

<https://doi.org/10.32056/KOMAG2019.4.1>

Problemy pomiarów odkształconych przebiegów prądowych przy zastosowaniu dostępnych na rynku przekładników i przetworników prądowo-napięciowych

Grzegorz Wiśniewski
Dariusz Macierzyński
Marcin Habrych
Bogdan Miedziński

Problems of measuring distorted currents using commercially available current transformers and current-voltage transducers

Streszczenie:

W artykule przedstawiono porównawcze wyniki badań właściwości metrologicznych wybranych, dostępnych na rynku przekładników i przetworników prądowych. Sformułowano odpowiednie wnioski odnośnie do ich przydatności w układach pomiarowych prądów o stosunkowo małych wartościach (od 1 A do 30 A) ale o częstotliwości zmieniającej się w zakresie od 10 Hz do 550 Hz.

Słowa kluczowe: górnicze sieci elektroenergetyczne, przetworniki prądowo-napięciowe, przekładniki prądowe, błędy prądowe, błędy kątowe

Keywords: mining power networks, current-voltage converters, current transformers, current errors, angle errors

Abstract:

The article presents comparative results of metrological properties of selected current transformers and current-voltage transducers available on the market. Appropriate conclusions were formulated regarding their usefulness in current measuring systems with relatively small values (from 1 A to 30 A) but with a frequency varying from 10 Hz to 550 Hz.

1. Wprowadzenie

Jest sprawą znaną, że coraz powszechniejsze stosowanie przekształtników energoelektronicznych powoduje wzrost zakłóceń w sieciach zasilających z uwagi na znaczną zawartość wyższych harmonicznych, zwłaszcza prądu [1-4]. Zakres i wielkość wprowadzanych zakłóceń (odkształceń przebiegów napięciowych i prądowych) zależy zarówno od zasady działania zastosowanego przekształtnika (napięciowy, prądowy) jak i sposobu jego sterowania (sterowanie skalarne z liniową $U/f=\text{const}$ lub kwadratową $U/f^2=\text{const}$ charakterystyką czy sterowanie wektorowe np. DTC). Duży wpływ ma również charakter i zakres zmiany obciążenia zasilanego nieliniowego odbiornika energii elektrycznej. W przemiennikach częstotliwości stosowanych do zasilania silników elektrycznych z regulacją ich prędkości obrotowej największe odkształcenie przebiegów, zwłaszcza prądowych, występuje na wejściu przemiennika od strony jego zasilania z transformatora. Na wyjściu bowiem występuje „wygładzanie” tych przebiegów z uwagi na znaczne wartości indukcyjności (stała czasowa) silnika [4].

Dokładna znajomość zawartości wyższych harmonicznych w przebiegach analizowanych wielkości fizycznych pozwala na wiarygodną ocenę ich wpływu na efektywność pracy maszyn i urządzeń elektrycznych, a także ma kluczowe znaczenie w ich diagnostyce [5, 6]. Dotyczy to zwłaszcza oceny wpływu odkształconych przebiegów prądów i napięć na straty dodatkowe w maszynach i urządzeniach elektrycznych a także na pojawianie się pasożytniczych momentów elektromagnetycznych w silnikach elektrycznych. Generowane

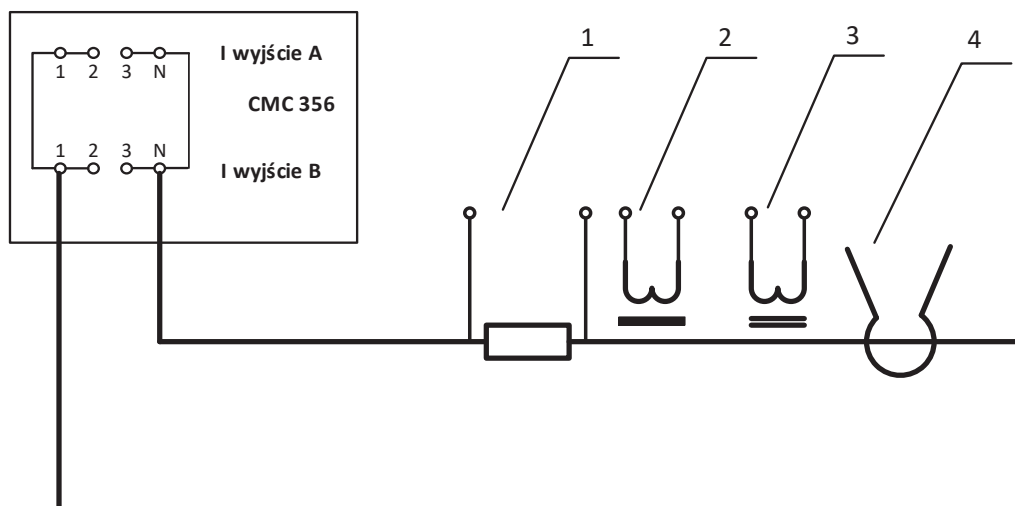
bowiem dodatkowe momenty pasożytnicze oddziałują negatywnie na dynamikę pracy całego układu napędowego [1].

2. Sposób i zakres pomiarów

W celu określenia przydatności, dostępnych na rynku przekładników prądowych i przetworników prądowo-napięciowych, do pomiarów odkształconych przebiegów prądowych, przeprowadzono odpowiednie badania porównawcze dla sinusoidalnych przebiegów pierwotnych prądowych o małej wartości skutecznej od 1 A do 30 A i częstotliwości w zakresie od 10 Hz do 550 Hz. Do badań wybrano:

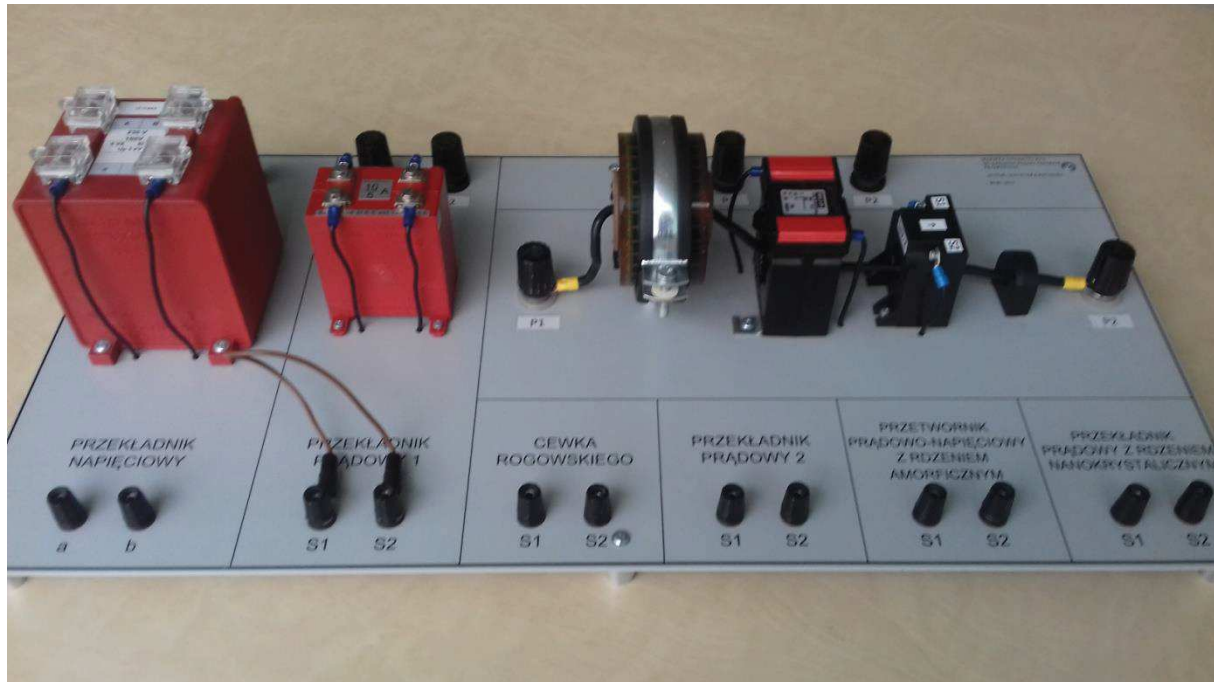
- klasyczny rdzeniowy przekładnik prądowy firmy Lumel o przekładni 200/5 A/A, kl.1 i mocy znamionowej 10 VA,
- przetwornik prądowo-napięciowy z rdzeniem nanokrystalicznym (typ VAZ 4626X10),
- przetwornik z rdzeniem dzielonym (nakładanym) z czujnikiem Halla (typ KEW8112,200mA-20A).

Przekładnik firmy Lumel został obciążony mocą znamionową (10 VA) poprzez włączenie do zacisków wtórnych tego przekładnika rezystora o wartości rezystancji $R_b=0,4 \Omega$.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego do badań porównawczych błędów prądowych i kątowych przekładników/przetworników; 1-opór normalny $R_N=0,05 \Omega$, 2-przekładnik prądowy rdzeniowy, 3-przetwornik z rdzeniem nanokrystalicznym, 4-przetwornik z nakładanym rdzeniem z czujnikiem Halla; CMC-356 mikroprocesorowy symulator sygnałów prądowych

Pomiary porównawcze wykonano w układzie jak na rysunku 1, łącząc szeregowo obwody pierwotne wszystkich przekładników/przetworników w celu wymuszenia takiej samej wartości i kształtu wzorcowego prądu pierwotnego (rys. 2).



Rys. 2. Widok układu wybranych przekładników/przetworników do badań porównawczych

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów określano błędy prądowe i kątowe w zależności od wartości prądu pierwotnego i jego częstotliwości. Znamionowe błędy prądowe DI badanego przetwornika obliczano (PN-EN 61869-2:2013-06 Przekładniki – Część 2: Wymagania szczegółowe dotyczące przekładników prądowych) [7, 8], zgodnie z zależnością (1):

$$DI = \frac{I_{wy} - I_{we}}{I_{we}} \cdot 100\% \quad (1)$$

w której:

- I_{wy} – wartość skuteczna sygnału prądowego po przeliczeniu na stronę pierwotną, A,
- I_{we} – wartość skuteczna wymuszanego prądu, nastawiona w symulatorze, A.

Błąd kątowy (rozumiany jako różnica wskazowa prądów) określano porównując przebiegi prądów/napięć w obwodach wtórnych badanych przekładników/przetworników z przebiegiem spadku napięcia na oporze normalnym ($R_N = 0,05 \Omega$), proporcjonalnym do wymuszanego prądu pierwotnego. Jest on dodatni, gdy prąd pierwotny wyprzedza prąd wtórny.

Norma (PN-EN 61869-2:2013-06) [7, 8] definiuje następujące klasy dokładności: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3. Liczby definiujące klasę określają wartość maksymalnego błędu dopuszczalną dla danej klasy. Przykładowe błędy dopuszczalne w niektórych klasach przedstawiono w tabeli 1.

Przykładowe dopuszczalne obowiązującą normą PN-EN 61869-2:2013-06 błędy pomiarowe przekładników rdzeniowych

Tabela 1

Klasa dokładności	Graniczny procentowy błąd prądowy (przekładni) przy podanych poniżej procentowych wartościach prądu znamionowego, + lub -					Graniczny błąd kątowy (w minutach) przy podanych poniżej procentowych wartościach prądu znamionowego, + lub -				
	1%	5%	20%	100%	120%	1%	5%	20%	100%	120%
0,2	-	0,75	0,35	0,2	0,2	-	30	15	10	10
0,5	-	1,5	0,75	0,5	0,5	-	90	45	30	30
1	-	3	1,5	1	1	-	180	90	60	60
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30

Oprócz powyższych, w normie (PN-EN 61869-2:2013-06) definiowany jest także współczynnik bezpieczeństwa przyrządów FS. Jest to stosunek prądu strony pierwotnej bezpiecznego dla urządzeń I_{pL} do prądu znamionowego strony pierwotnej I_{pr} . Przy obliczaniu tego współczynnika, założono, że przekładnik jest obciążony mocą znamionową. Przez prąd pierwotny bezpieczny I_{pL} rozumiemy wartość skuteczną prądu pierwotnego, przy którym błąd całkowity przekładnika jest równy lub większy 10%. Współczynnik FS jest bardzo ważny dla projektowania układów pomiarowych do urządzeń zabezpieczeniowych. Można przyjąć, że wraz z dowolnym wzrostem prądu pierwotnego wartość prądu strony wtórnej nie przekroczy $2 \times I_{sn}$ (przez I_{sn} rozumie się znamionowy prąd strony wtórnej przekładnika). Wynika to z nasycenia rdzenia i ograniczenia zdolności przekładników rdzeniowych do transformacji prądów zwarciovych:

$$FS = \frac{I_{pL}}{I_{pr}} \quad (2)$$

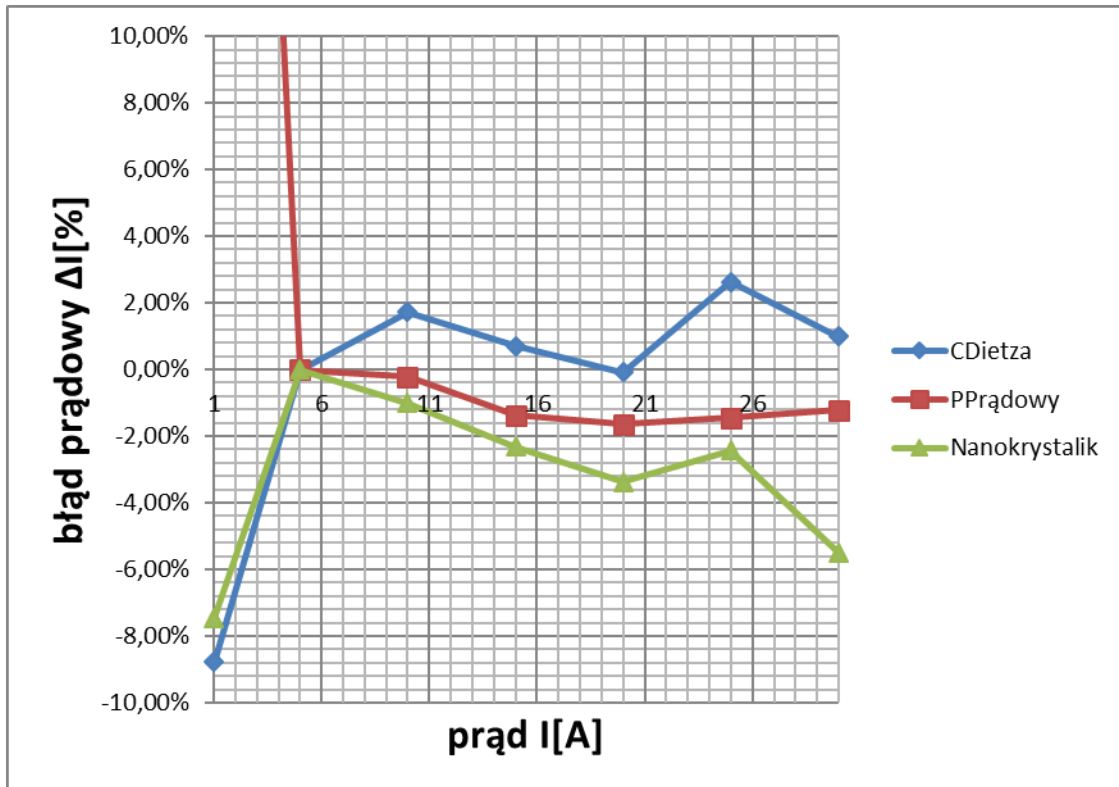
gdzie:

- FS - współczynnik bezpieczeństwa,
- I_{pL} - prąd strony pierwotnej bezpieczny dla urządzeń,
- I_{pr} - prąd znamionowy strony pierwotnej.

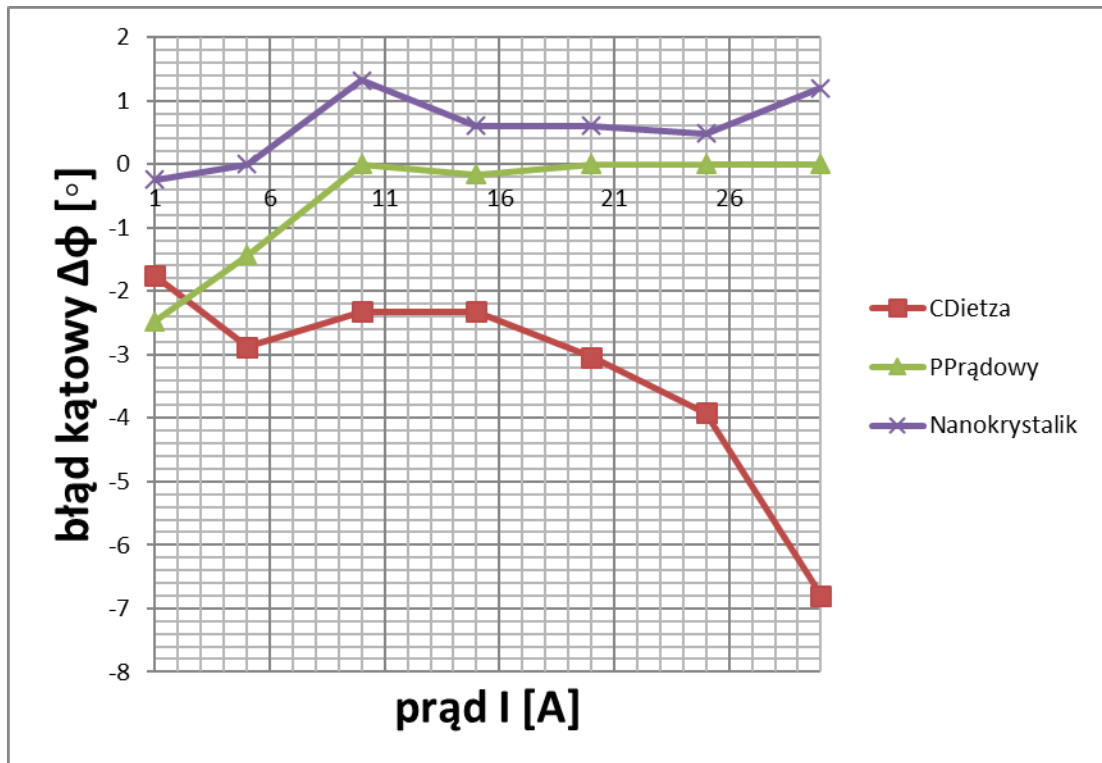
3. Wyniki pomiarów

Biorąc pod uwagę potrzebę opracowania innowacyjnego przetwornika prądowo-napięciowego głównie do zastosowań w układach zabezpieczeń i diagnostyki pracy górniczych sieci elektroenergetycznych analizę uzyskanych danych wykonano dla klasy dokładności 1 (tablica 1). Szczególną uwagę zwrócono na wiarygodność pomiaru (błąd prądowy i kątowy) dla małych wartości prądu pierwotnego (dla badanego przekładnika prądowego w granicach od 0,4% do 12% znamionowego prądu) przy zmiennej jego częstotliwości, z uwagi na pożądaną przydatność do wykrywania i oceny wpływu harmonicznych w warunkach odkształceń mierzonych przebiegów prądowych. Pomierzone zależności wartości błędu prądowego ΔI oraz kąтового $\Delta \varphi$ od wartości skutecznej mierzonego prądu dla jego częstotliwości mniejszej/równej 50 Hz pokazano na

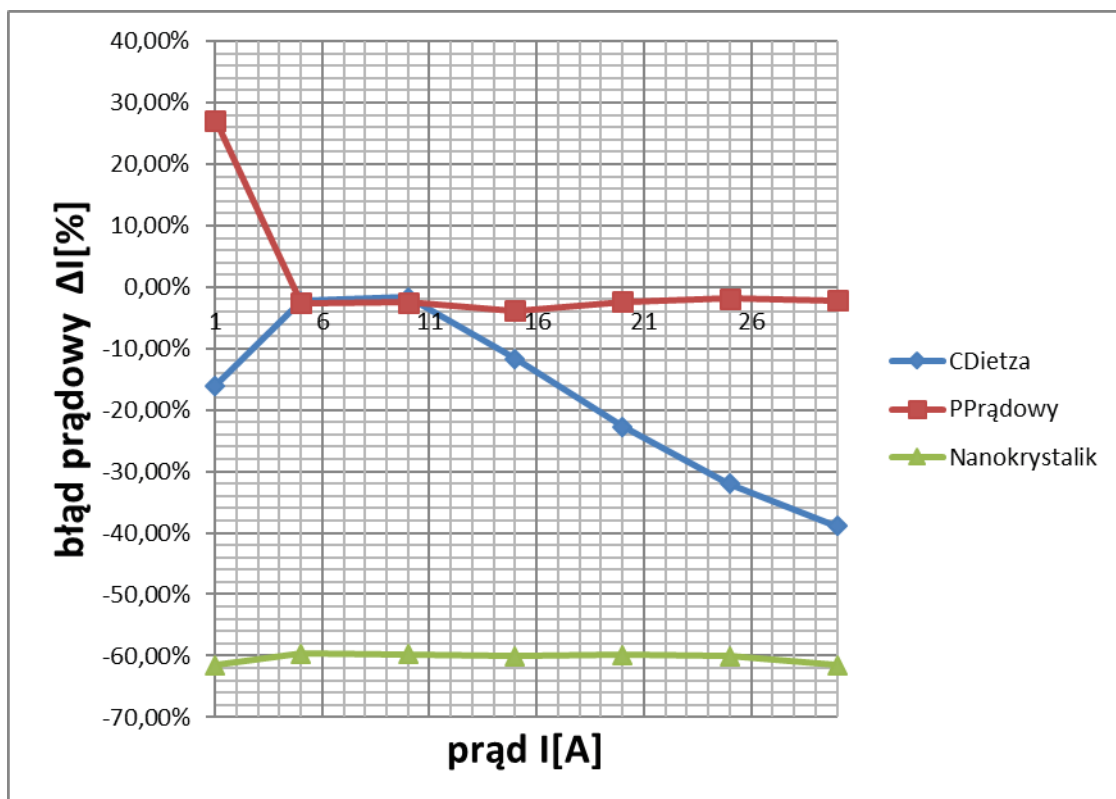
rysunkach 3÷8 (na rysunkach oznaczenie CDietza dotyczą przetwornika z rdzeniem dzielonym z czujnikiem Halla). Wynika z nich różna zależność dla badanych przetworników, z tym, że największe wartości błędów prądowych można zaobserwować we wszystkich przypadkach dla prądów mniejszych od 5 A (tj. 2% prądu pierwotnego dla przekładnika rdzeniowego). Największy błąd kątowy jest natomiast wprowadzany przez przetwornik z nakładanym rdzeniem dzielonym z czujnikiem Halla. Rośnie on ze wzrostem wartości mierzonego prądu i ze zmniejszaniem się jego częstotliwości.



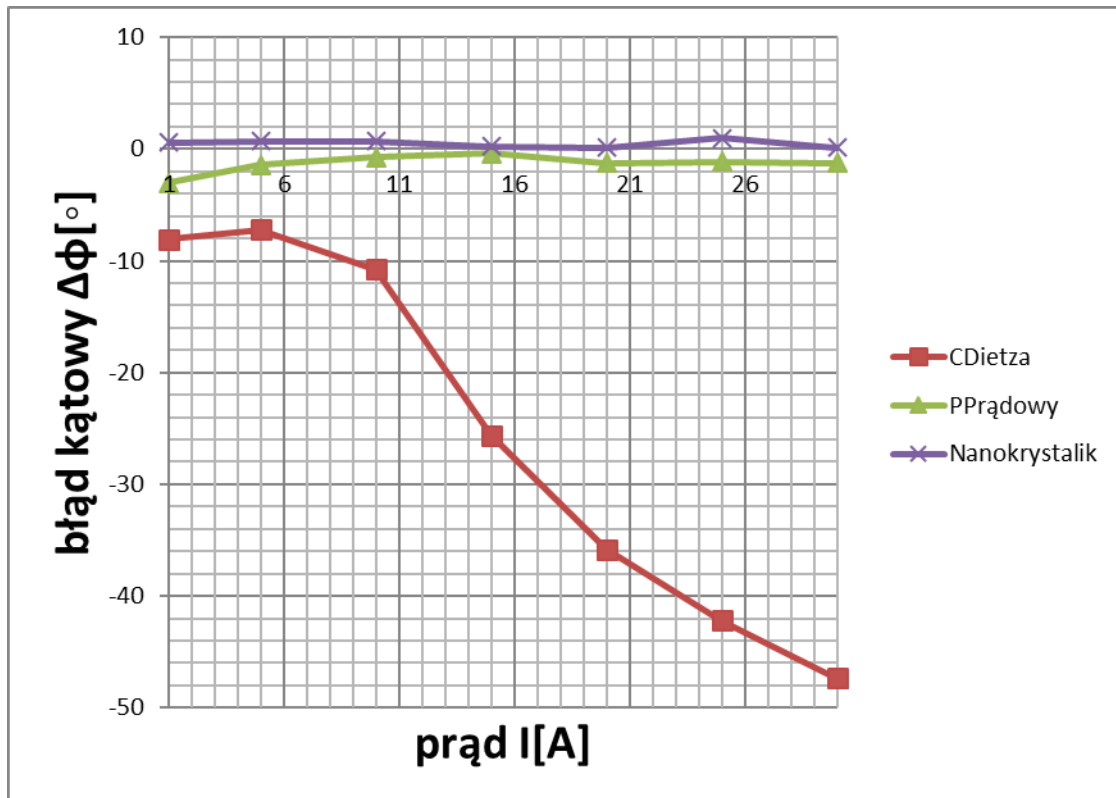
Rys. 3. Błąd prądowy w funkcji zmiany wartości prądu pierwotnego dla częstotliwości $f=50$ Hz



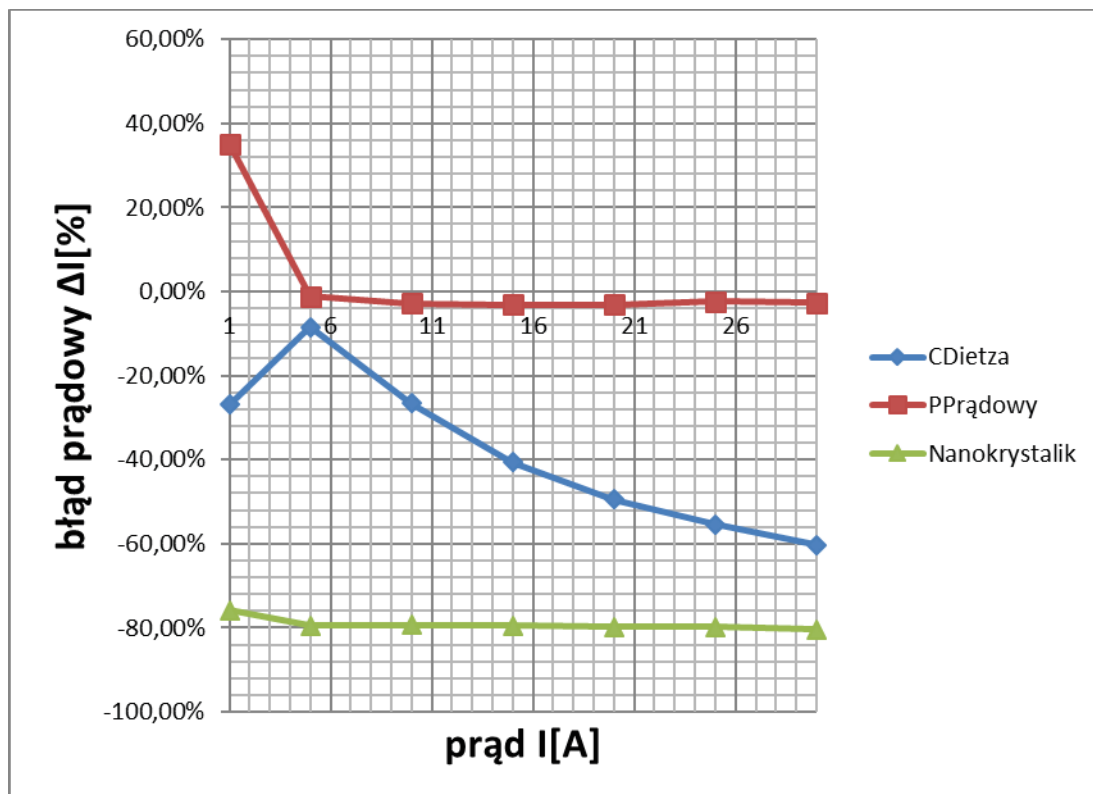
Rys. 4. Błąd kątowy w funkcji zmiany wartości prądu pierwotnego dla częstotliwości $f=50$ Hz



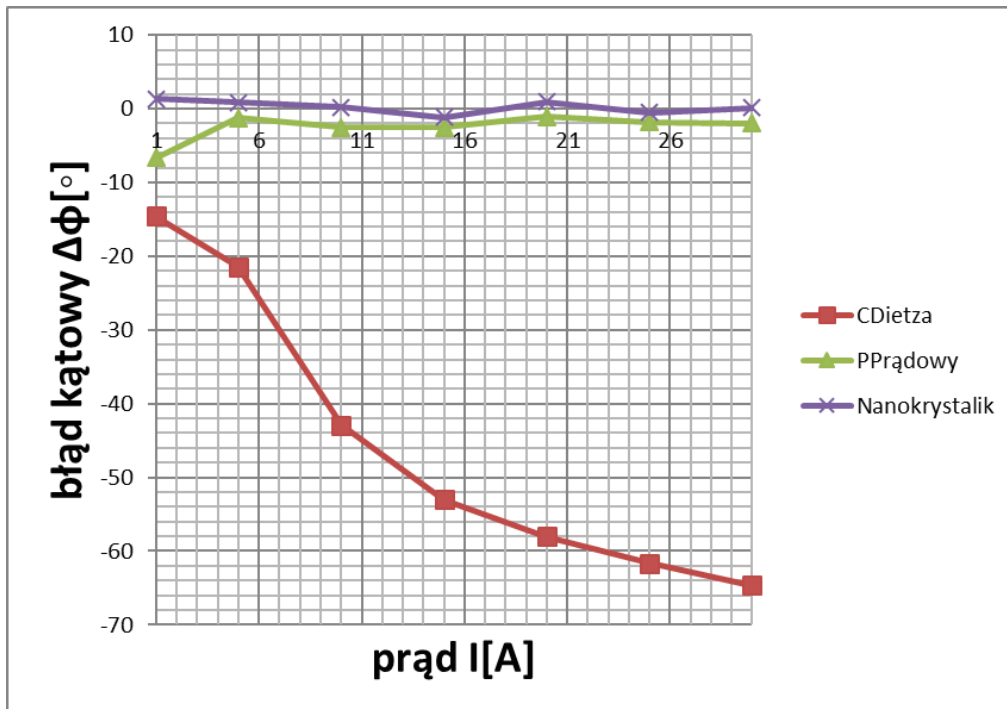
Rys. 5. Błąd prądowy w funkcji zmiany wartości prądu pierwotnego dla częstotliwości $f=20$ Hz



Rys. 6. Błąd kątowy w funkcji zmiany wartości prądu pierwotnego dla częstotliwości $f=20$ Hz

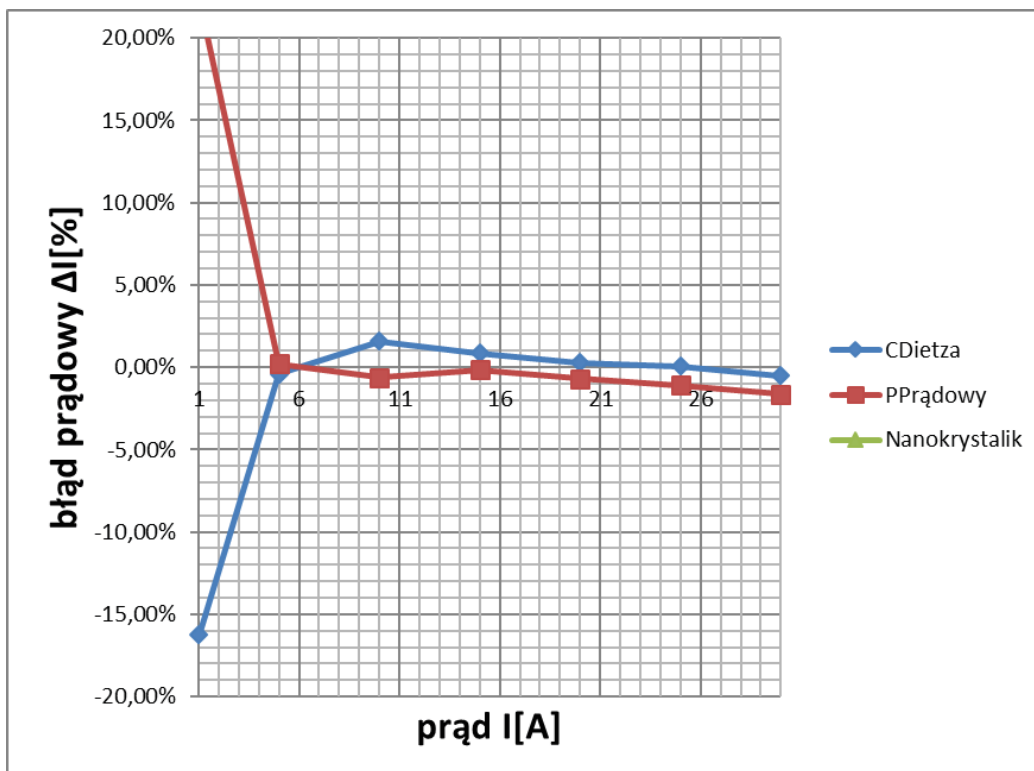


Rys. 7. Błąd prądowy w funkcji zmiany wartości prądu pierwotnego dla częstotliwości $f=10$ Hz

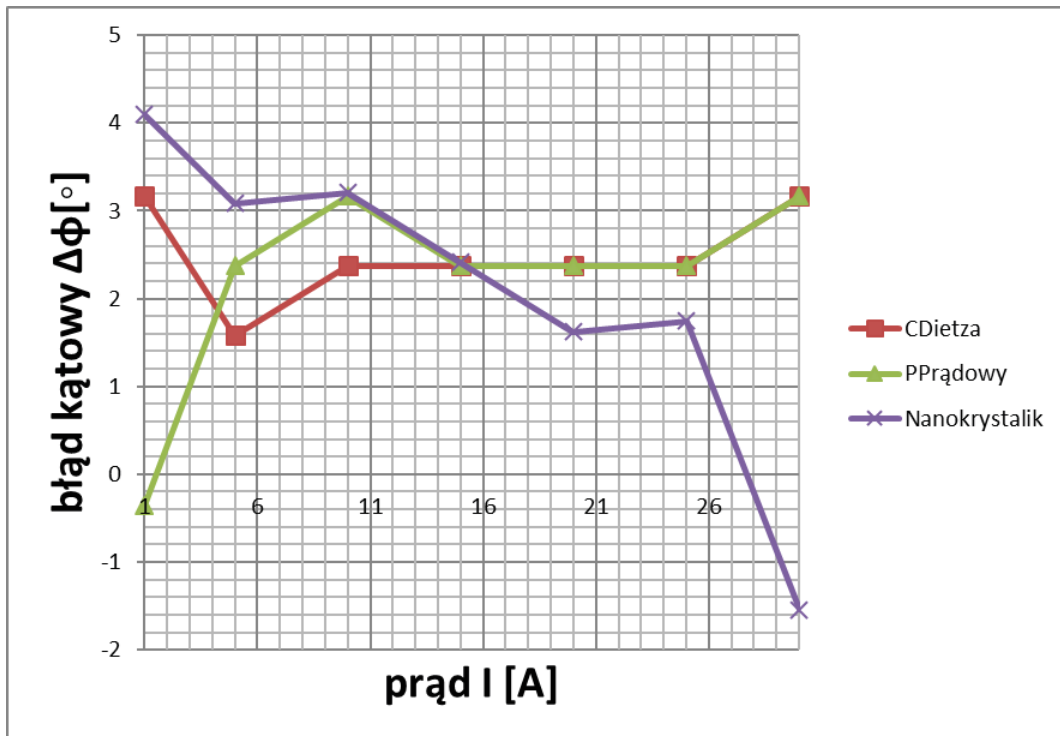


Rys. 8. Błąd kątowy w funkcji zmiany wartości prądu pierwotnego dla częstotliwości $f=10$ Hz

Ze wzrostem zaś częstotliwości (powyżej 50 Hz) największe błędy prądowe są również dla najmniejszych wartości prądu mierzonego i maleją poniżej błędów granicznych ze wzrostem prądu, co dla ilustracji pokazano na rysunku 9 dla częstotliwości 550 Hz. Rosną jednak wartości błędów kątowych (rys. 10).

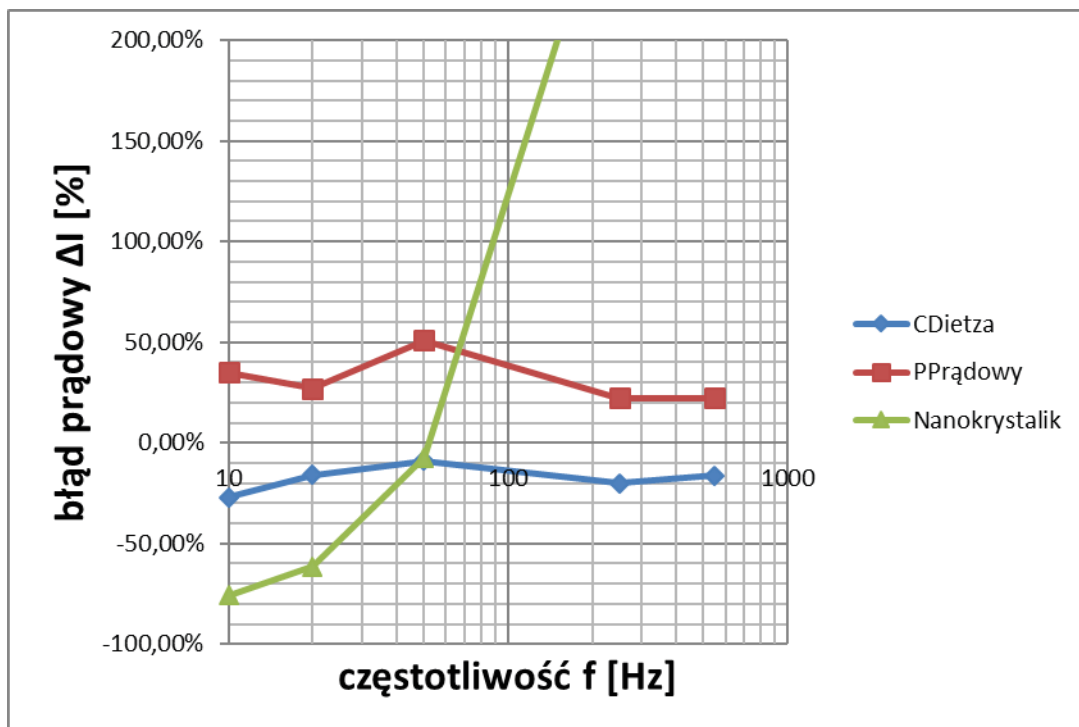


Rys. 9. Błąd prądowy w funkcji zmiany wartości prądu dla $f=550$ Hz

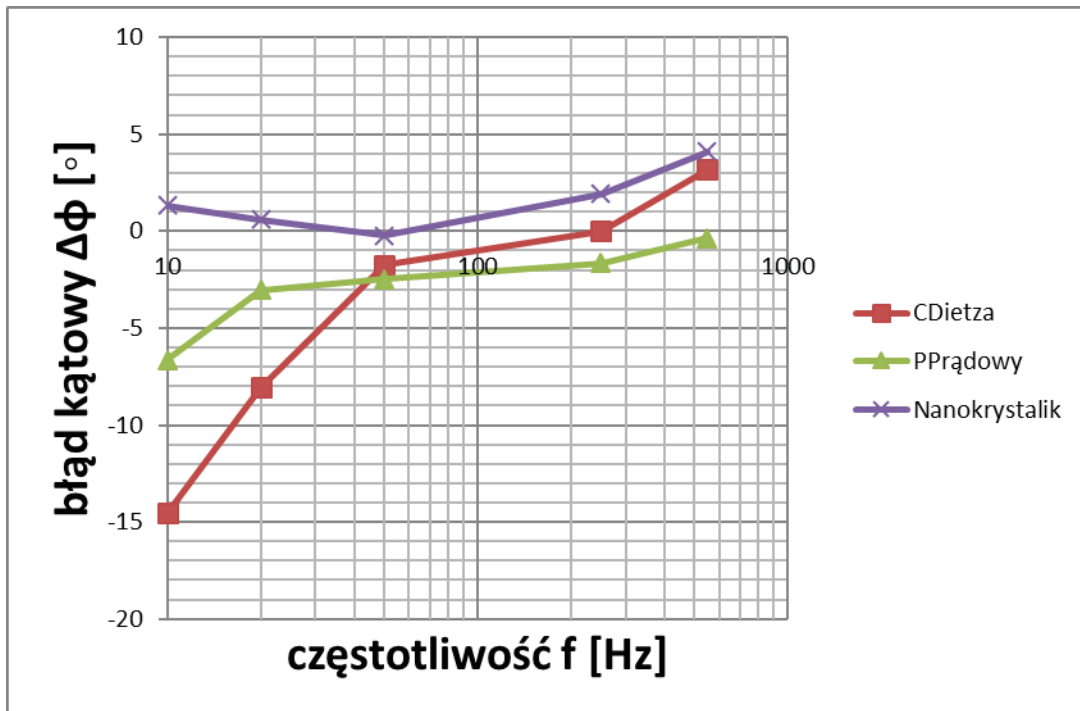


Rys. 10. Błąd kątowy w funkcji zmiany wartości prądu dla $f=550$ Hz

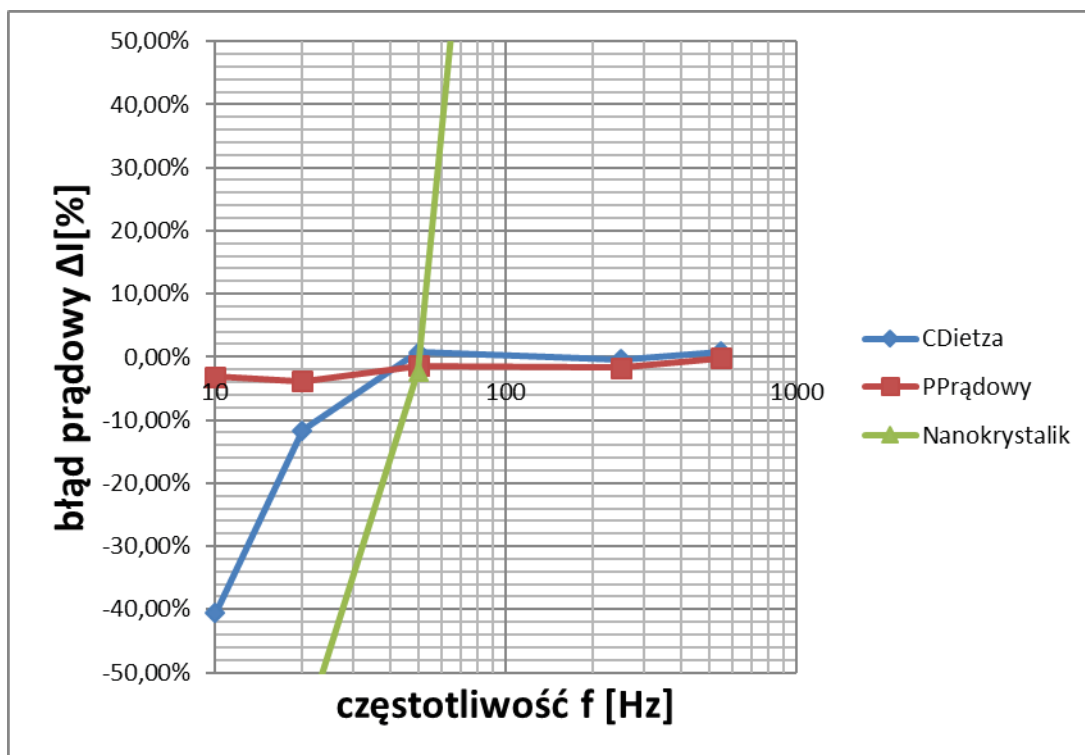
Na rysunkach 11-14 pokazano zależności błędów prądowych i kątowych w szerokim zakresie zmiany częstotliwości (od 10 Hz – 550 Hz) dla dwóch wartości mierzonego prądu równego odpowiednio 1 A i 15 A.



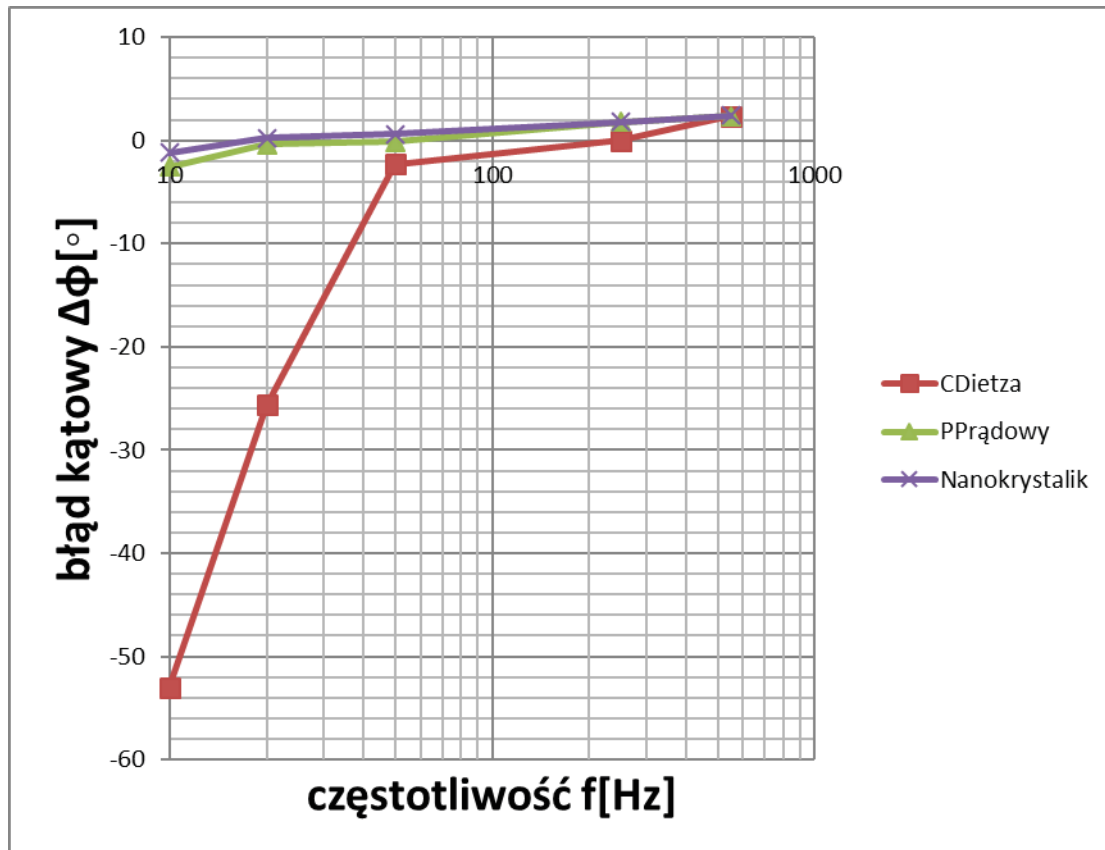
Rys. 11. Błąd prądowy w funkcji zmiany częstotliwości dla $I=1$ A



Rys. 12. Błąd kątowy w funkcji zmiany częstotliwości dla I=1 A



Rys. 13. Błąd prądowy w funkcji zmiany częstotliwości dla I=15 A



Rys. 14. Błąd kątowy w funkcji zmiany częstotliwości dla $I=15$ A

Z przeprowadzonych badań wynika, że błąd prądowy jest szczególnie duży dla małej (1 A) wartości prądu niezależnie od jego częstotliwości. Dla np. badanego przekładnika rdzeniowego przekracza on 20%. Błąd ten jednak maleje ze wzrostem wartości prądu i częstotliwości, co można porównać z rysunkiem 13. Również błąd kątowy wykazuje podobną tendencję zmiany (rys. 12 i 14).

4. Uwagi i wnioski

Przeprowadzone badania na wybranych, dostępnych na rynku przekładnikach/przetwornikach prądowo-napięciowych wykazały, że ich błędy prądowe i/lub kątowe zależą w dość istotny sposób od wartości mierzonego prądu i jego częstotliwości. Błędy te są szczególnie znaczne w warunkach pomiaru małych wartości prądu pierwotnego i małej jego częstotliwości. Zaszła zatem potrzeba opracowania dedykowanego dla potrzeb zastosowań w elektroenergetycznych sieciach górniczych przetwornika, zwłaszcza prądowo-napięciowego, umożliwiającego identyfikację z dużą dokładnością prądowych przebiegów odkształconych powodowanych zachodzącymi procesami technologicznymi. Dotyczy to zarówno odpowiednio szerokiego zakresu zmian tak częstotliwości jak i amplitudy przy zachowaniu liniowości charakterystyki przetwornika.

Literatura

- [1] Habrych M., et al.: Pomiary odkształconych przebiegów prądów i napięć w układzie przenośnika taśmowego zasilanego przemiennikiem częstotliwości. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* 49 (2011), s. 27-34.

- [2] Wasiak I., Gburczyk P., Pawełek R.: Oddziaływanie przemienników częstotliwości na jakość energii elektrycznej w układzie potrzeb własnych elektrowni. Część II - Badania symulacyjne. Przegląd Elektrotechniczny 90 (2014) nr 1, s. 29-33.
- [3] Szkółka S., Wiśniewski G., Strama P.: Wybrane aspekty zaburzeń generowanych przez przemienniki częstotliwości. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 48 (2010), s. 60-68.
- [4] Szymański J.: Odkształcenia napięć w nieziemionych układach zasilania typu IT wytwarzane przez przemienniki częstotliwości. Przegląd Elektrotechniczny (2012), tom R.88, nr 1b, s. 231-238.
- [5] Swędrowski L., Wilczewski L., Cichosz J.: "Badania przydatności wybranych przetworników prądu do celów diagnostyki łożysk w silniku indukcyjnym." Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (2004), nr 20, s. 141-146.
- [6] Szymański Z.: Nowoczesne metody badań diagnostycznych układów napędowych kopalnianych maszyn przepływowych. Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe 4 (97) (2012), s. 17-23.
- [7] Kaczmarek M.: "Badanie charakterystyk transformacji indukcyjnego przekładnika prądowego z rdzeniem toroidalnym Ni80Fe20 dla sinusoidalnych prądów o częstotliwościach 50 Hz ÷ 20 kHz". Przegląd Elektrotechniczny (2011), vol. 87, s. 1-4, 11.
- [8] Nowicz R., Kaczmarek M.: Wymagania normalizacyjne dla przekładników małej mocy dotyczące dokładności transformacji wyższych harmonicznych oraz sygnałów sinusoidalnych wyższych częstotliwości. Pomiary Automatyka Kontrola 60 (2014).

dr inż. Grzegorz Wiśniewski

dr hab. inż. Marcin Habrych, prof. uczelni

prof. dr hab. inż. Bogdan Miedziński

bogdan.miedzinski@pwr.edu.pl

Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny,

Katedra Energoelektryki

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

mgr inż. Dariusz Macierzyński

Elgór + Hansen S.A.

ul. Opolska 19, 41-500 Chorzów