

D1 i D2 i D3



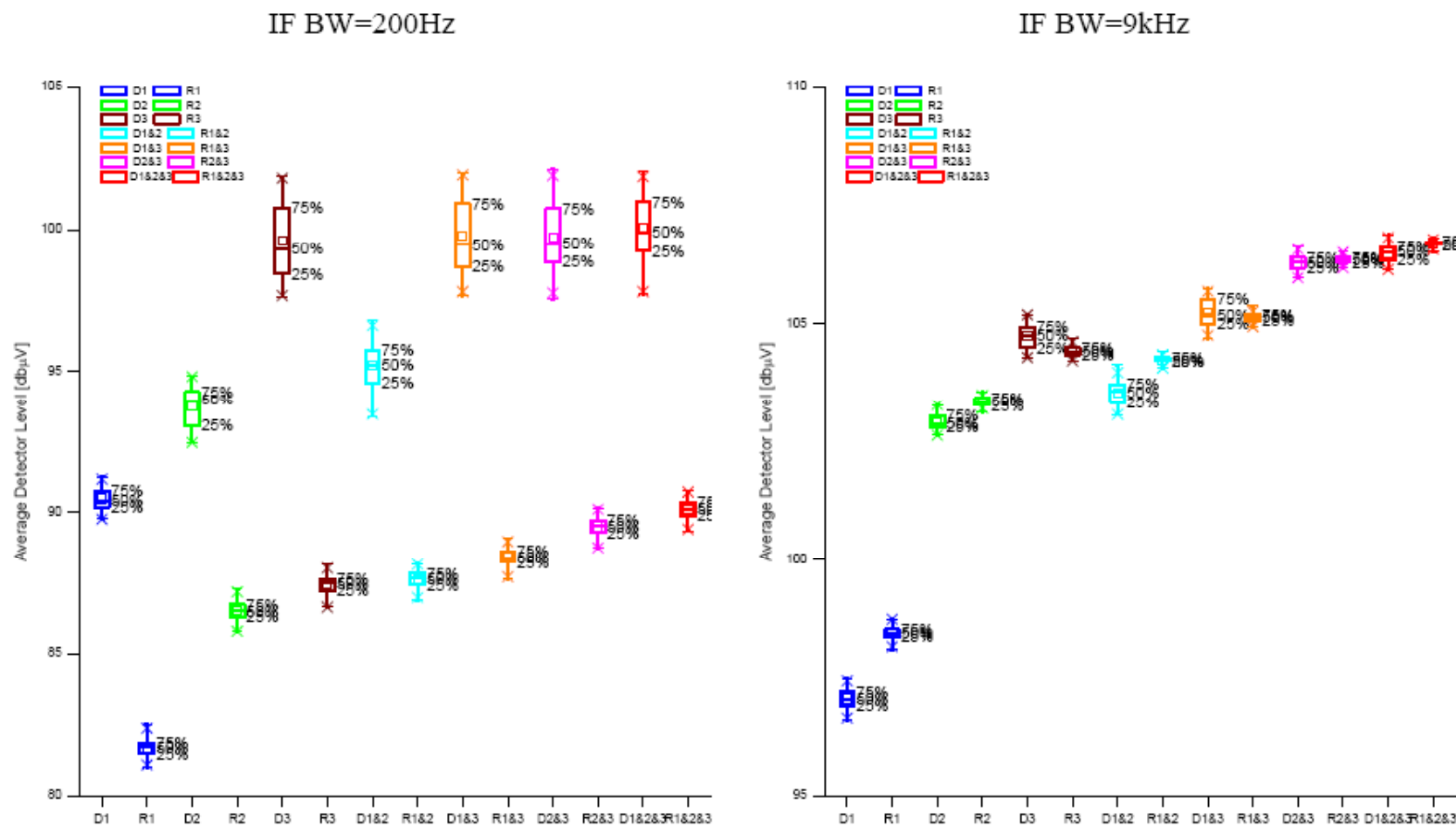
R1 i R2 i R3



Wpływ selektywności odbiornika zaburzeń na wynik pomiaru zaburzeń zmodulowanych

Widmo sumarycznych zaburzeń przewodzonych zmierzonych detektorem wartości szczytowej i średniej trzech przekształtników z modulacją: a.) deterministyczną b.) pseudolosową

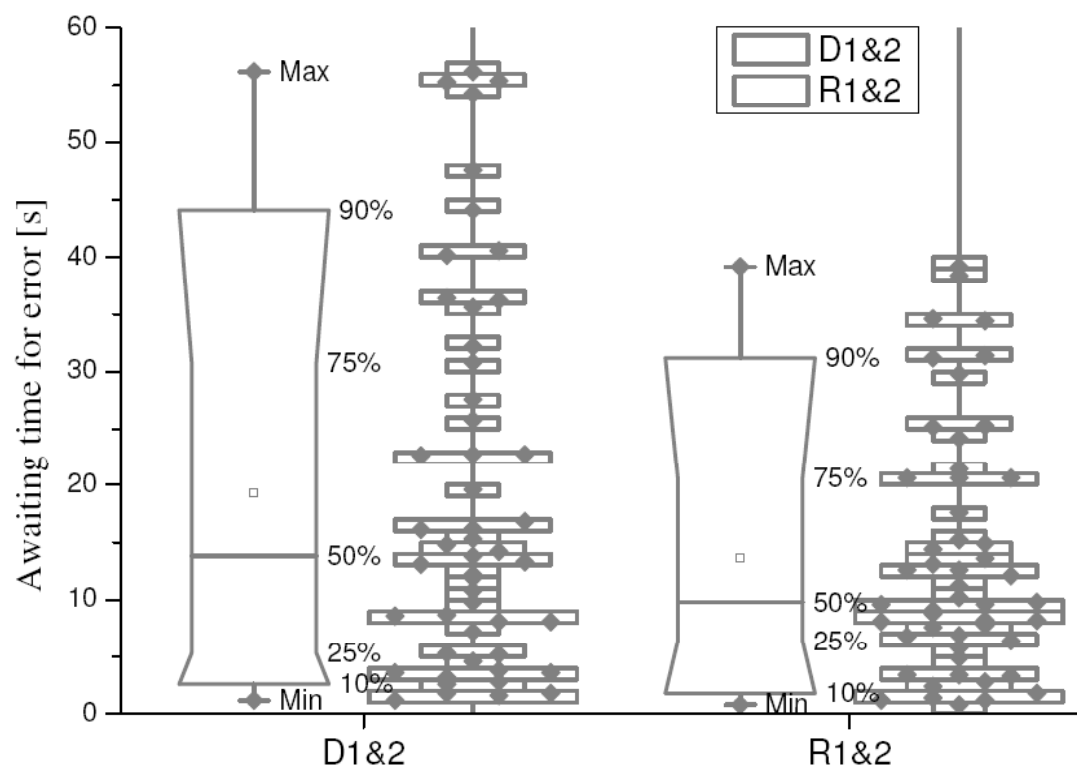
## Wynik pomiarowy



Wykresy pudełkowe wyników pomiarów finalnych zaburzeń przewodzonych wykonanych detektorem wartości średniej dla szerokości pasma filtra IF BW = 200 Hz oraz IF BW=9kHz

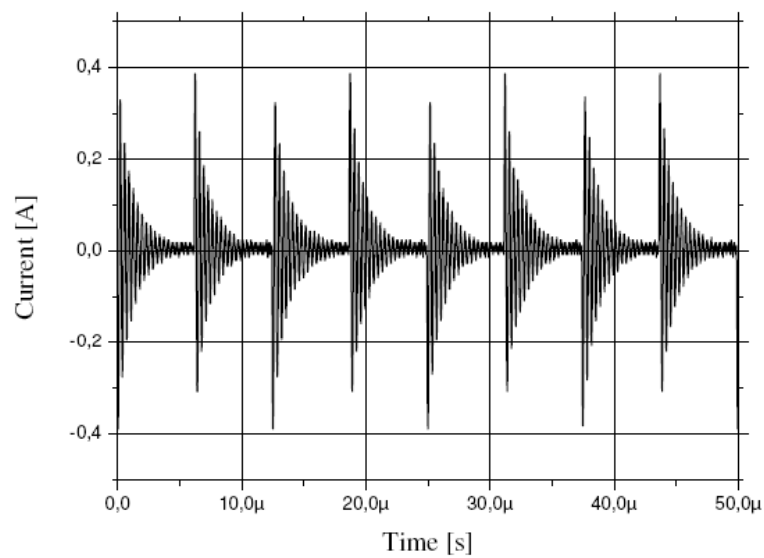
## Wynik pomiarowy

*Komunikacja w standardzie PROFIBUS pomiędzy dwoma sterownikami PLC*

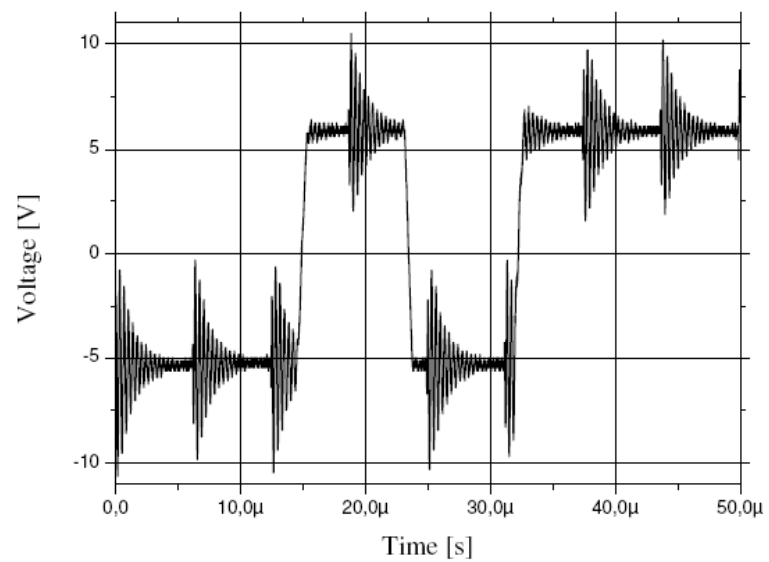


Wykres pudełkowy czasów oczekiwania na wystąpienie krytycznego błędu komunikacji w systemie z przekształtnikami z modulacją deterministyczną i pseudolosową

## Wynik pomiarowy

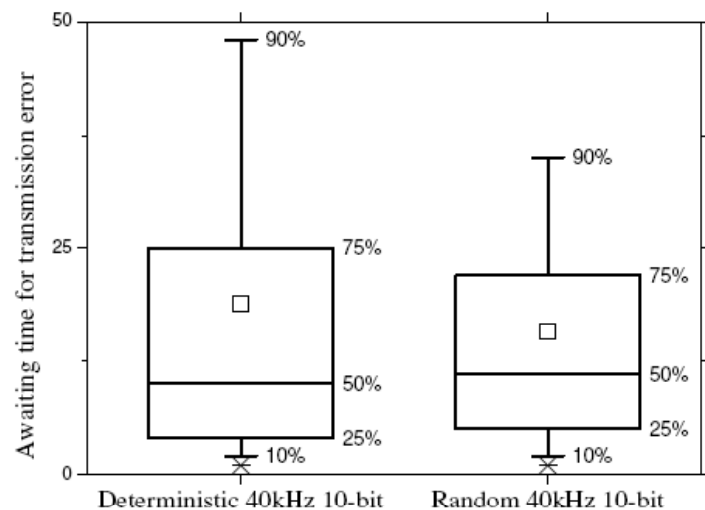


(a)

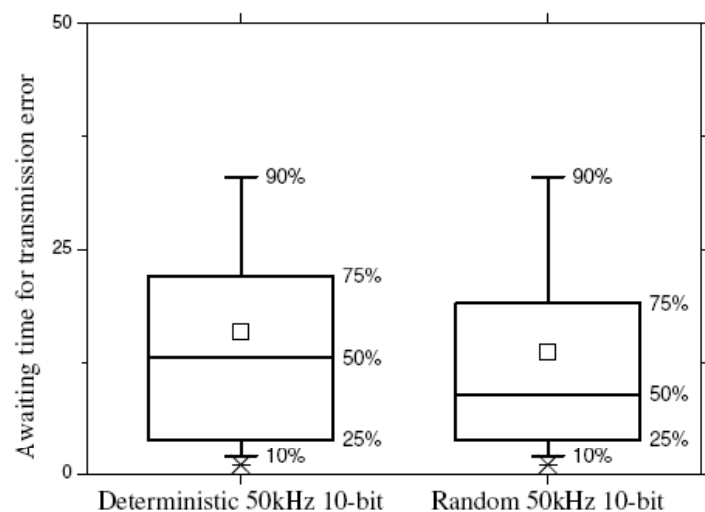


(b)

Prąd zaburzeń i napięcie w układzie komunikacji RS-232 z nałożonymi zaburzeniami



(a)



(b)

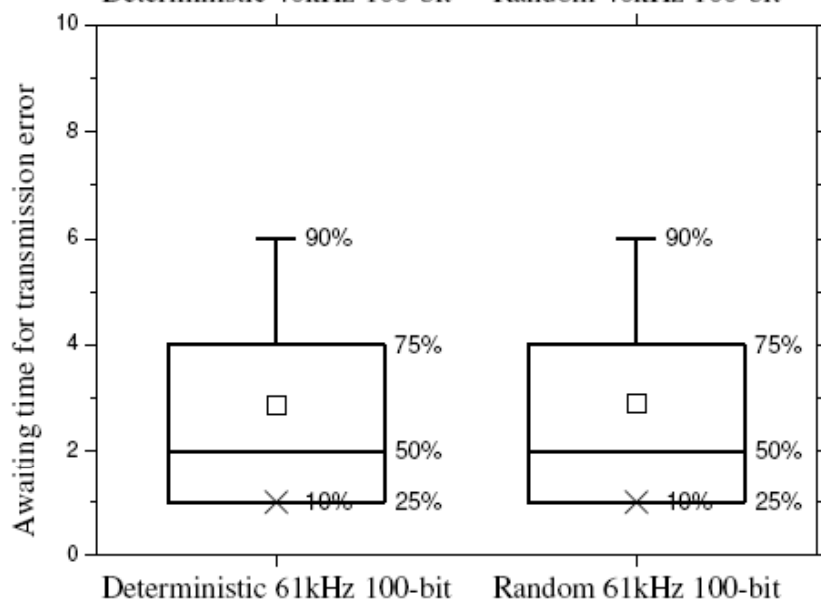
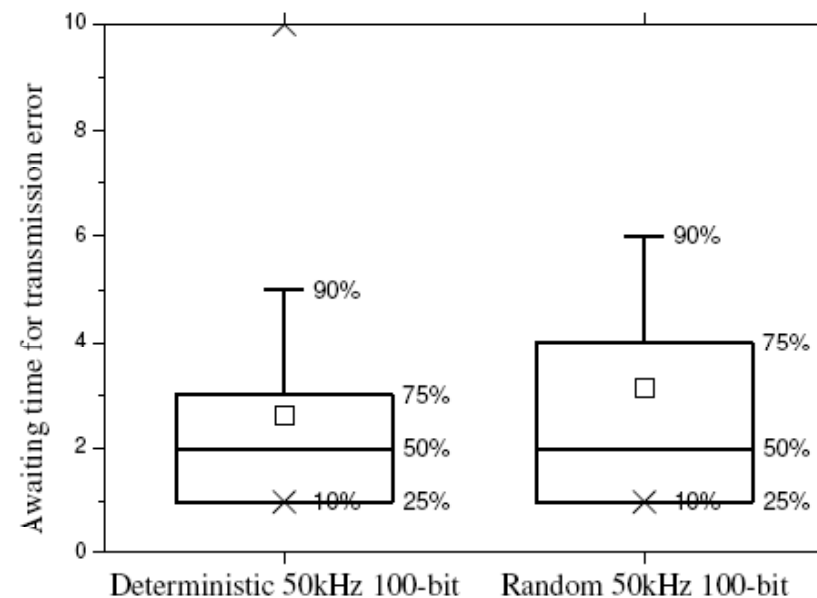
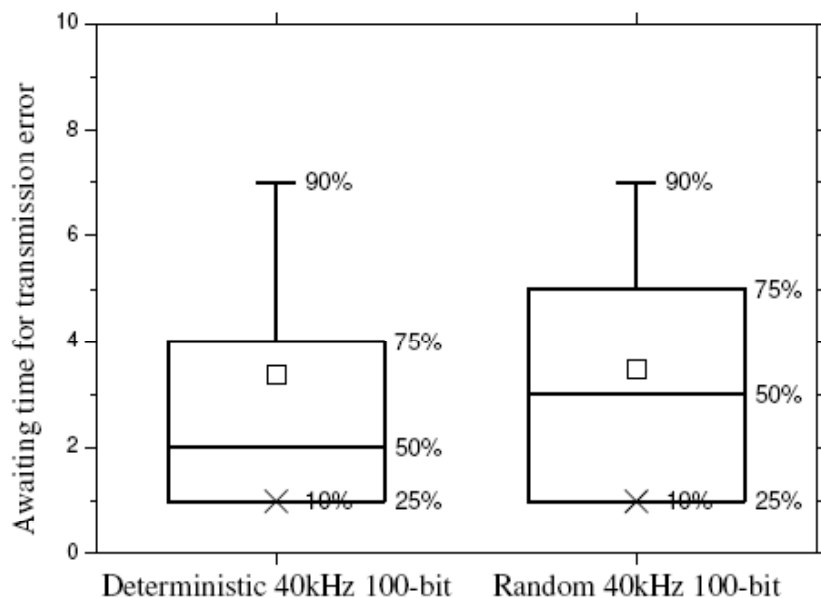
Wykresy pudełkowe czasów oczekiwania na wystąpienie błędu komunikacji wywołanych przez zaburzenia generowane przez przekształtnik z modulacją deterministyczną i pseudolosową dla częstotliwości łączy:

a. 40kHz,

b. 50kHz

Ramka 10 bitów

Wynik pomiarowy



Wykresy pudełkowe czasów oczekiwania na wystąpienie błędu komunikacji wywołanych przez zaburzenia generowane przez przekształtnik z modulacją deterministyczną i pseudolosową dla częstotliwości łączy:

- 40kHz,
- 50kHz
- 61kHz

Wynik pomiarowy

Ramka 100 bitów



$$i(t) = A \exp(-Bt) \sin(\omega t) H(t),$$

and

where

$$\omega = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T}, \quad B = \frac{\xi}{T}, \quad A = \frac{k}{T\sqrt{1-\xi^2}},$$

$\xi$  – damping factor,

$k$  – gain,

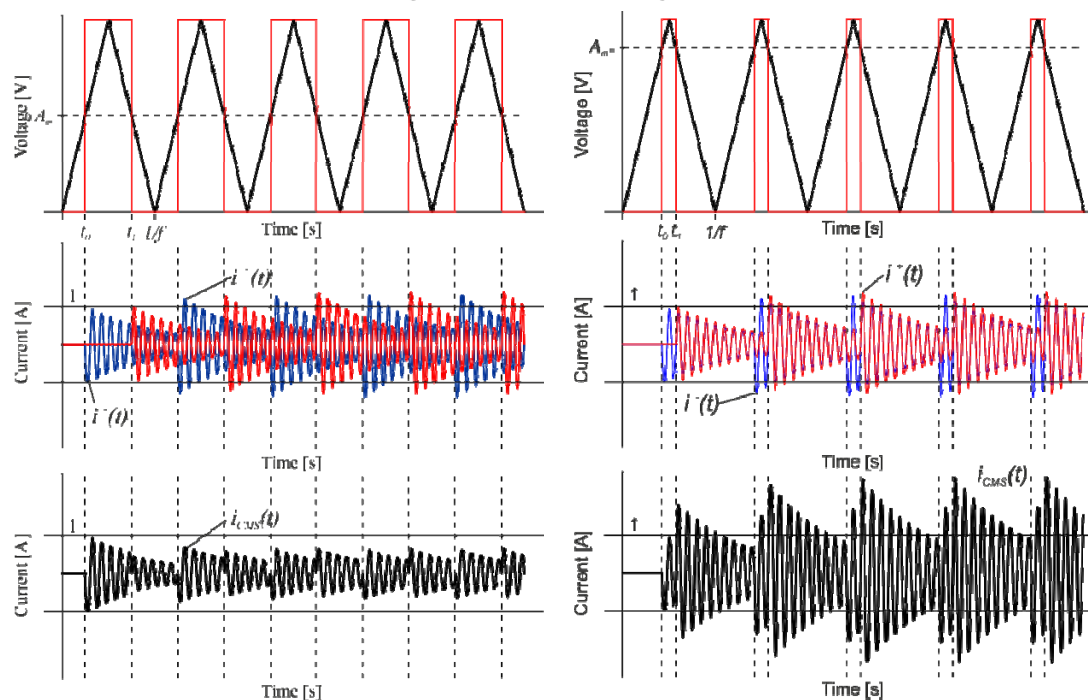
$T$  – period of current oscillation,

$H(t)$  – unit step function.

$$i^+(t) = i\left(t - \frac{A_m + 2n}{2f}\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

$$i^-(t) = -i\left(t - \frac{A_m + 2(n-1)}{2f}\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Wynik symulacyjny

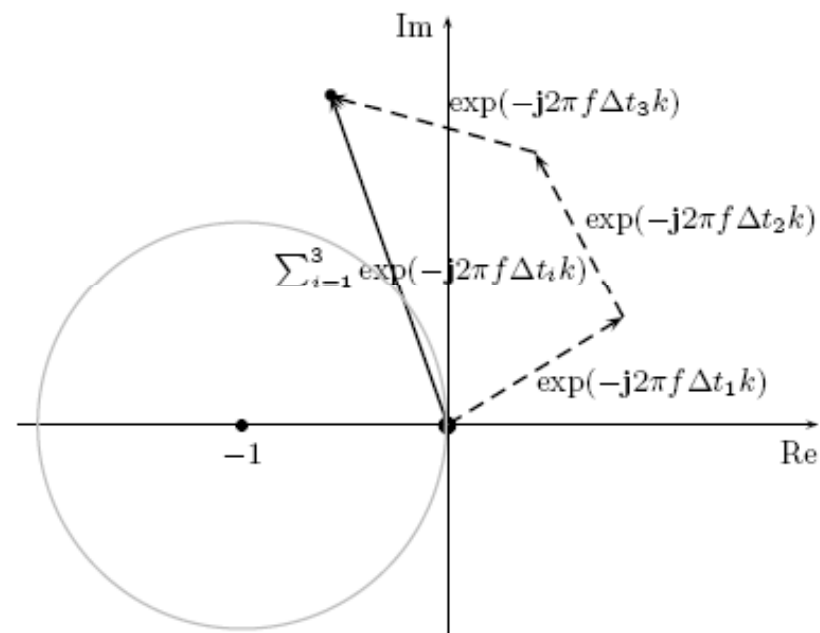


Napięcie wyjściowe i prąd zaburzeń przekształtnika DC/DC

$$\begin{aligned}\widehat{i}_{CM_S}[k] &= f \int_0^{\frac{1}{f}} i_{CM_S}(t) \exp(-j2\pi fkt) dt \\ &= \frac{A\omega^2 f}{(B\omega + j2\pi f k)^2 + \omega^2} (1 - \exp(j2\pi A_m k)).\end{aligned}$$

$$\widehat{i}_{CM_T}[k] = \widehat{i}_{CM_S}[k] \left( 1 + \underbrace{\sum_{i=1}^N \exp(-j2\pi f \Delta t_i k)}_{Z_k} \right).$$

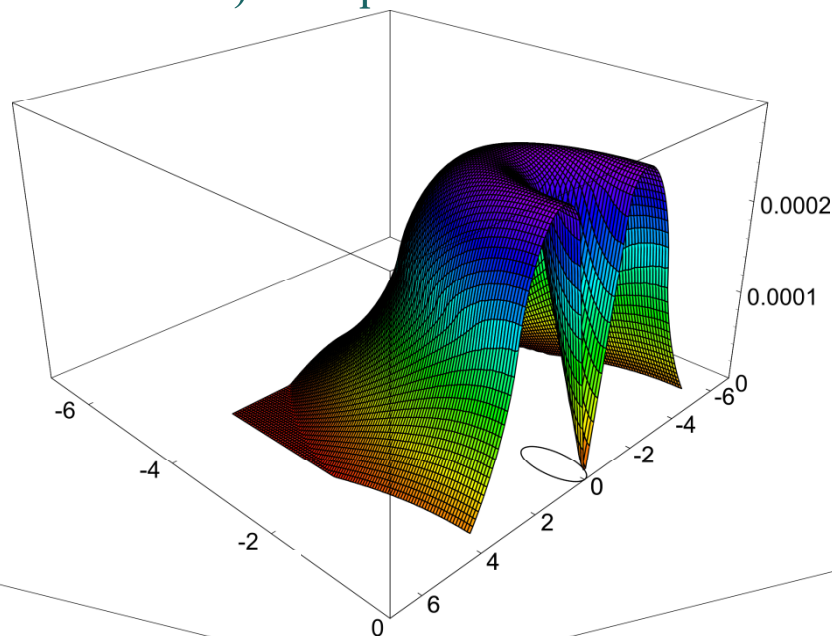
$$P(0 \leq |Z_k| \leq r) = r \int_0^{\infty} (J_0(t))^N J_1(rt) dt,$$



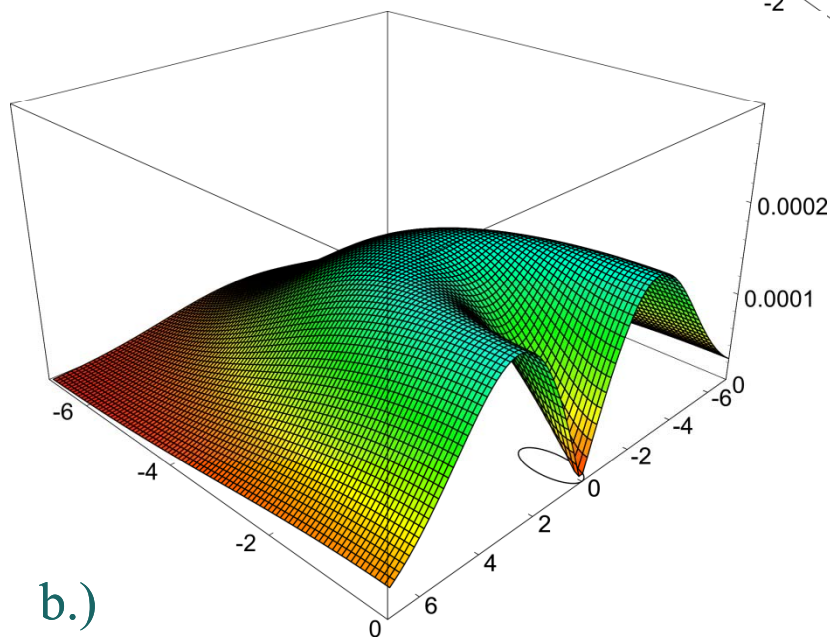
Wykresy opisujące prawdopodobieństwo zmniejszenia amplitudy  
 $k$ -tej harmonicznej dla: a.) 5-ciu przekształtników, b.) 15-tu przekształtników,  
c.) 30-tu przekształtników

Wynik symulacyjny

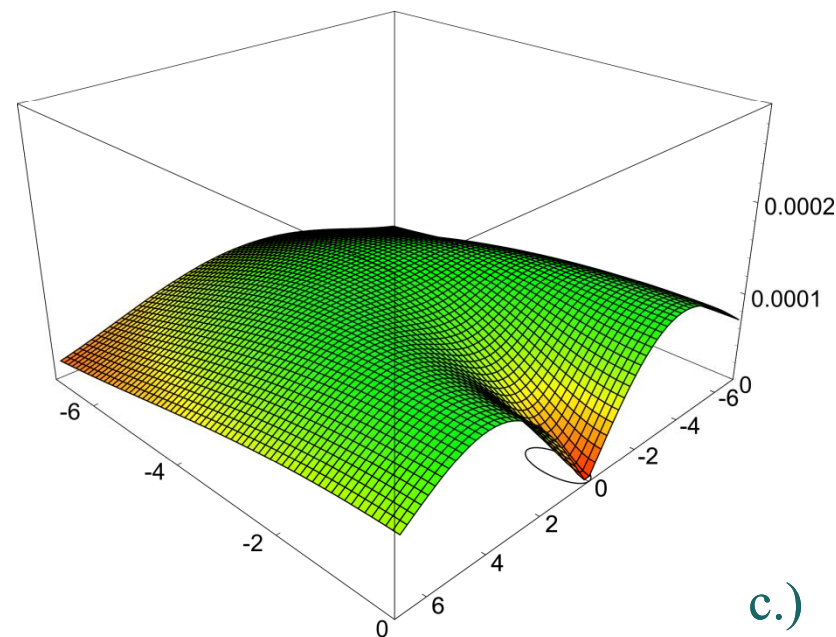
a.)



b.)

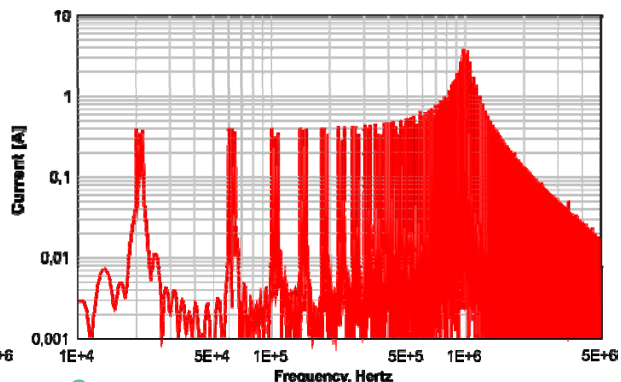
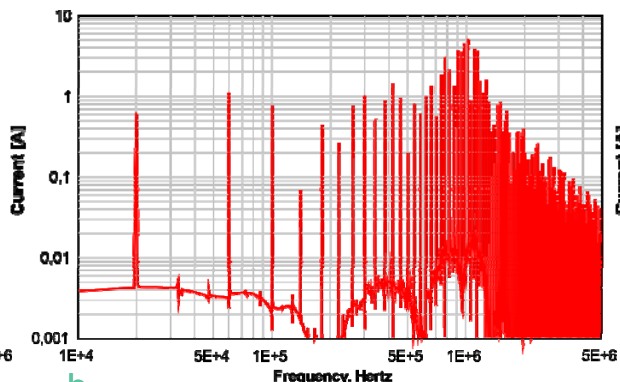
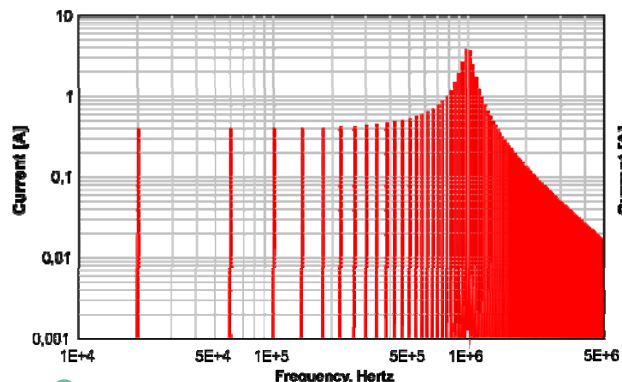


c.)



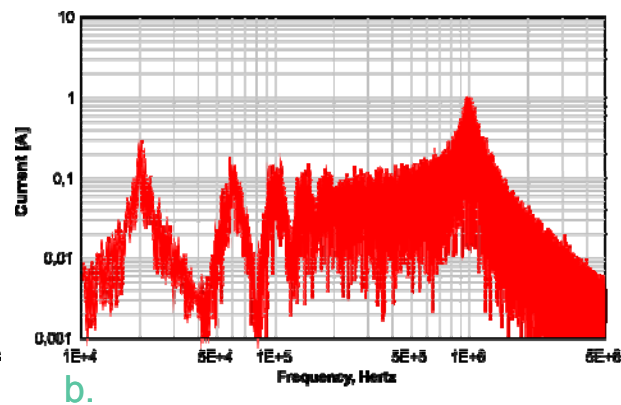
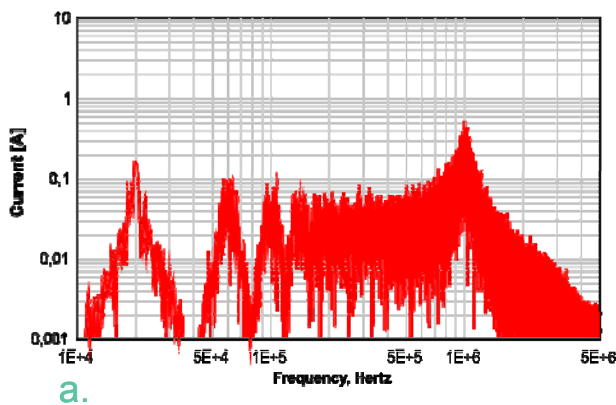
## Wynik symulacyjny

### Modulacja deterministyczna



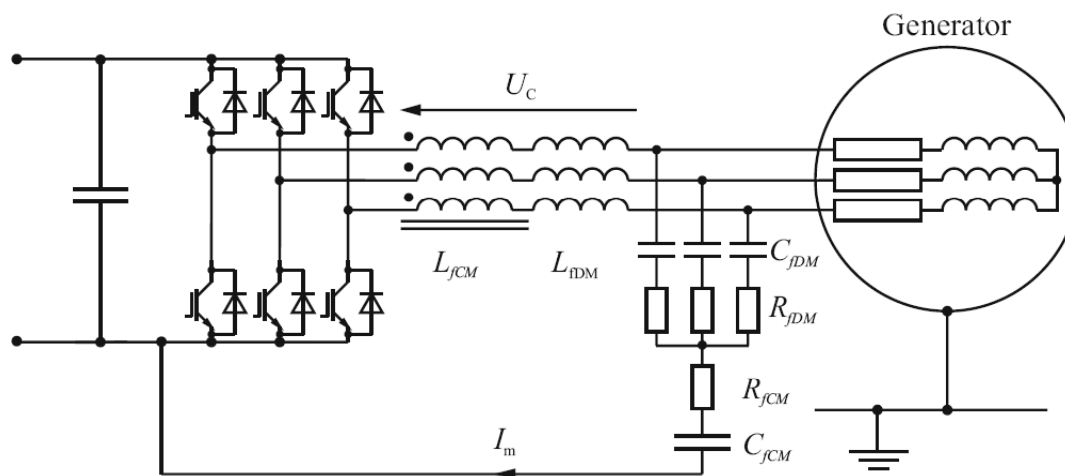
Widmo sumarycznego prądu CM: a. pojedynczy przekształtnik,  
b. trzy przekształtniki o identycznej częstotliwości łączy, c. trzy przekształtniki o różnej częstotliwości łączy

### Modulacja pseudolosowa

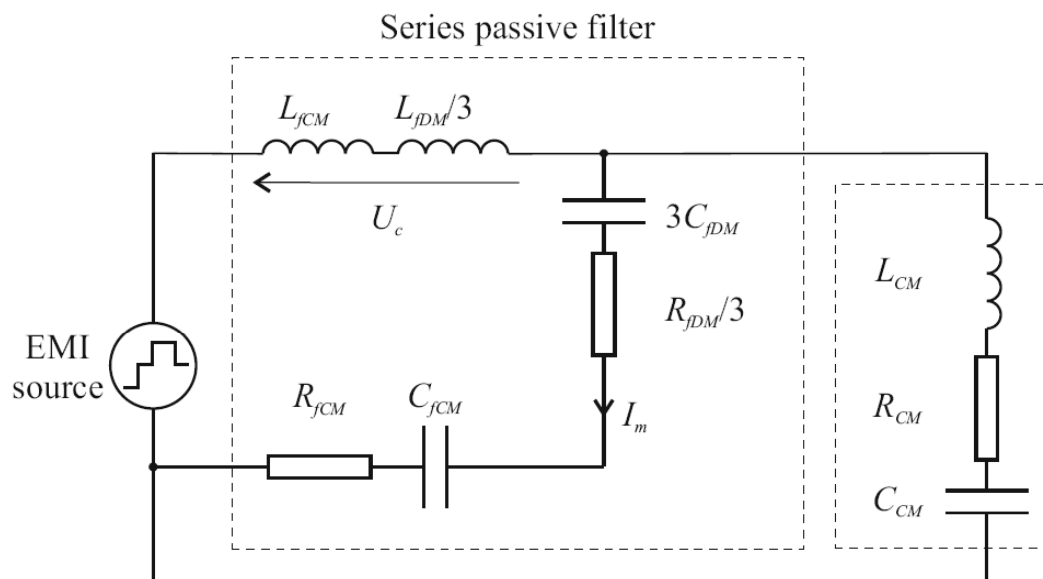


Widmo sumarycznego prądu CM: a. pojedynczy przekształtnik, b. trzy przekształtniki

# Kompensacja napięć zaburzeń generowanych przez interfejsy energoelektroniczne

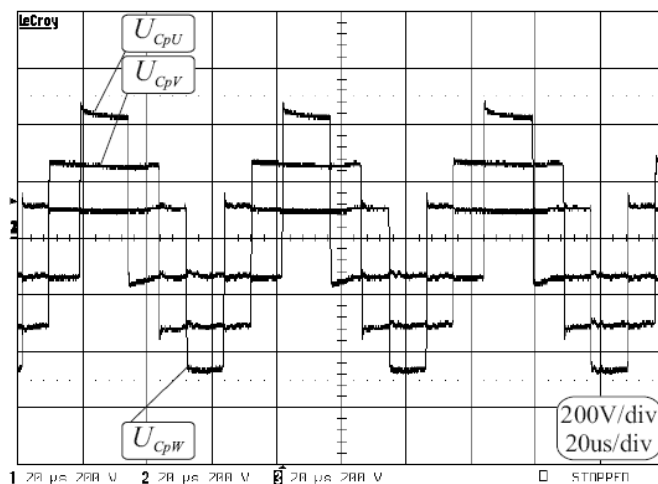


Pasywny kompensator napięcia CM na wyjściu falownika napięcia

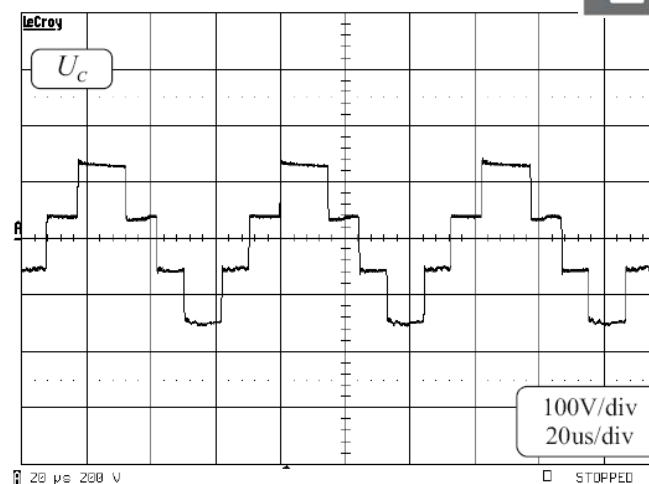


Schemat zastępczy dla składowej CM

Wynik  
pomiarowy

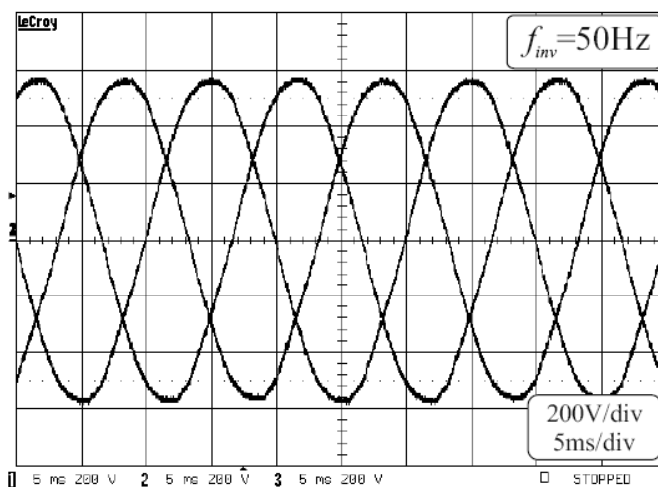


(a)

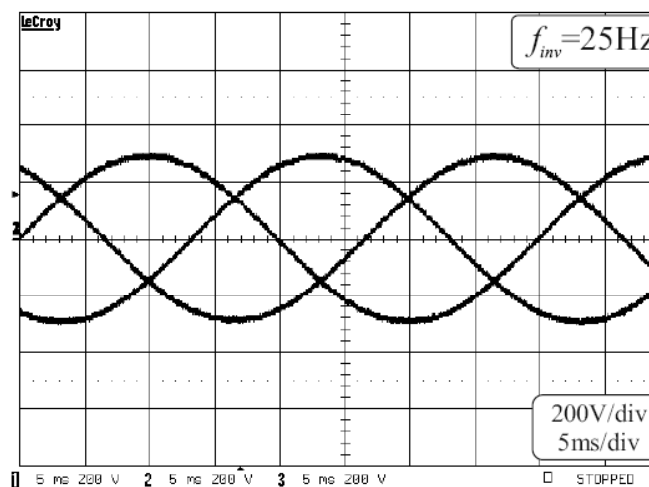


(b)

a. Spadki napięć na uzwojeniach dławika CM, b. Napięcie kompensujące CM



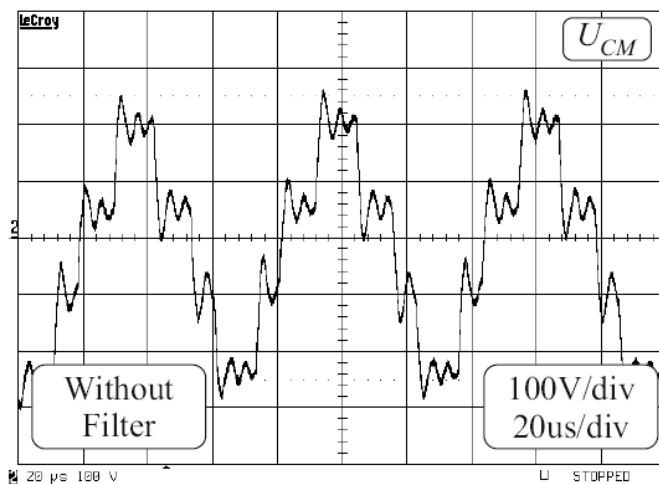
(a)



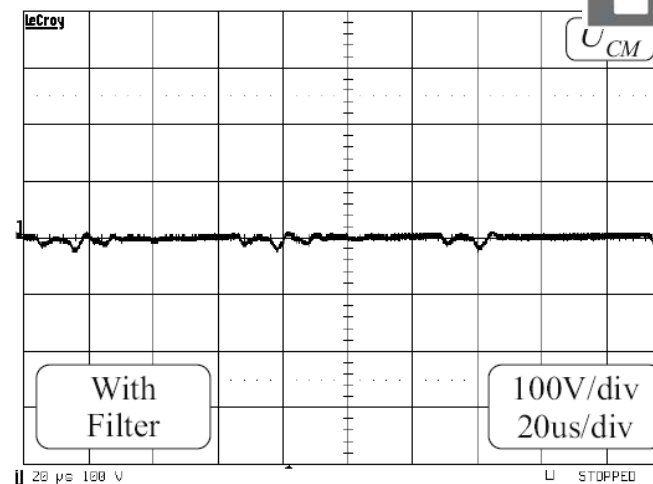
(b)

Wyjściowe napięcia międzyfazowe: a. 50Hz, b. 25Hz

Wynik  
pomiarowy

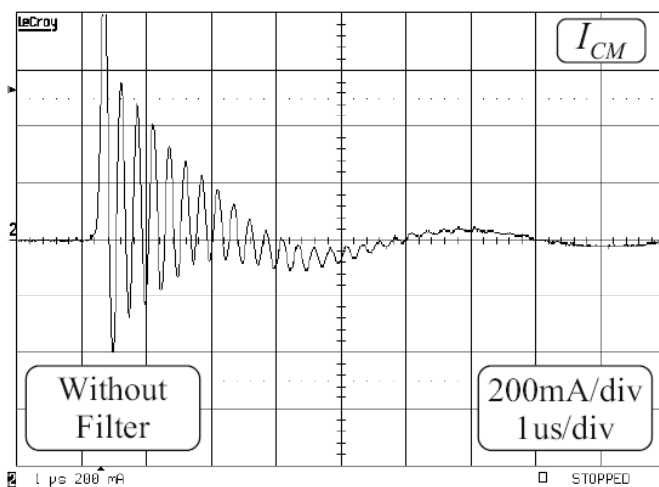


(a)

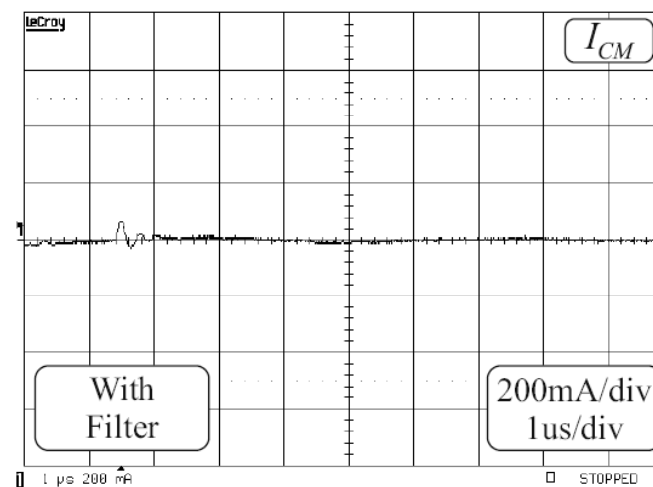


(b)

Napięcie CM: a. układ bez filtru, b. układ z pasywnym kompensatorem CM



(a)

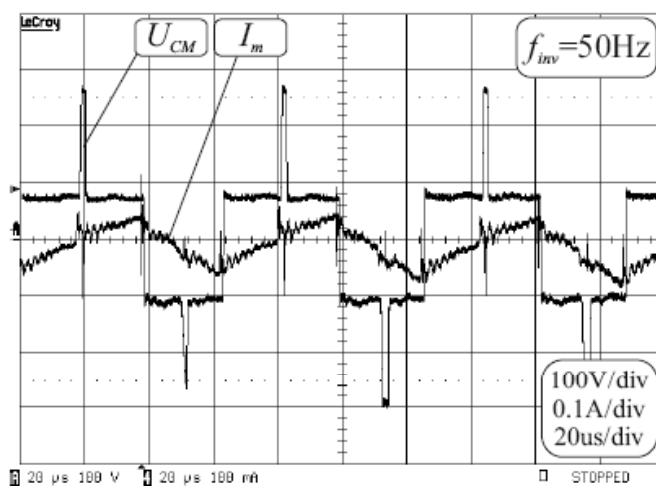


(b)

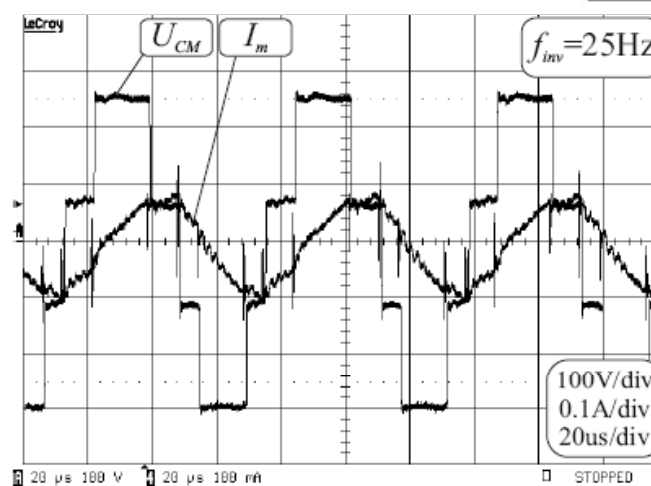
Prąd CM: a. układ bez filtru, b. układ z pasywnym kompensatorem CM



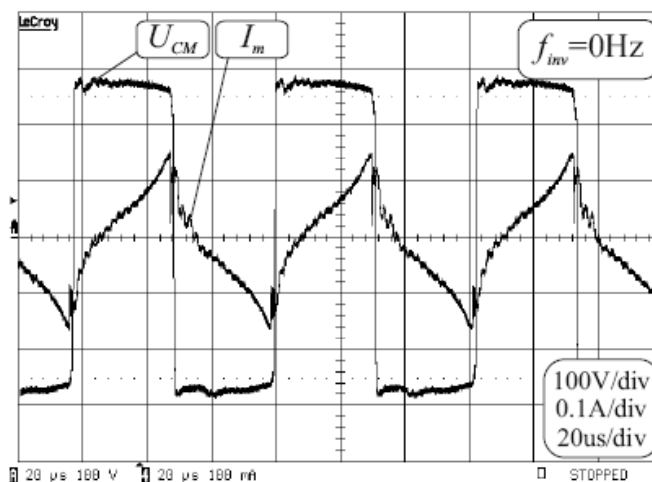
Wynik  
pomiarowy



(a)



(b)



(c)

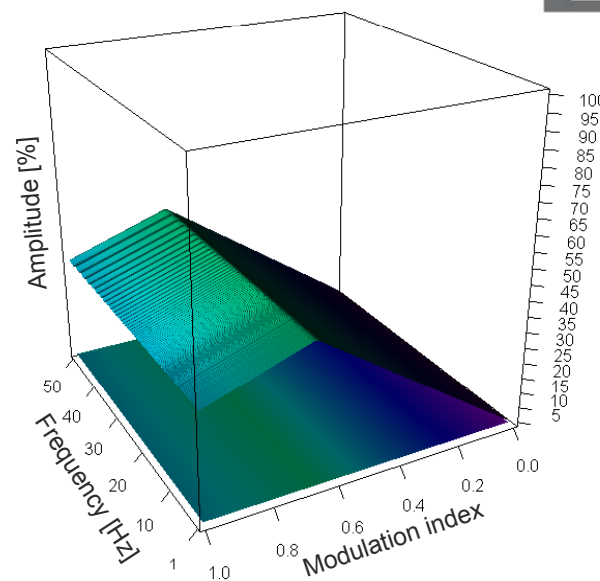
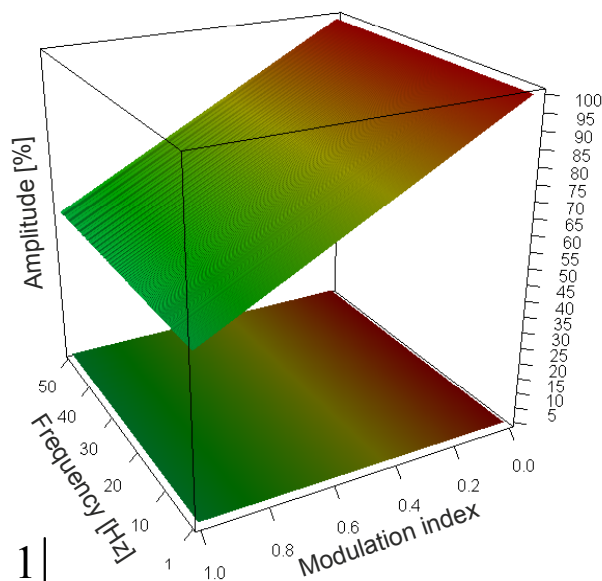
$$B = \frac{1}{S_n} \int u_{CM} dt$$

Napięcie CM i prąd magnesujący  $I_m$  dla częstotliwości wyjściowej falownika:

- a. 50Hz,
- b. 25Hz,
- c. 0Hz

Wynik  
symulacyjny

Dwupoziomowy



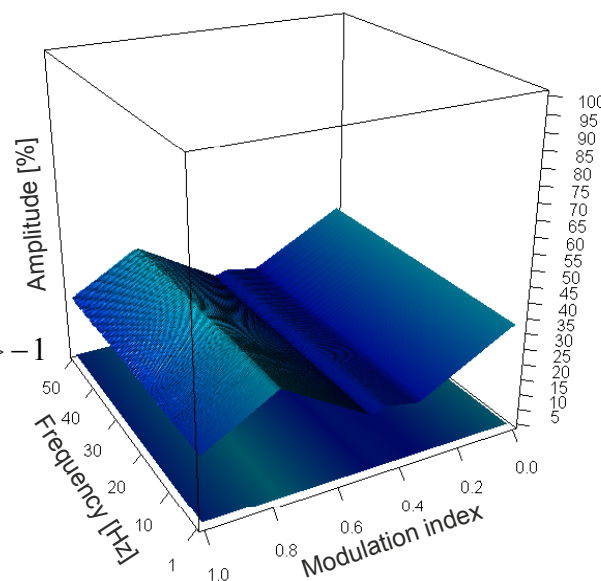
Trójpoziomowy

$$P(t) = 1 - 2 \left| \langle t \rangle - \frac{1}{2} \right|$$

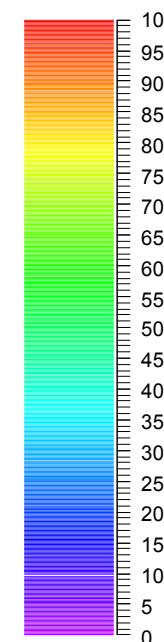
$$FPR_N^i(t) = \frac{2}{N} \left( P(t) + \frac{1}{2} N - i \right)$$

$$U_{CM}(t) =$$

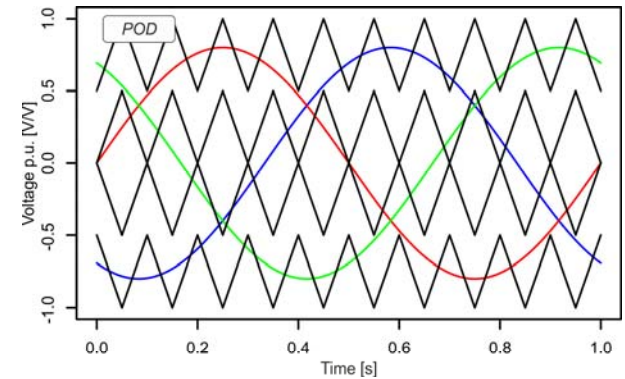
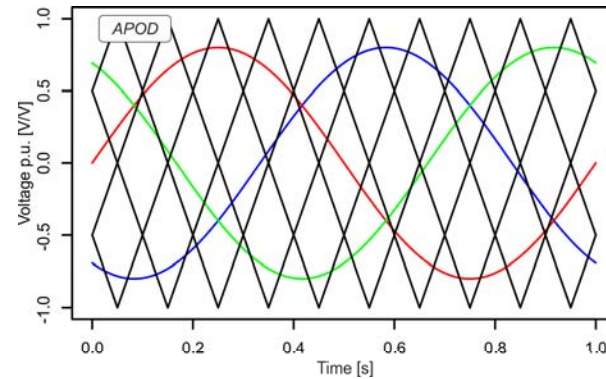
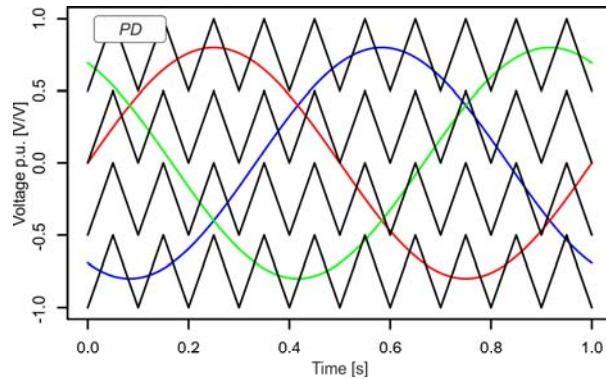
$$= \frac{2}{3N} \sum_{k=1}^1 \sum_{i=1}^N \left\{ H \left( A \sin \left( 2\pi f_{inv} t + \frac{2}{3} k\pi \right) - FPR_N^i(t) \right) \right\} - 1$$



Czteropoziomowy



Maksymalna wartość całki napięcia CM w zależności od częstotliwości wyjściowej i współczynnika głębokości modulacji



The triangular carrier functions for commonly used carrier based modulations PD, POD, APOD can be expressed as:

$$F_{PD}_N^i(t) = F_{PN}^i(f_{carr} \cdot t),$$

$$F_{POD}_N^i(t) = F_{PN}^i\left(f_{carr} \cdot t - \frac{1}{2}H(i-1-N \text{ div } 2)\right),$$

$$F_{APOD}_N^i(t) = F_{PN}^i\left(f_{carr} \cdot t + \frac{1}{2}(i \bmod 2 - 1)\right),$$

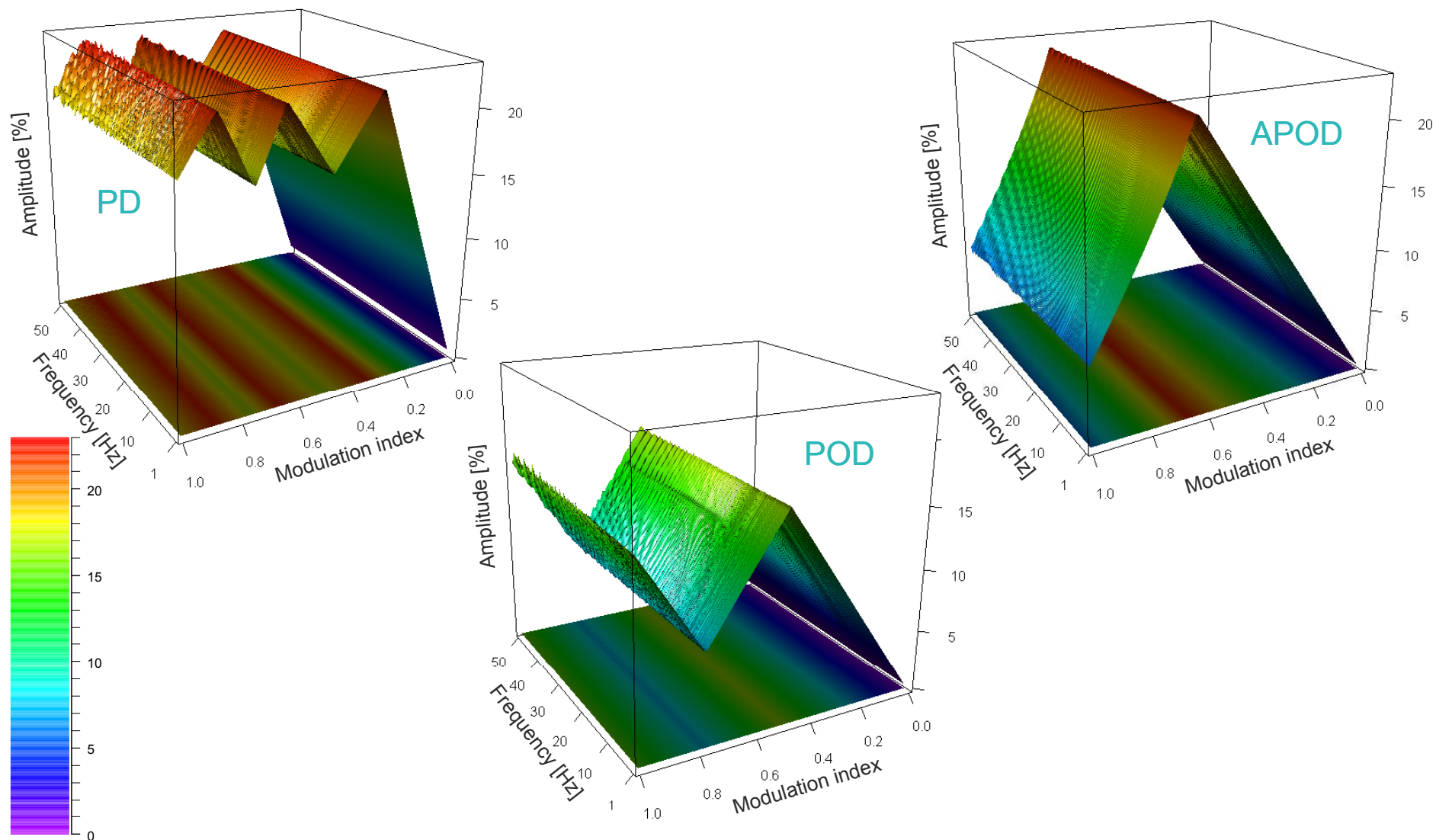
where:  $f_{carr}$  - carrier frequency,  $H$  - unit step function.

The CM voltage at the output of the  $N$ -level inverter for modulations PD, POD, APOD can be expressed by:

$$U_{CM}(t) = \frac{2}{3N} \sum_{k=-1}^1 \sum_{i=1}^N \left\{ H\left( A \sin\left( 2\pi f_{inv} t + \frac{2}{3}k\pi \right) - F_{PN}^i(t) \right) \right\} - 1,$$

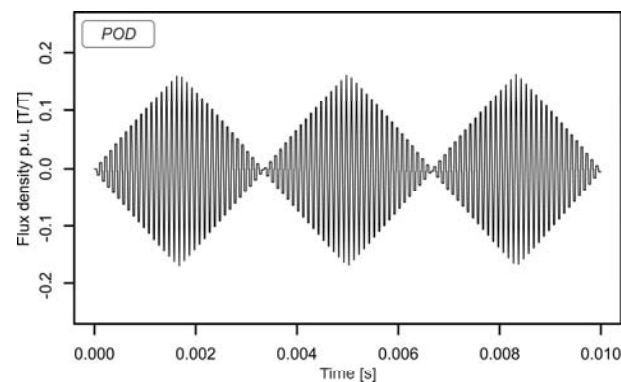
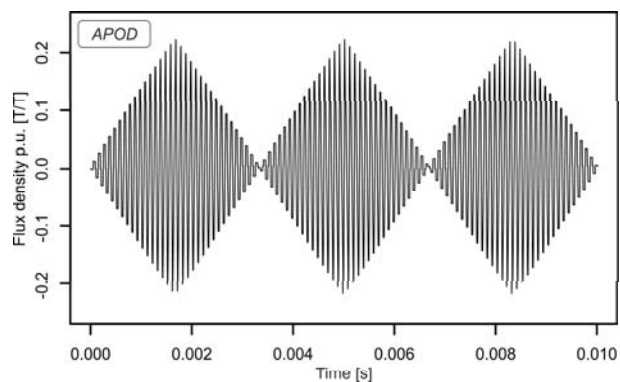
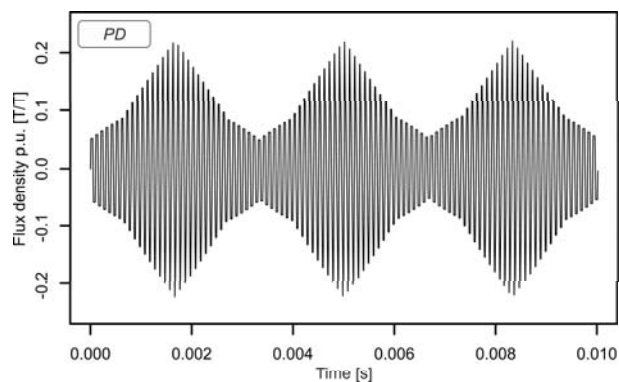
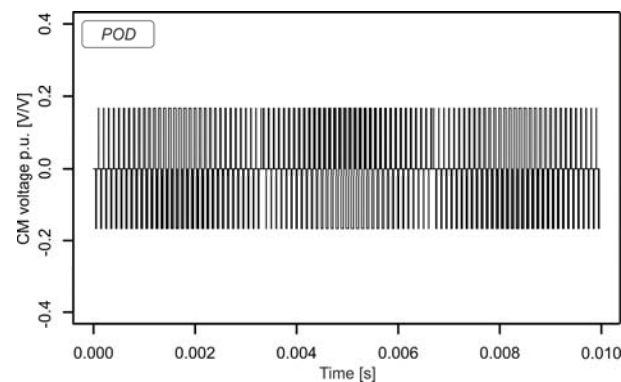
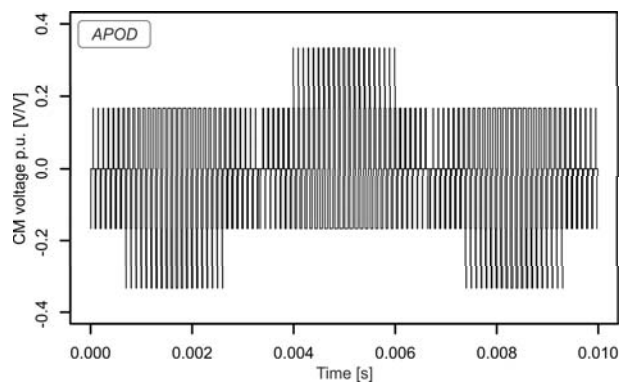
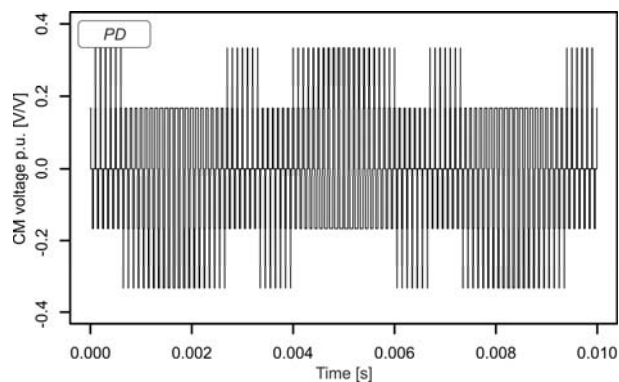
where:  $F_{PN}^i(t)$  - one of the functions ( $3 \div 5$ );  $k = -1, 0, 1$ ,  $f_{inv}$  - inverter output frequency.

## Wynik symulacyjny



Maksymalna wartość całki napięcia CM falownika pięciopoziomowego w zależności od częstotliwości wyjściowej i współczynnika głębokości modulacji

## Wynik symulacyjny



a)

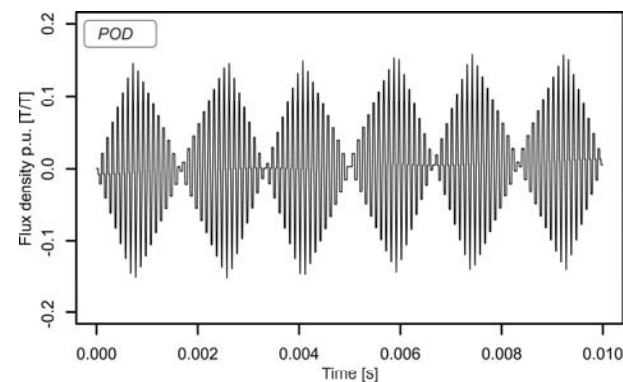
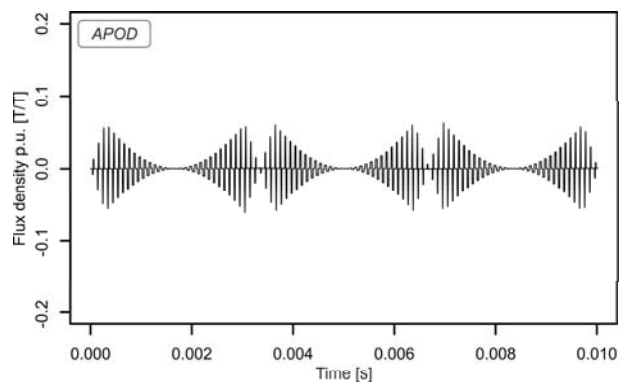
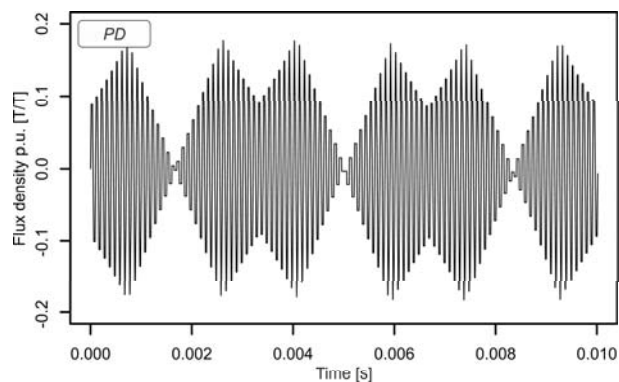
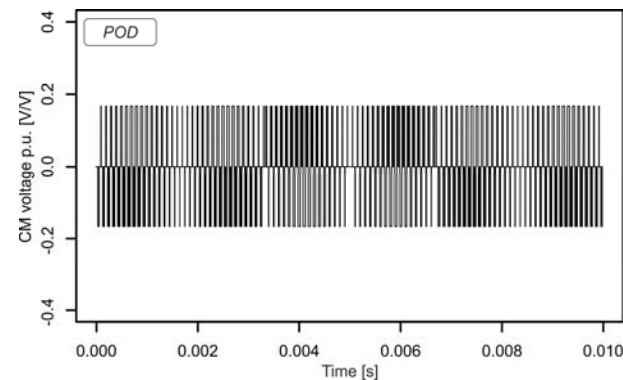
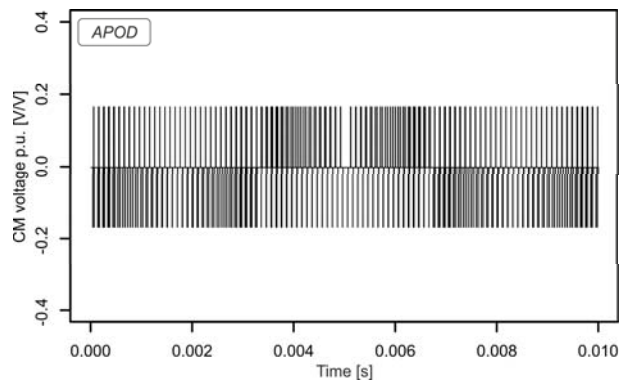
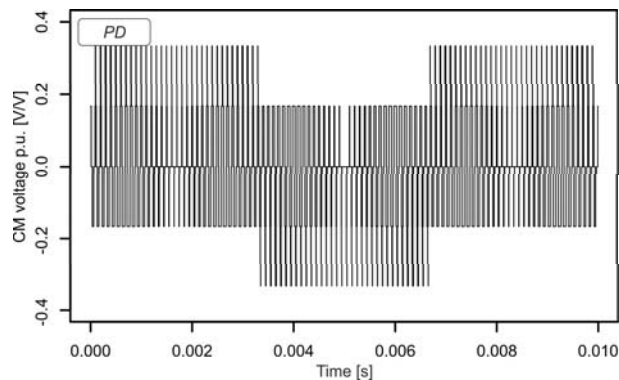
b)

c)

Najniższy poziom

Napięcie CM oraz całka z napięcia CM na wyjściu falowników pięciopozomowych dla „najgorszych przypadków” modulacji: a. PD, b. APOD, c. POD

## Wynik symulacyjny



a)

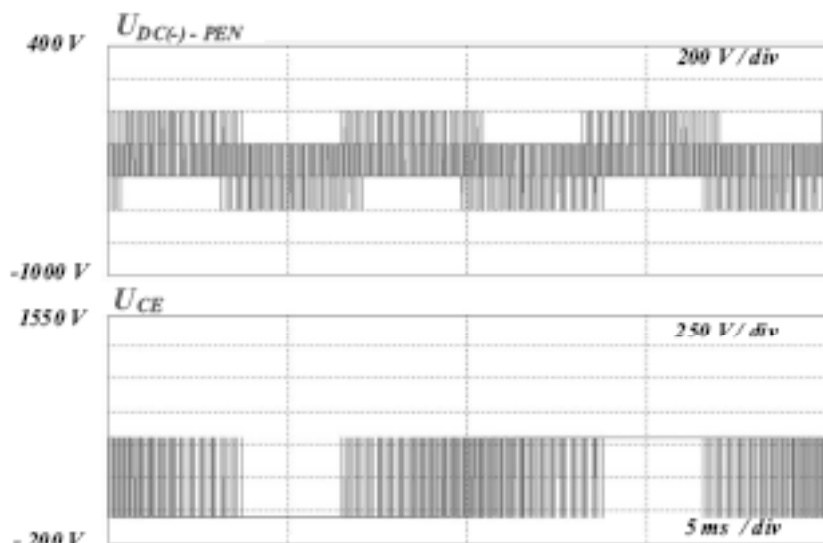
b)

c)

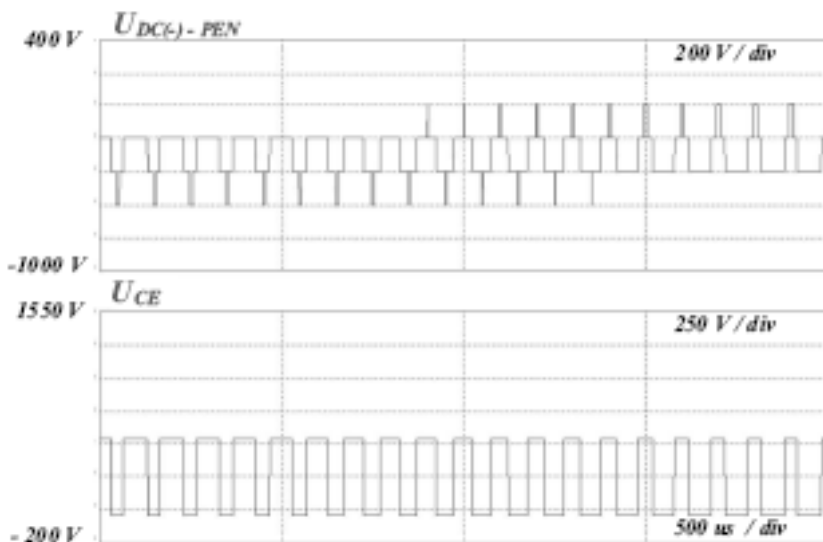
Najniższy poziom

Napięcie CM oraz całka z napięcia CM na wyjściu falowników pięciopoziomowych dla współczynnika modulacji  $M=1$ : a. PD, b. APOD, c. POD

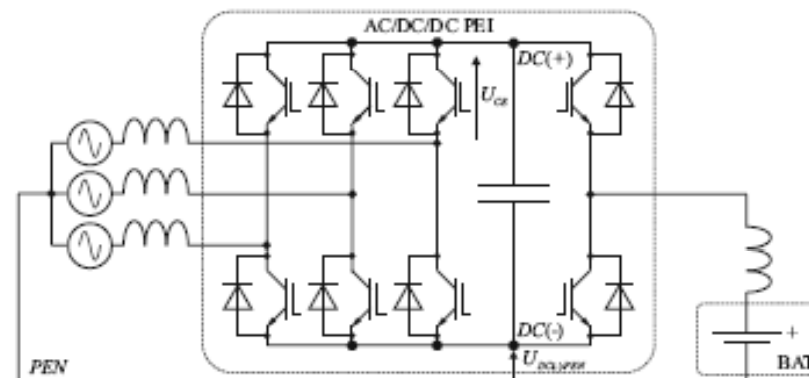
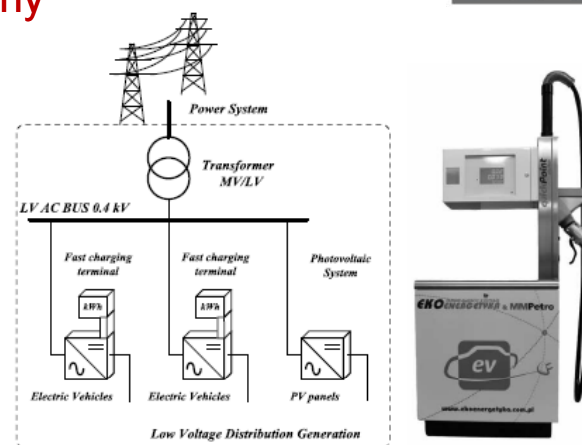
Wynik symulacyjny



(a)



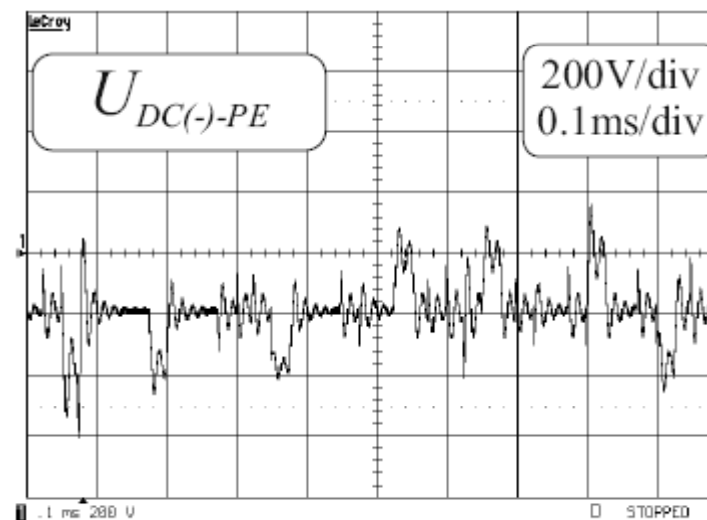
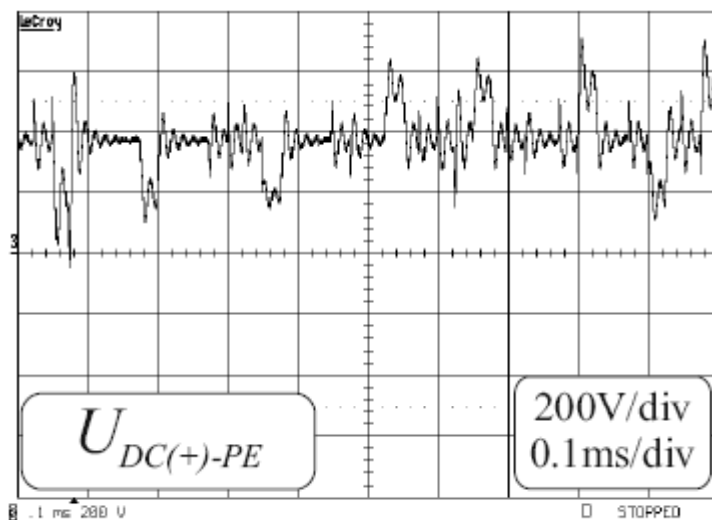
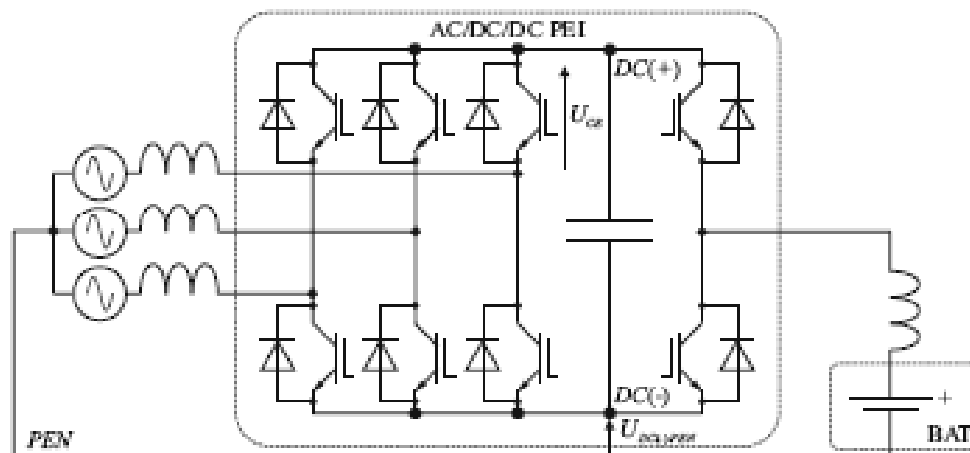
(b)



a. Napięcie pomiędzy ujemnym biegunem DC a uziomem i napięcie kolektor-emiter

b. Napięcie pomiędzy ujemnym biegunem DC a uziomem i napięcie kolektor-emiter (powiększenie)

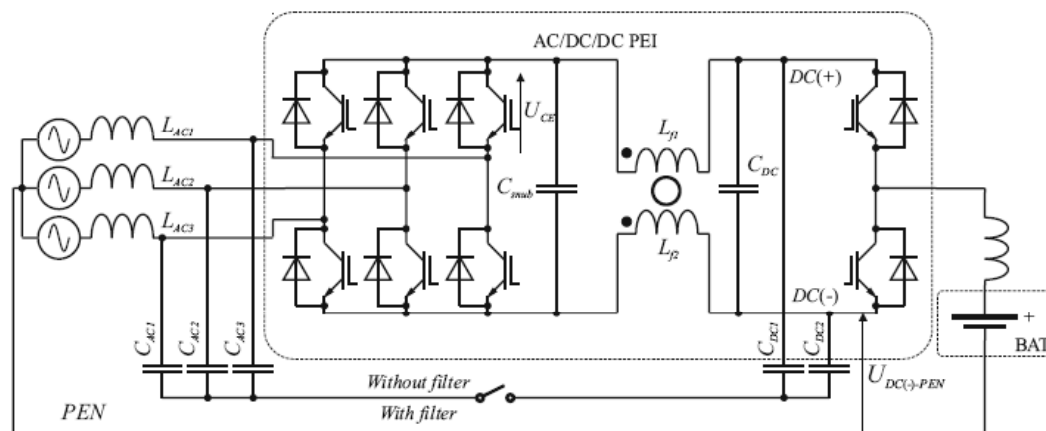
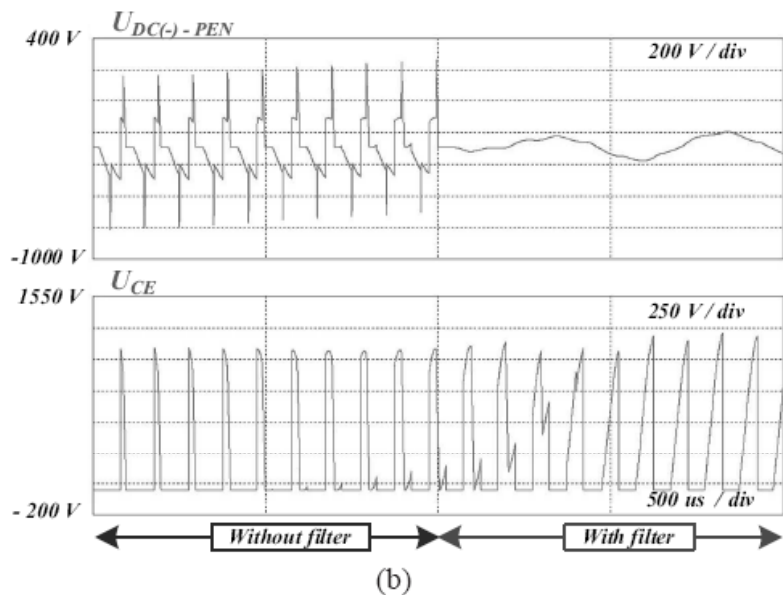
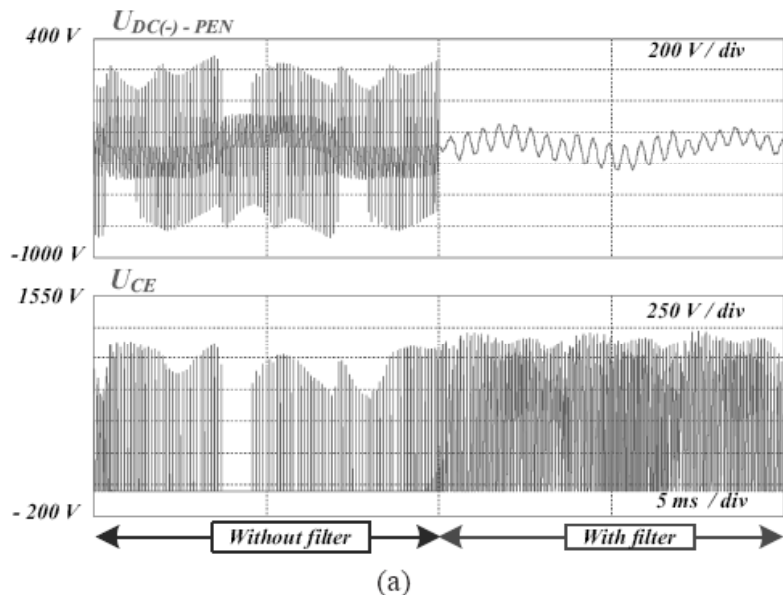
Wynik  
pomiarowy



Napięcia pomiędzy dodatnim i ujemnym biegunem DC a uziemem



Wynik symulacyjny



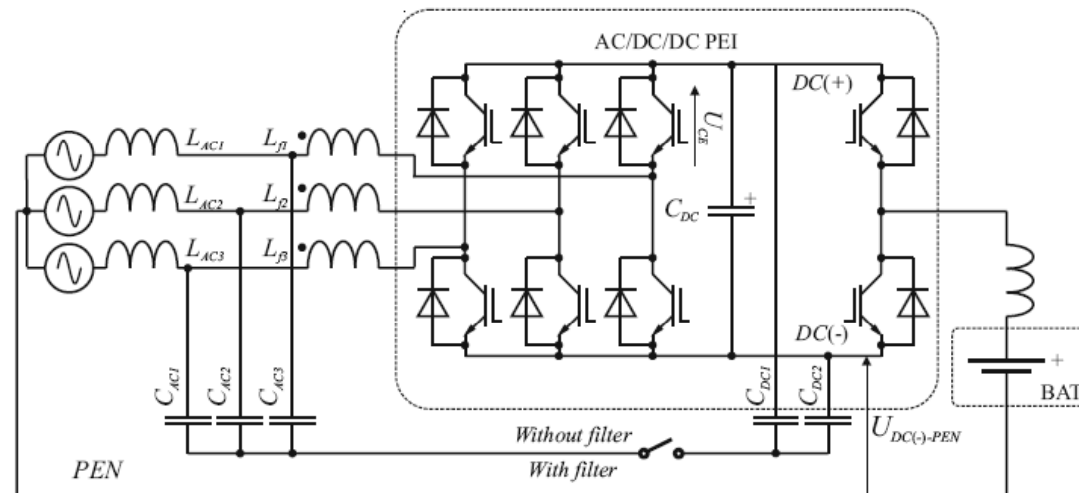
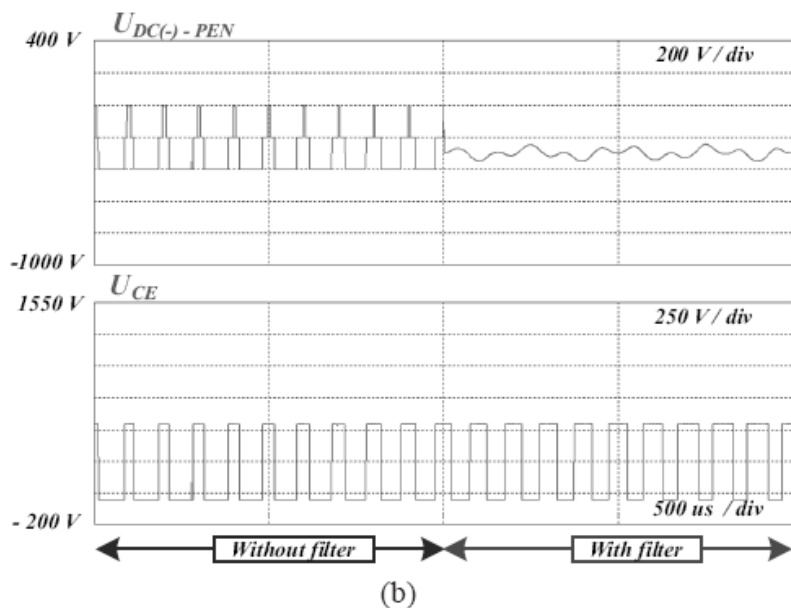
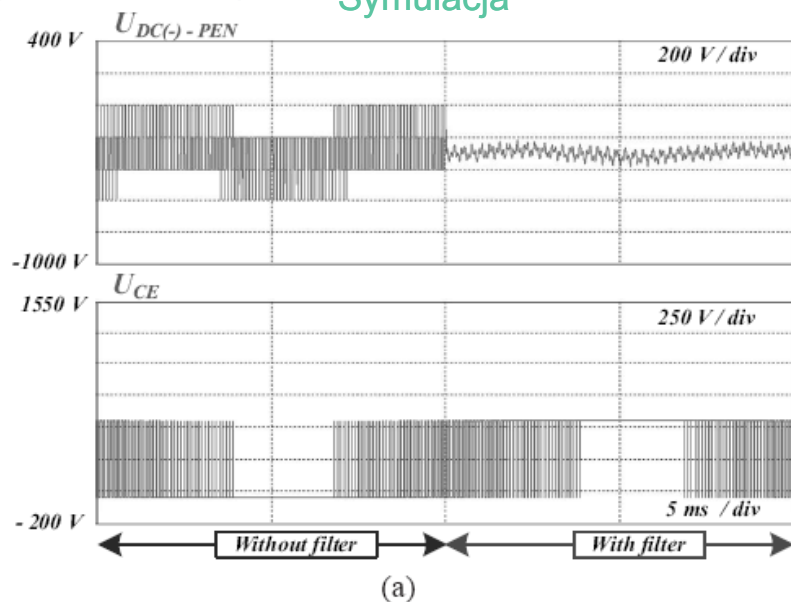
$$C_{AC1,2,3}=20\text{nF}, C_{DC1,2}=500\text{nF}, L_{f1,2}=100\text{mH}$$

a. Napięcie pomiędzy ujemnym biegunem DC a uziemem i napięcie kolektor-emiter

b. Napięcie pomiędzy ujemnym biegunem DC a uziemem i napięcie kolektor-emiter (powiększenie)

Symulacja

Wynik symulacyjny

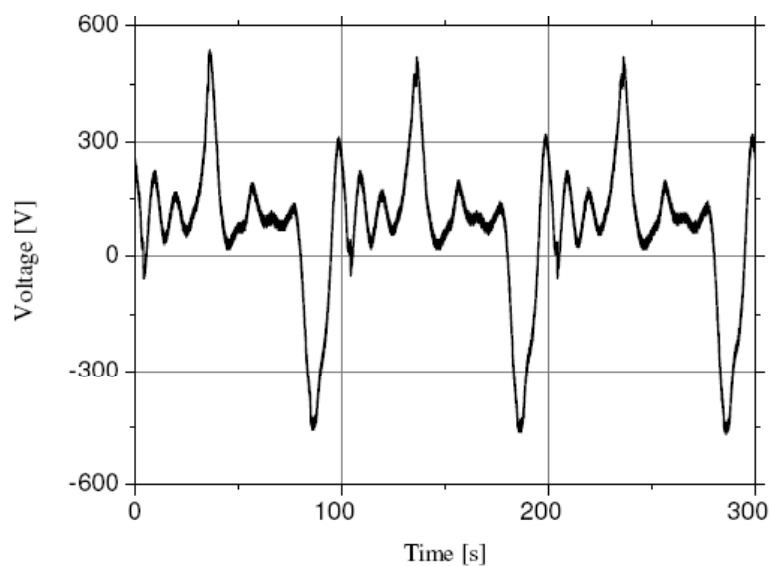


$$C_{AC1,2,3}=20\text{nF}, C_{DC1,2}=5\mu\text{F}, L_{f1,2}=5\text{mH}$$

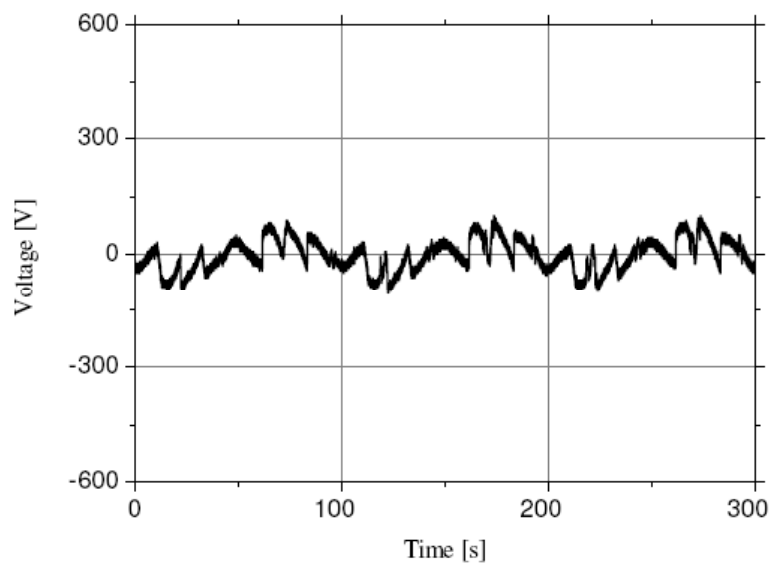
a. Napięcie pomiędzy ujemnym biegunem DC a uziomem i napięcie kolektor-emiter

b. Napięcie pomiędzy ujemnym biegunem DC a uziomem i napięcie kolektor-emiter (powiększenie)

Wynik  
pomiarowy



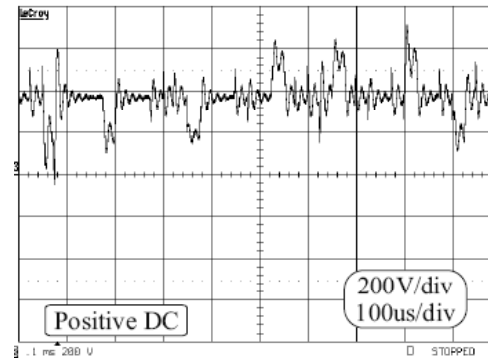
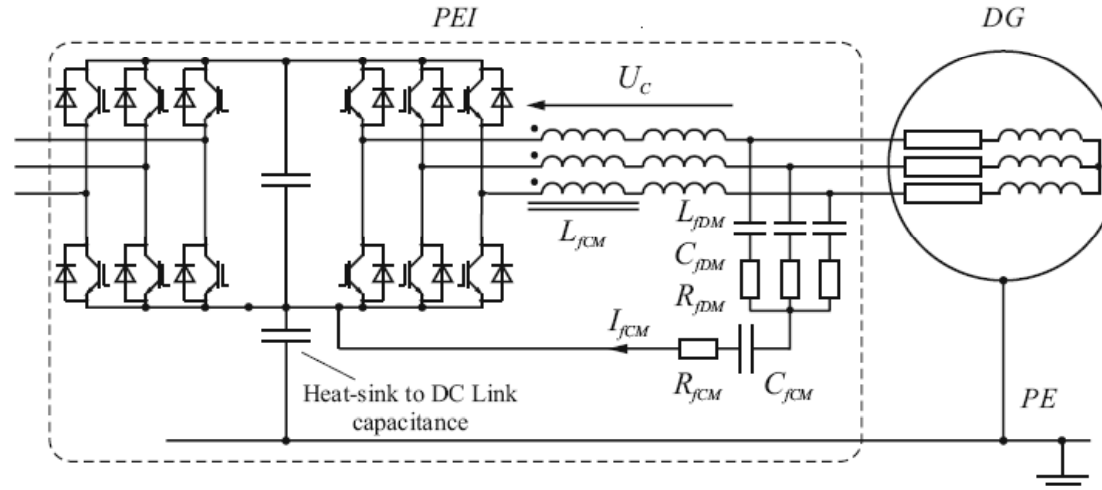
(a)



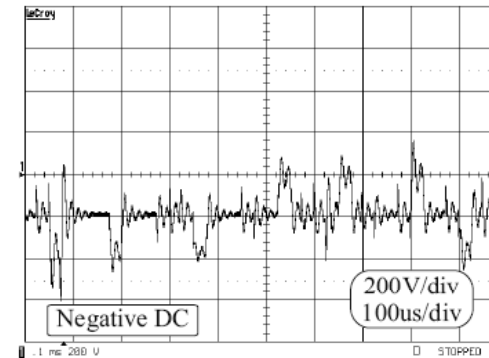
(b)

Napięcie pomiędzy ujemnym biegunem DC  
a uziomem: a. bez filtra, b. z filtrem

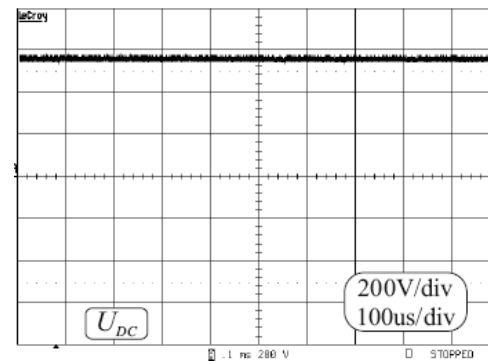
Wynik  
pomiarowy



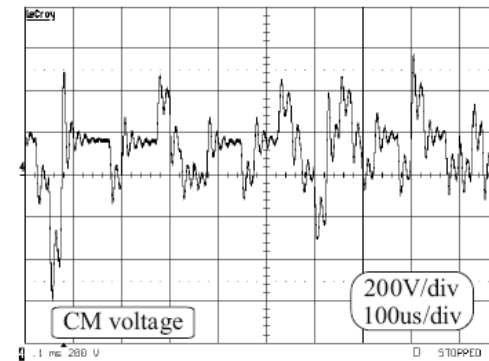
(a)



(b)

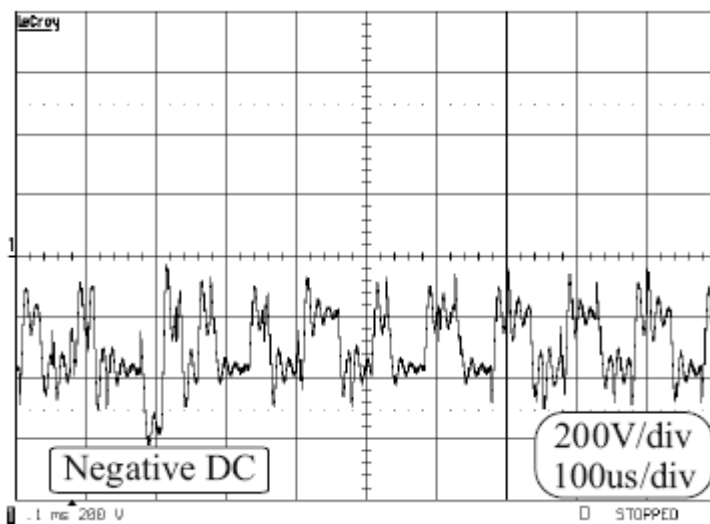
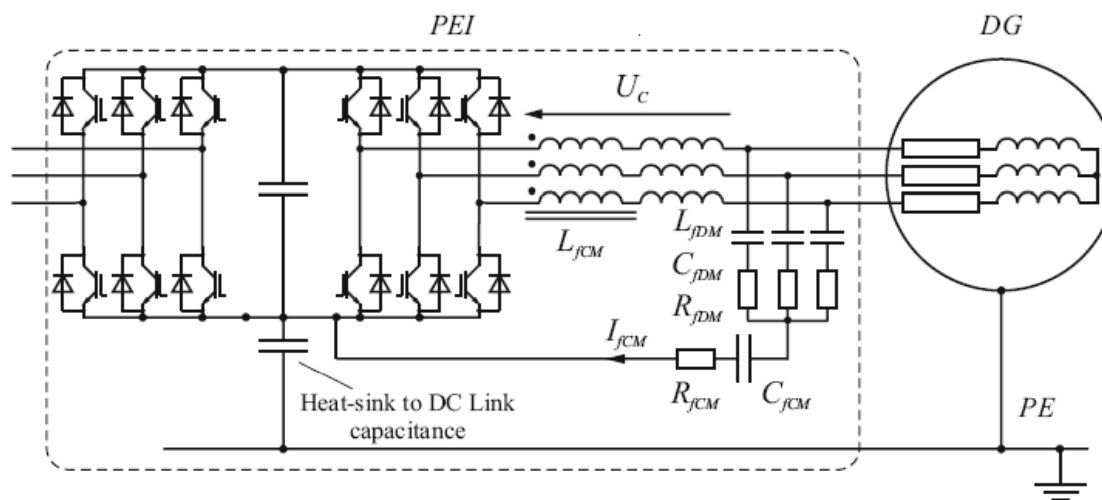


(c)

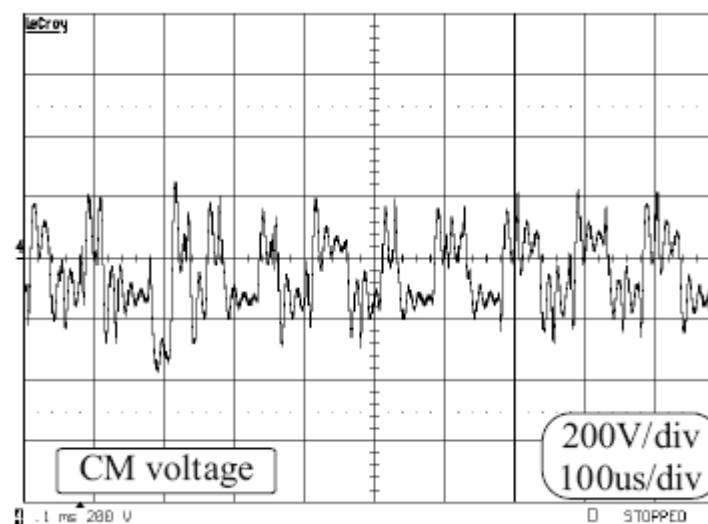


(d)

Wynik  
pomiarowy

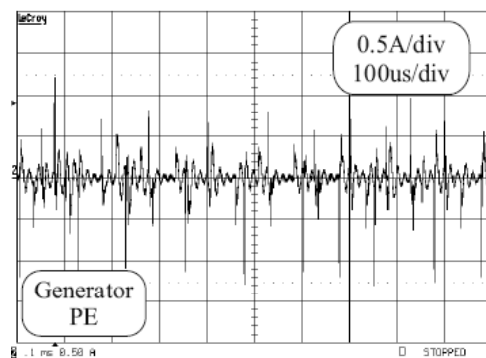
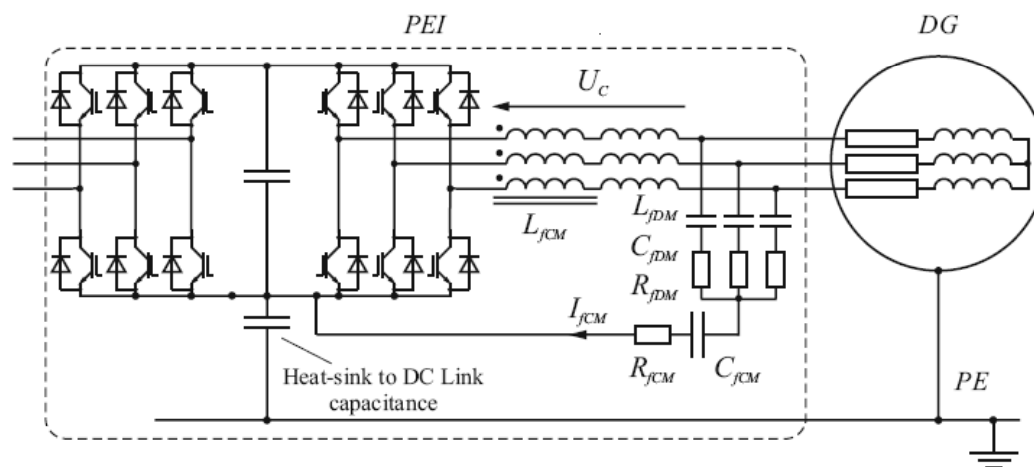


(a)

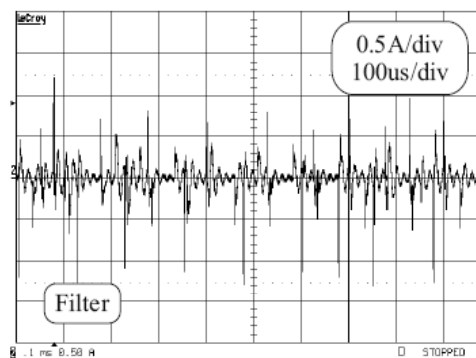


(b)

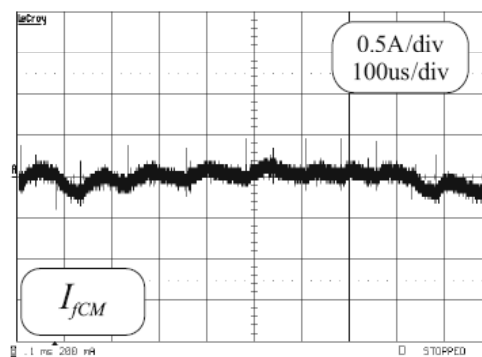
Wynik  
pomiarowy



(a)

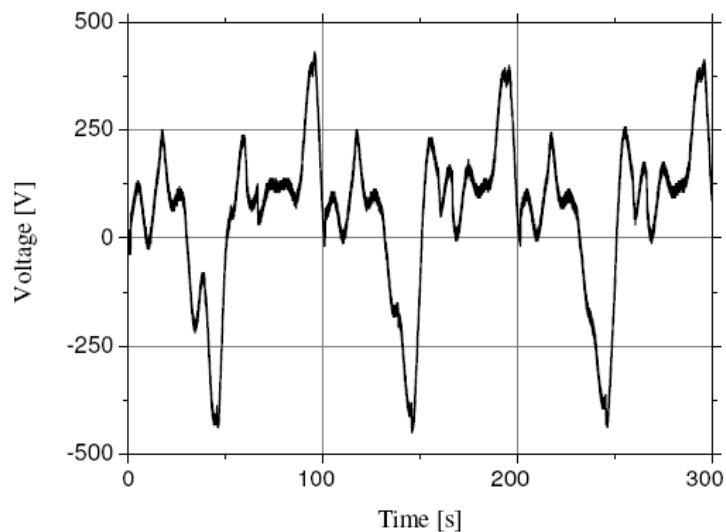


(b)

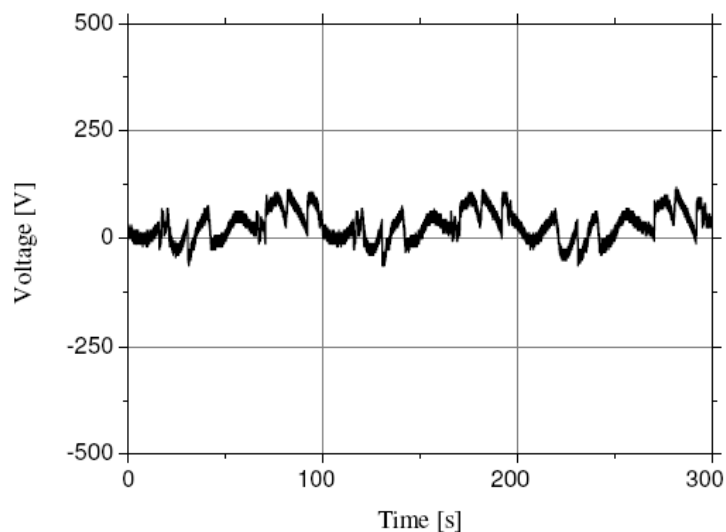


(c)

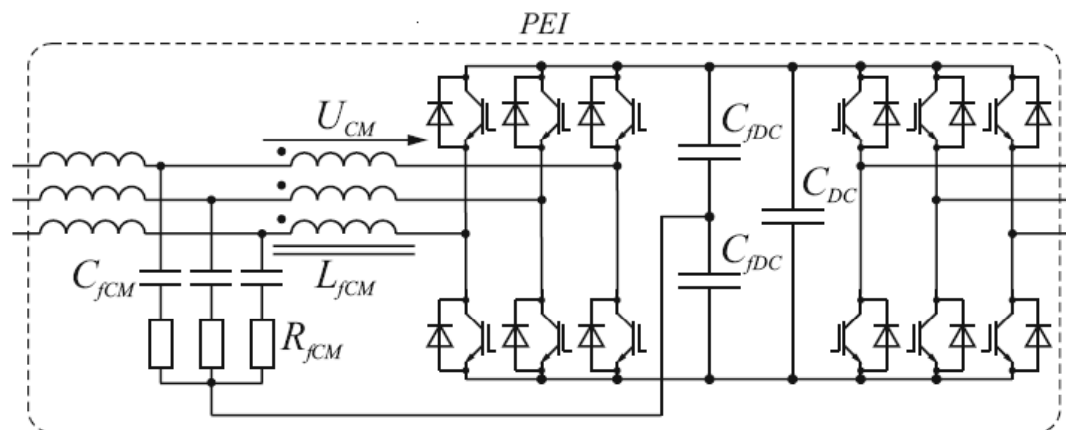
## Wynik pomiarowy



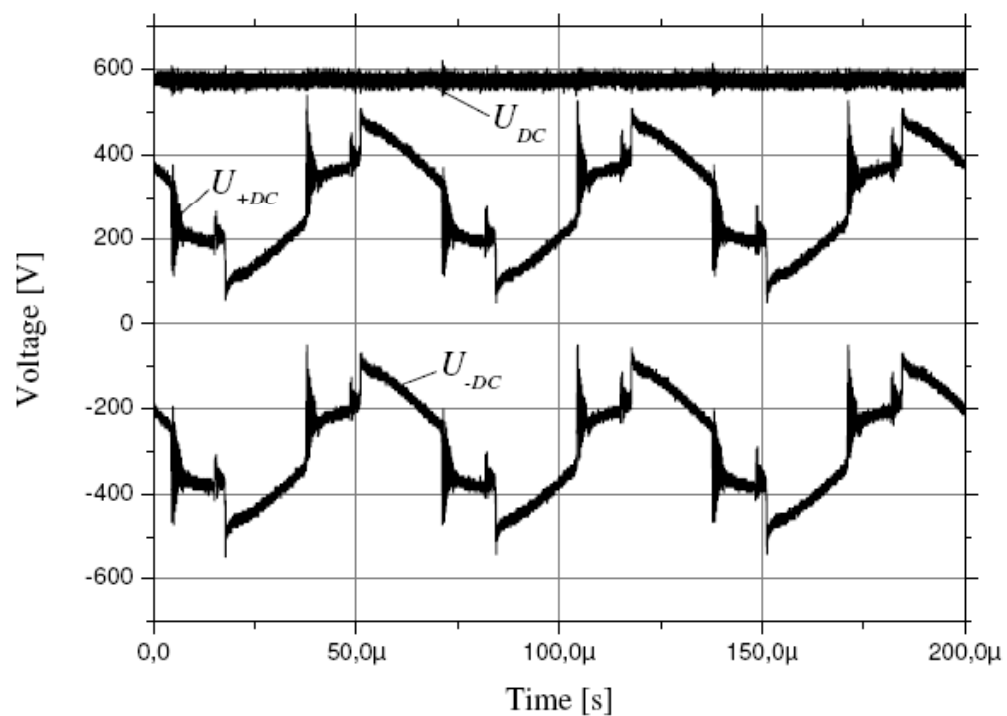
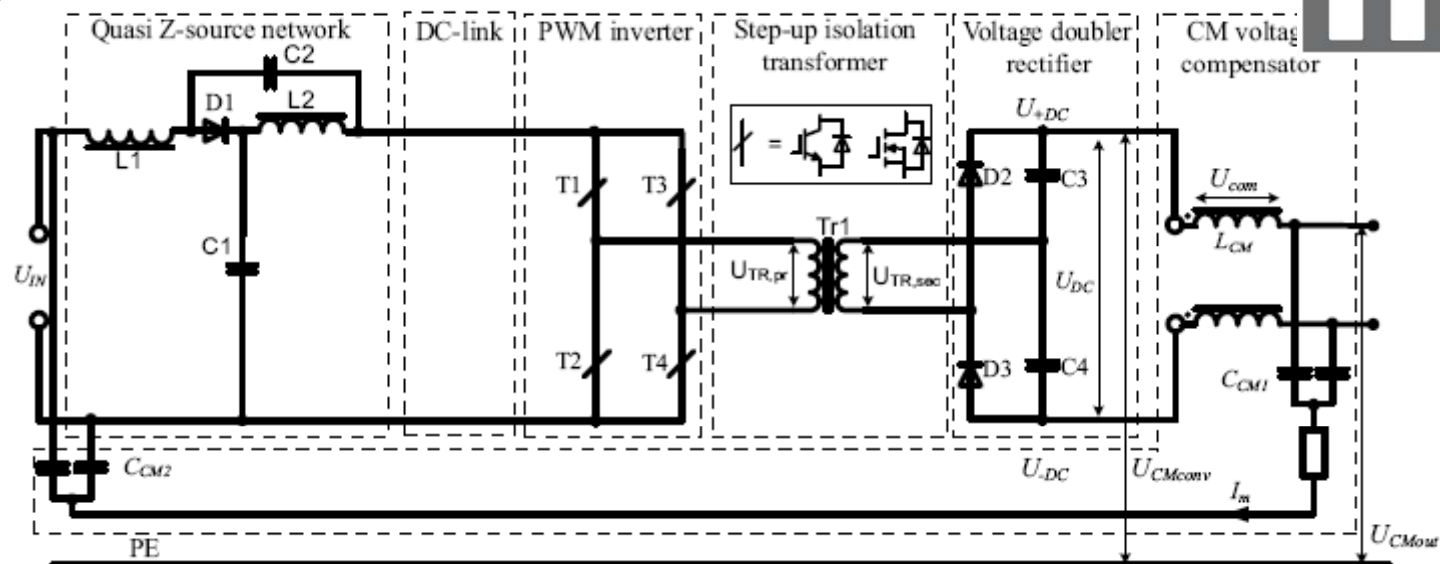
(a)



(b)



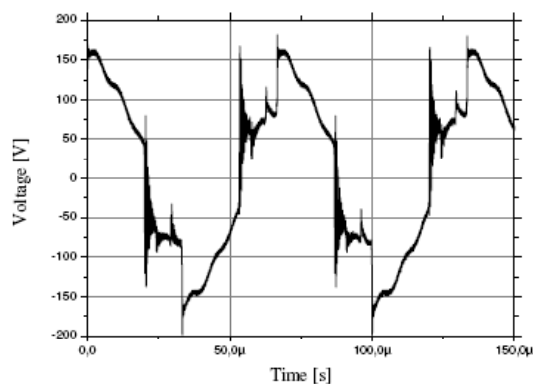
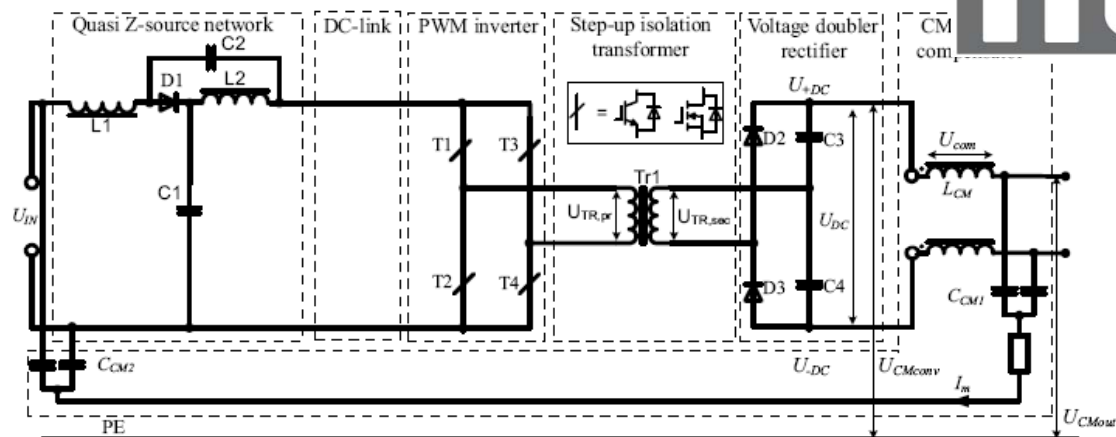
Napięcie pomiędzy ujemnym biegunem DC a uziumem: a. bez filtra, b. z filtrem



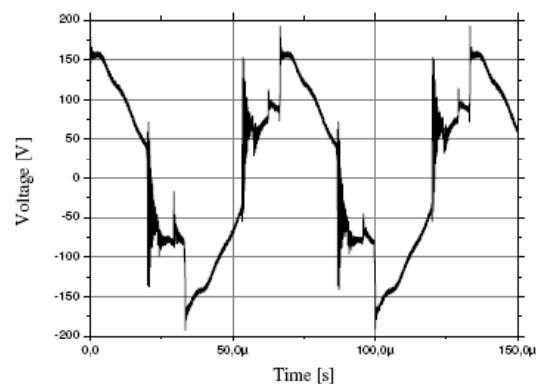
Wynik pomiarowy

Napięcia pomiędzy dodatnim i ujemnym biegunem DC a uziomem ( $U_{+DC}$ ,  $U_{-DC}$ ) oraz napięcie DC ( $U_{DC}$ )

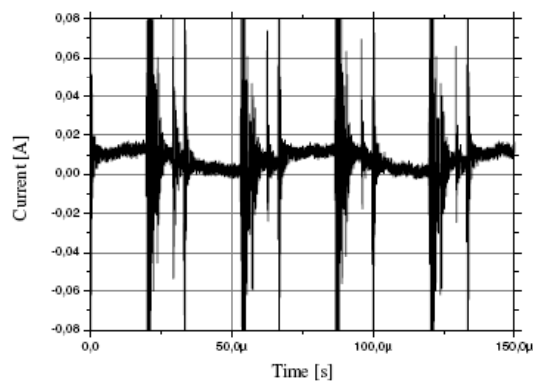




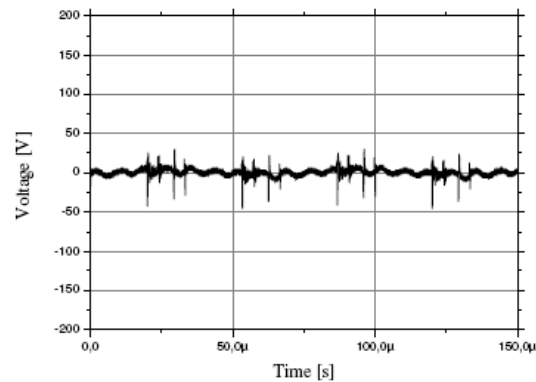
(a)



(b)



(c)

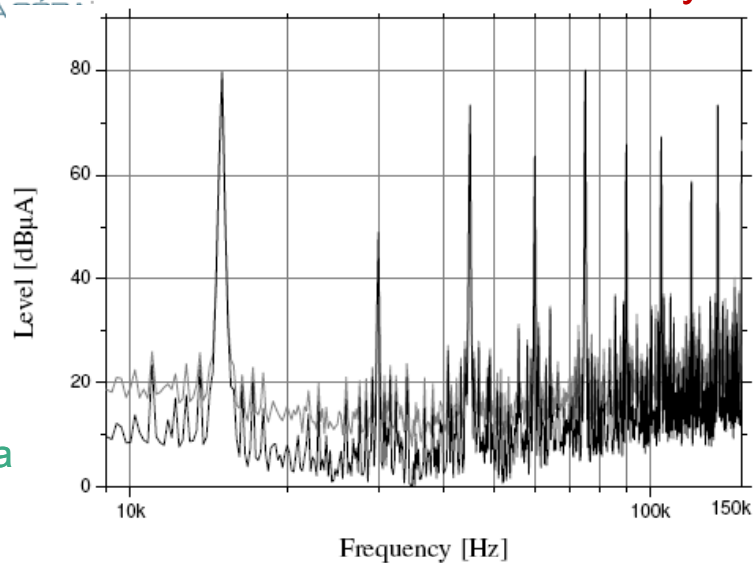


(d)

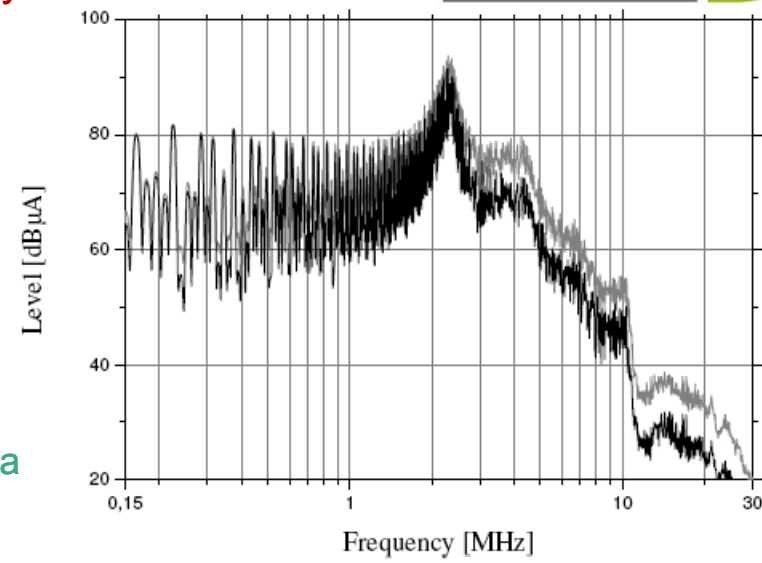
- a. Napięcie pomiędzy dodatnim biegunem a uziemem ( $U_{CMconv}$ ),
- b. Napięcie kompensujące ( $U_{com}$ ),
- c. prąd magnesujący ( $I_m$ ),
- d. Napięcie pomiędzy dodatnim biegunem a uziemem na wyjściu filtra ( $U_{CMout}$ )

Wynik pomiarowy

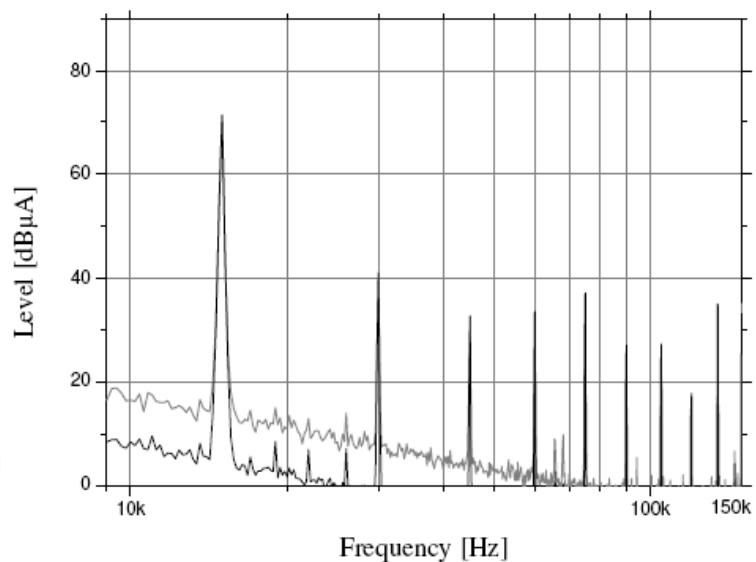
Bez filtra



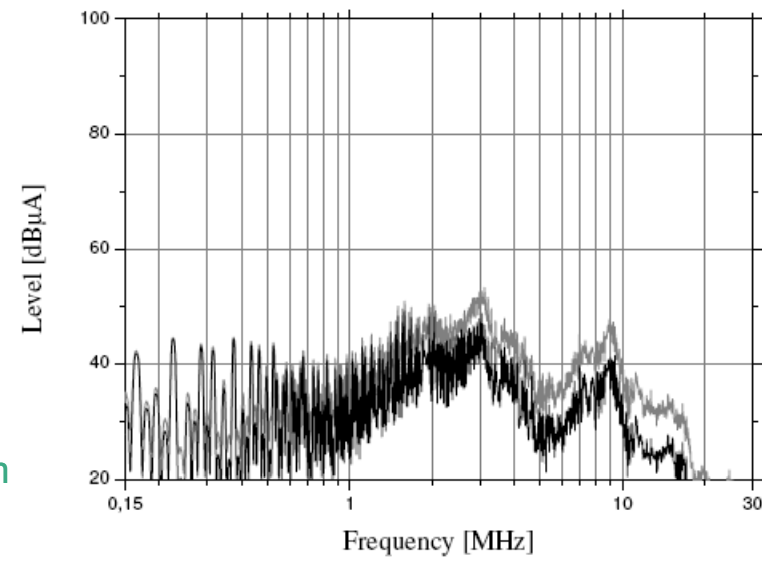
Bez filtra



Z filtrem



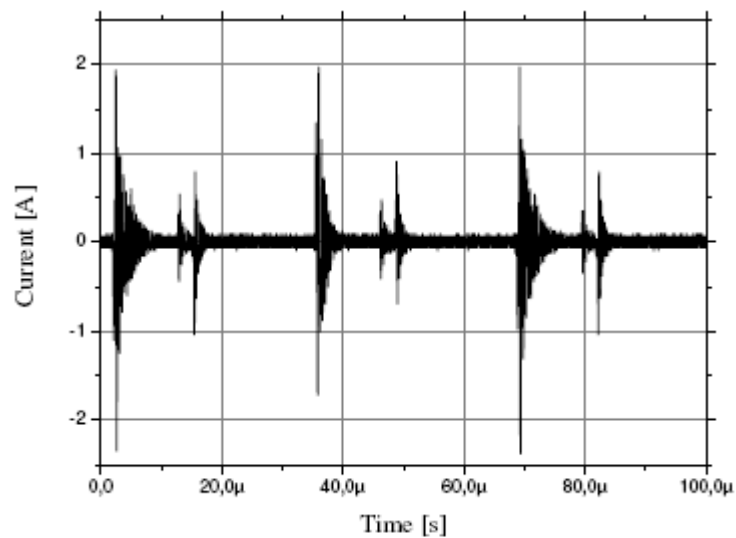
Z filtrem



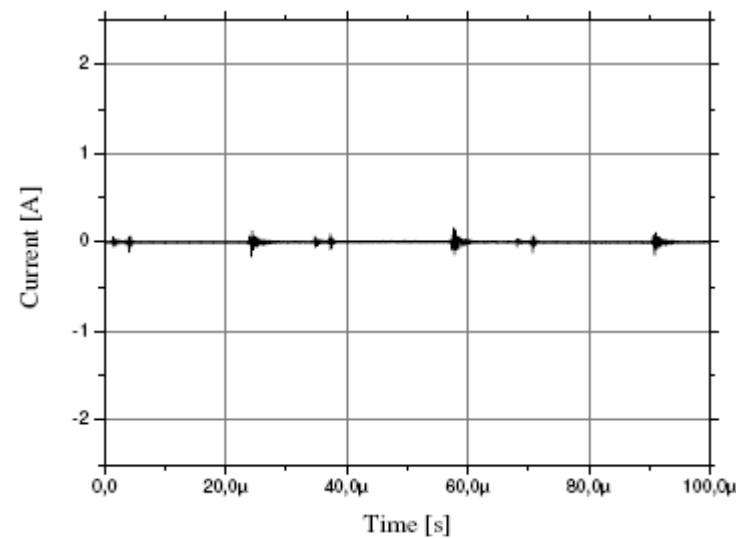
Widma prądu zaburzeń

## Wynik pomiarowy

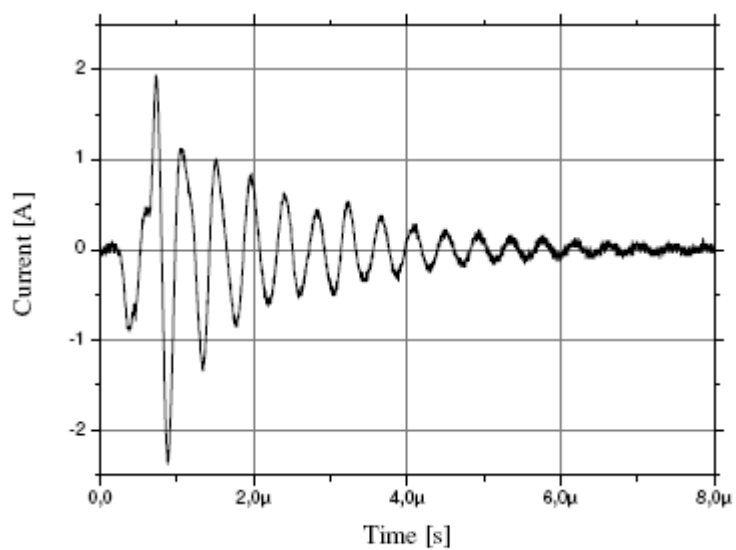
Bez filtra



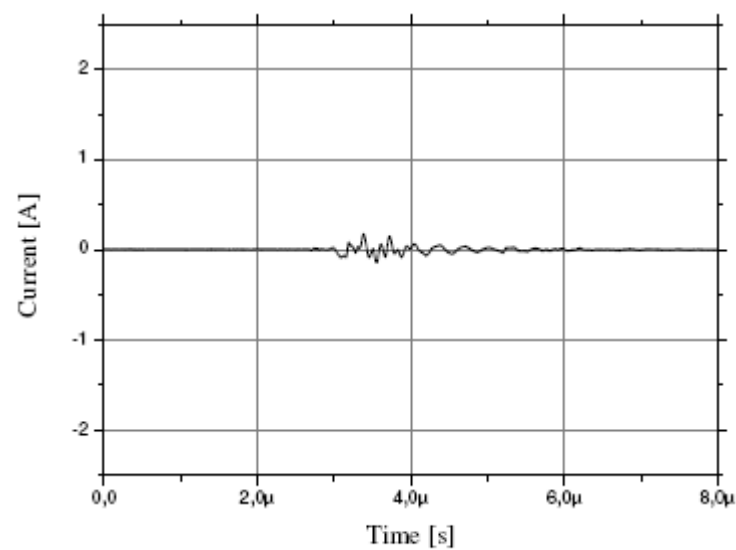
Z filtrem



Bez filtra



Z filtrem



(a)

(b)

Prąd zaburzeń

## Wnioski

W pracy, w ramach analiz teoretycznych:

- korzystając z błędzenia losowego Pearsona, opracowano metodę pozwalającą wyznaczyć prawdopodobieństwo redukcji k-tej harmonicznej sumarycznego prądu zaburzeń generowanego przez N przekształtników DC/DC,
- wyznaczono uogólnione zależności opisujące napięcie CM na wyjściu N-poziomowych falowników napięcia z modulacją PD, POD i APOD, zależności te stanowią podstawę doboru elementów indukcyjnych kompensatorów napięcia CM,
- opracowano dedykowaną wydajną metodę numeryczną wyznaczania miejsc zerowych dla modulacji sinusoidalnych PWM,.

### W zakresie badań eksperymentalnych:

- wykorzystano pomiary składowej magnetycznej pola do pomiaru rozprzestrzeniania się zaburzeń przewodzonych w sieciach nN i SN. Badania eksperymentalne pokazały, że zaburzenia przewodzone pomimo alternatywnych dróg rozptywu mogą rozprzestrzeniać się w rozległych obwodach. Zaburzenia generowane po stronie niskich napięć mogą przenosić się za pośrednictwem sprzężeń pojemnościowych, niezgodnie z przekładnią transformatora i być obserwowane w sieciach SN w znacznych odległościach od źródła zaburzeń.
- przedstawiono wyniki badań sumarycznych zaburzeń generowanych przez grupę identycznych przekształtników energoelektronicznych. Zaprezentowane wyniki badań pokazały, że ze względu na dudnienie częstotliwości łączy poszczególnych przekształtników, generowane zaburzenia modulowane są wolnozmiennymi obwiedniami. W tej sytuacji zastosowanie klasycznych metod pomiaru zaburzeń przewodzonych może dawać błędne wyniki.
- porównano zaburzenia generowane przez grupę przekształtników z modulacją deterministyczną i pseudolosową. Wyniki badań eksperymentalnych pokazały, że opisywana w literaturze przewaga modulacji pseudolosowej nad deterministyczną jest jedynie efektem pomiarowym wynikającym z selektywności odbiornika zaburzeń. Analizy statystyczne pomiaru błędów komunikacji oraz analizy modelu teoretycznego potwierdzają, że w kontekście niezawodności komunikacji modulacja pseudolosowa nie ma przewagi nad modulacją deterministyczną.

- zweryfikowano możliwość rozszerzenia koncepcji pasywnej kompensacji napięć zaburzeń na wyjściu falowników na pozostałe układy interfejsów energoelektronicznych stosowanych w systemach Smart Grid,
- zastosowanie pasywnych kompensatorów napięć zaburzeń zintegrowanych z PEI spowoduje, że niezależnie od impedancji w.cz. obwodów wejściowych i wyjściowych w znaczący sposób ograniczone zostaną poziomy wprowadzanych przez nie zaburzeń, zapobiegając ich rozptylowi i niekontrolowanemu sumowaniu się w różnych punktach systemu.
- koncepcję kompensatora napięć zaburzeń zaadoptowano do stosowanych w układach Smart Grid interfejsów energoelektronicznym takich jak: czterokwadrantowe przemienniki częstotliwości (AC/DC/AC), dwukierunkowe prostowniki sterowane (AC/DC), przekształtniki DC/DC typu boost.