

**Andrzej BIEN, Artur BORON, Michał SZYPER, Andrzej WETULA, Tadeusz ŻEGLIEN**  
 AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA W KRAKOWIE

## Nowe układy izolatorów galwanicznych sygnałów dolnopasmowych

**Dr hab. inż. Andrzej BIEN**

Urodził się w Warszawie w 1954 roku. Studiował i otrzymał stopień doktora na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Pracuje w Zakładzie Metrologii Akademii Górniczo-Hutniczej. Główne zainteresowania zawodowe są związane z pomiarami i systemami pomiarowymi z użyciem szybkich procesorów sygnałowych, w szczególności aplikacje związane z energią elektryczną i jej jakością.

e-mail: abien@agh.edu.pl



**Dr inż. Andrzej WETULA**

Ukończył studia na wydziale EAIiE Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w 2003 roku; stopień doktora nauk technicznych uzyskał na tym samym wydziale w 2009 roku. Pracownik Katedry Metrologii AGH. Zainteresowania badawcze obejmują pomiary i analizę sygnałów systemu elektroenergetycznego oraz zastosowanie procesorów sygnałowych w systemach pomiarowych. Autor i współautor czternastu artykułów i referatów konferencyjnych.

e-mail: wetula@agh.edu.pl



**Mgr inż. Artur BORON**

Urodził się w 1982r. w Krakowie. W roku 2007 ukończył studia na wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, kierunku Elektrotechnika. Aktualnie jest doktorantem tego wydziału. Zainteresowania naukowe dotyczą metrologii, projektowania cyfrowych urządzeń pomiarowych w szczególności opartych na układach FPGA oraz cyfrowego przetwarzania sygnałów.

e-mail: Artur.boron@agh.edu.pl



**Dr inż. Tadeusz ŻEGLIEN**

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki AGH w Krakowie. Jest adiunktem w Katedrze Metrologii tego samego wydziału. Autor ponad 50 prac naukowych dotyczących zagadnień projektowania systemów pomiarowych, modelowania i badań symulacyjnych systemów pomiarowych, analizy i przetwarzania sygnałów, pomiarów biomedycznych, pomiarów parametrów wylądowań elektrostatycznych i pomiarów parametrów ruchu drogowego.



**Prof. dr hab. inż. Michał SZYPER**

Profesor zwyczajny w Katedrze Metrologii na Wydz. EAIiE AGH. Autor i współautor ok. 100 publikacji i patentów, w tym współautor 3 książek. Tematyka badawcza: teoria i modelowanie systemów pomiarowych, identyfikacja modeli, okna czasowe, pomiary wielkości elektrycznych i nieelektrycznych, konstrukcja aparatury pomiarowej. Promotor w 8 przewodach doktorskich. Recenzent kilkudziesięciu rozpraw i wniosków na stopnie i tytuły naukowe. Członek Senatu AGH w czterech kadencjach po 1990 roku. Członek KMian PAN.

e-mail: szyper@agh.edu.pl



**Keywords:** insulation amplifiers, common disturbance suppression.

### 1. Podstawy izolacji galwanicznej w układach pomiarowych

Zakłóceniem wspólnym działającym na systemy pomiarowe nazywane jest napięcie pomiędzy wejściami sygnałów mierzonych a punktem odniesienia („masą”) sygnałów wyjściowych. Wyróżnia się zakłócenia „stałoprądowe” (DC) oraz „zmiennoprądowe” (AC, najczęściej o częstotliwości 50 Hz w Europie). W warunkach przemysłowych, zwłaszcza w technologiach przetwarzających duże moce elektryczne oraz w rozproszonych systemach pomiarowych zakłócenia te mogą osiągać znaczne wartości rzędu kilku lub kilkunastu kV. W takich sytuacjach izolowanie galwaniczne wejściowych (analogowych) elementów systemów pomiarowych jest jedynym skutecznym sposobem na poprawne wykonanie pomiarów. Prócz wysokich napięć wspólnych pomiary przemysłowe charakteryzują się dużym zróżnicowaniem wartości i szerokim pasmem widm napięć mierzonych oraz dużym poziomem zakłóceń elektromagnetycznych (indukowanych). Konstrukcja galwanicznych izolatorów sygnałów analogowych przeznaczonych do pracy w warunkach przemysłowych powinna odpowiadać wymienionym uwarunkowaniom.

Innym istotnym obszarem zastosowań izolatorów galwanicznych w systemach pomiarowych są zastosowania medyczne. Obejmują one głównie pomiary diagnostyczne potencjałów na ludzkim ciele (EKG, EEG, EMG, EOG) a także innych sygnałów pochodzenia biologicznego. Pomiary te charakteryzują się niskim poziomem wartości sygnałów mierzonych ale o niezbyt szerokim paśmie, a także na ogół małym napięciem wspólnym. Zakres i warunki stosowania izolacji galwanicznej elementów systemów pomiarowych mają zatem istotny wpływ na parametry techniczne izolatorów.

Głównym elementem izolatorów galwanicznych jest bariera napięciowa tłumiąca zakłócenia wspólne i odporna na wysokie napięcie, ale przenosząca sygnały mierzone zmodulowane (pasmowe) lub dolnopasmowe. Stosowane są następujące rodzaje barier: transformatorowe, pojemnościowe oraz transpatorowe (lub ogólnie światłowodowe). W przypadku dwu pierwszych rodzajów barier w dotychczas stosowanych rozwiązaniach układowych konieczna jest modulacja sygnału nośnego przez sygnał mierzony

#### Streszczenie

Artykuł przedstawia właściwości metrologiczne nowych rozwiązań układowych izolatorów galwanicznych dwu rodzajów: z barierą pojemnościową oraz światłowodową. Uzyskano układy odporne na wysokie napięcia wspólne, o szerokim paśmie przenoszenia oraz innych właściwościach, które porównano z parametrami znanych układów. Przeprowadzone wstępne badania aplikacyjne opracowanych urządzeń wskazują na możliwe zastosowania, m. in. w pomiarach elektroenergetycznych.

**Słowa kluczowe:** izolatory galwaniczne, tłumienie zakłóceń wspólnych.

### The New Constructions of Insulation Amplifiers for Low-pass Signals

#### Abstract

The article describes a construction and metrological properties of two new insulation amplifier designs. The first amplifier features a capacitive insulation barrier, while the other uses an optical barrier and power transmission. Conducted experiments include estimation of static and frequency responses and nonlinearities, as well as breakdown tests for the capacitive amplifier. Obtained parameters were compared against popular commercial insulation amplifiers' parameters. Comparison shows that presented amplifiers feature the highest breakdown voltage in class, and very high common mode rejection ratio. Besides parameters estimation, preliminary application experiments were conducted for a capacitive amplifier. These experiments consisted acquisition and spectral analysis of an IGBT converter voltage using a resistive divider and the described amplifier. Presented results of these experiments suggest possible application areas, such as electrical power measurements and power electronic converter voltage analysis.

dolno pasmowy, przekształcająca jego widmo na widmo pasmowe możliwe do przeniesienia przez barierę. W trzecim przypadku przez barierę optyczną przenoszone jest widmo dolno pasmowe. Układy wejściowe izolatorów (przed barierą napięciową) wymagają zasilania mocą elektryczną, zatem układy zasilające, (na ogół przetwornice DC/DC) również podlegają działaniu napięć wspólnych.

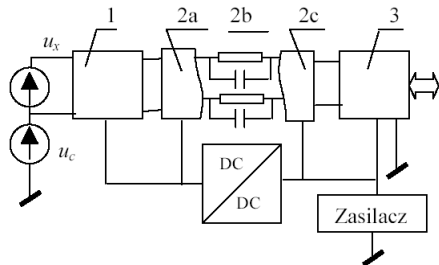
Do podstawowych parametrów izolatorów galwanicznych należą:

- odporność izolatorów galwanicznych na napięcie wspólne, określona przez nominalne napięcie pracy i napięcie próby,
- wartości impedancji bariery izolującej oraz jej składowych,
- współczynniki tłumienia zakłóceń wspólnych oraz indukowanych,
- zakres liniowości, nachylenie i błędy nieliniowości charakterystyki statycznej,
- pasmo przenoszenia charakterystyk częstotliwościowych, określone przez górną częstotliwość graniczną pasma (dolna jest zerowa),
- poziom szumów własnych, napięcie offsetu, i inne.

W przypadku przetwornic DC/DC powyższy wykaz parametrów należy uzupełnić o: nominalne wartości napięć, prądów i mocy strony nisko i wysoko napięciowej i inne.

Z analizy parametrów dostępnych aktualnie na rynku galwanicznych izolatorów sygnałów analogowych wynika, że pomimo rozwoju ich konstrukcji istnieją ograniczenia wartości tych parametrów natury układowej oraz technologicznej. Ograniczenia te są przyczyną powstawania konstrukcji wyspecjalizowanych, dedykowanych do określonych zastosowań. W szczególności specjalizacja ta dotyczy ograniczania nominalnej wartości napięcia wspólnego oraz pasma częstotliwości na korzyść zakresów sygnałów wejściowych oraz poziomu szumów własnych. Wskazuje na to dominacja na rynku izolatorów do zastosowań medycznych, natomiast możliwości zaspokojenia potrzeb w zakresie zastosowań przemysłowych są dość ograniczone. Problemy techniczne w obszarze zastosowań przemysłowych, powstające zwłaszcza w rozproszonych systemach pomiarowych z procesorami lokalnymi są często rozwiązywane przez izolację galwaniczną na poziomie sygnałów cyfrowych, tj. w przyłączach magistrali integrujących systemy. Sposób ten powoduje, że przetwarzanie analogowych sygnałów pomiarowych oraz przetwarzanie analogowo-cyfrowe odbywa się pod wysokim napięciem w stosunku do otoczenia i wymaga: skutecznego ekranowania, specyficznych konstrukcji z „pływającym” punktem odniesienia, wysokiej symetrii pojemności rozproszonych oraz źródeł zasilania odpornych na wysokie napięcie tj. posiadających wysokie współczynniki tłumienia zakłóceń wspólnych, co jest trudne do uzyskania i łącznie może być źródłem błędów pomiarów i przyczyną uszkodzeń.

Uproszczony schemat ilustrujący zasadę tłumienia zakłóceń wspólnych przez izolator galwaniczny przedstawiony jest na rys. 1.



Rys. 1. Ilustracja zasady tłumienia zakłóceń  $u_c$  wspólnych dla wejść sygnału mierzonego  $u_x$ ; oznaczenia: 1 – przetworniki pomiarowe, 2 – izolator galwaniczny, 2a – część pierwotna, 2b – impedancja sprzęgająca, 2c – część wtórna, 3 – aparatura pomiarowa analogowa i cyfrowa

Fig. 1. An illustration of principle of damping common disturbances; markings: 1- measurement transducers, 2 – isolation amplifier, 2a – primary side, 2b – coupling impedance, 2c – secondary side, 3 – analog and digital instrumentation

W tabeli 1 zestawiono przykładowe wartości wybranych parametrów dostępnych na rynku izolatorów galwanicznych.

Tab. 1. Parametry izolatorów galwanicznych  
Tab. 1. Parameters of isolation amplifiers

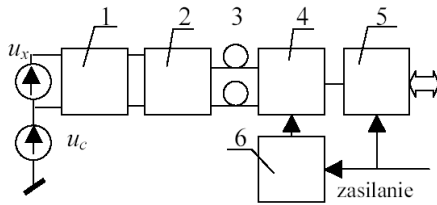
Lp.	Parametr	BB ISO124	AD AD215	CLARE LIA100	AGH
1	Rodzaj bariery	pojemnościowa	transformatorowa	optyczna	pojemnościowa
2	Zasilanie obwodów wejściowych	tak	tak	tak	nie
3	Napięcie testowe bariery	2400V	1500V	3750V	30 kVDC 20 kVAC
4	Impedancja bariery dla 50Hz	1300 MΩ	120 MΩ	5000 MΩ	110 MΩ lub 500 MΩ
5	IMR (CMRR)	140 dB	120 dB	100 dB	130 dB lub 140 dB
6	Zakres we/wy (wzmocnienie)	±12V (1V/V)	±10V (1...10V/V)	±12V	±5V (1V/V)
7	Pasmo przenoszenia (3dB)	50kHz	120kHz	40kHz	180kHz lub 270kHz
8	Błędy: wzmocnienia nieliniowości	0,05% 0,005%	0,5% 0,01%	0,01%	0,3% 0,058% lub 0,094%
9	Rezystancja (pojemność) wejściowa	200kΩ (-)	16MΩ (-)	10TΩ (3pF)	100kΩ lub 50 kΩ (ok. 60pF) *
10	Napięcie offsetu	początkowe ±20mV	wyjściowe 30mV	wyjściowe 50mV	Początkowe ±30mV po ustaleniu ±3mV
11	Szumy własne	4μV/ sqrt(Hz)	20nV/ sqrt(Hz) dla $f > 10$ Hz		10μV/ sqrt(Hz)

\* łącznie z pojemnością wejściowego ogranicznika napięcia

## 2. Światłowodowy izolator galwaniczny z optyczną transmisją mocy elektrycznej

Opracowany przez nas układ światłowodowego izolatora galwanicznego należy do grupy urządzeń o znanej koncepcji opisywanej w publikacjach, ale nie oferowanych na rynku typowej aparatury pomiarowej. Istota trudności problemu polega na transmisji przez światłowód mocy potrzebnej do zasilania przetworników pomiarowych, ponieważ łączna sprawność energetyczna przetwarzania elektrooptycznego i optoelektrycznego oraz transmisji mocy optycznej przez światłowód jest bardzo mała. Przedstawione wyniki badań wskazują, że rozwiązaliśmy ten problem w stopniu wystarczającym dla wielu zastosowań.

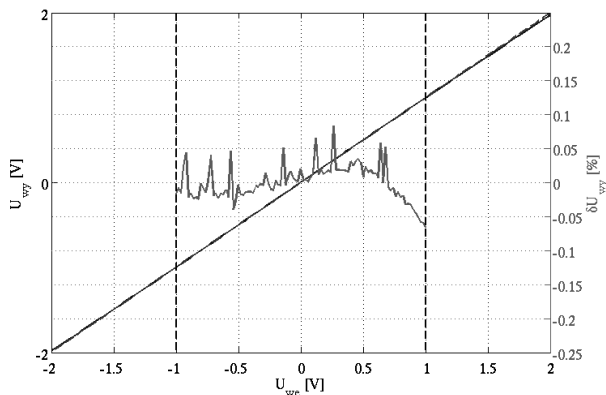
Zaletą izolatora światłowodowego jest całkowita izolacja galwaniczna przetworników pomiarowych od pozostałej części systemów pomiarowych za pomocą elementu bardzo odpornego na napięcia wspólne. Do wad, oprócz trudności z przeniesieniem mocy elektrycznej, należy m.in. wpływ parametrów światłowodów. Zasadę działania izolatora galwanicznego z optyczną transmisją mocy elektrycznej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zasada działania izolatora galwanicznego z optyczną transmisją mocy elektrycznej; 1-układ wejściowy izolatora, 2-przetworniki elektrooptyczne i optoelektryczne, 3-światłowody, 4-przetworniki elektrooptyczne i optoelektryczne, 5-układ wyjściowy izolatora 6 - zasilacz przetworników elektrooptycznych

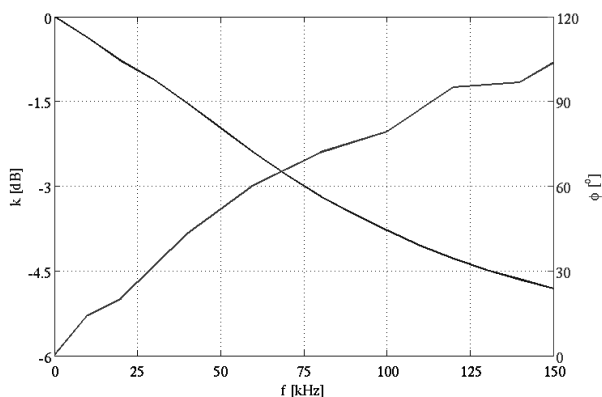
Fig. 2. Principle of operation of an isolation amplifier with an optical power transmission; 1- input circuitry, 2- electrical to optical and optical to electrical converters, 3- fiber-optic cables, 4- electrical to optical and optical to electrical converters, 5- output circuitry, 6- power source for converters

Na rys. 3 przedstawiono przykładową charakterystykę statyczną izolatora światłowodowego w wybranym zakresie napięć wejściowych oraz błąd nieliniowości tej charakterystyki, natomiast na rys. 4 przykładowe charakterystyki częstotliwościowe amplitudową i fazową. Stosowano światłowody o długości 2 m.



Rys. 3. Charakterystyka statyczna i błąd nieliniowości światłowodowego izolatora galwanicznego z optyczną transmisją mocy elektrycznej

Fig. 3. Output and nonlinearity error vs input voltage of fiber-optic isolation amplifier with optical power transmission



Rys. 4. Charakterystyki częstotliwościowe światłowodowego izolatora galwanicznego z optyczną transmisją mocy elektrycznej

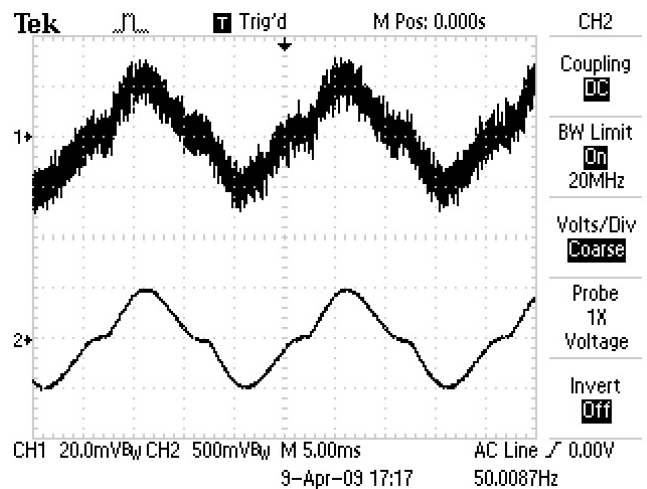
Fig. 4. Frequency response of fiber-optic isolation amplifier with optical power transmission

Wyznaczono następujące wartości parametrów izolatora światłowodowego:

1. Próba napięciowa światłowódów: 30 kV pomiędzy obejmami na odcinku 20 cm płaszczu w pomieszczeniu laboratoryjnym w okresie 15 min przy prądzie  $25 \cdot 10^{-6}$  A.
2. Maksymalny błąd nieliniowości: 0,08 %, pasmo przenoszenia: 75 kHz, szumy napięcia wyjściowego:  $8 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$
3. Współczynnik temperaturowy napięcia zasilającego stronę wtórną: 0,01 V/K

Na skutek braku sprzężeń elektrycznych bariera optyczna nie przenosi napięcia zakłóceń wspólnych. Rozwiązania układowe i konstrukcyjne światłowodowego izolatora z optyczną transmisją mocy elektrycznej chronione są przez pięć zgłoszeń patentowych.

Na rys. 5 przedstawiono przykład zastosowania izolatora światłowodowego do pomiaru prądu zmiennego w torze wieloprądowym z zastosowaniem indukcyjnego czujnika pola magnetycznego. Dla porównania prąd mierzono także z zastosowaniem bocznika.

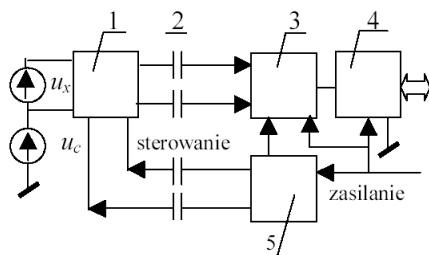


Rys. 5. Wyniki pomiaru prądu zmiennego z zastosowaniem izolatora światłowodowego; kanał 1 – bocznik, kanał 2 – izolator

Fig. 5. Results of alternating current measurement using an optical isolation amplifier; channel 1 – shunt, channel 2 – isolation amplifier

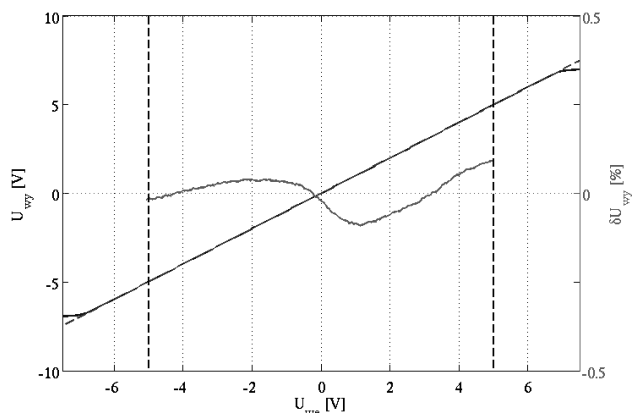
#### 4. Izolator galwaniczny z barierą pojemnościową oraz impulsową modulacją amplitudy

Opracowane przez nas dwa rodzaje układów izolatorów galwanicznych z barierą pojemnościową, z impulsową modulacją amplitudy oraz tzw. rozładowaniem charakteryzują się dużą odpornością na wysokie napięcia wspólne oraz szerokim pasmem przenoszenia w stosunku do innych dostępnych na rynku urządzeń tego typu. Do zalet tych układów należy konstrukcja wytrzymała na napięcia 20 kV AC i 30 kV DC. Prócz tego układ wejściowy izolatora pracujący pod wysokim napięciem nie wymaga zasilania. Przedstawione w tab. 1 błędy nieliniowości, napięcie offsetu i szumy własne utrzymano na poziomie umożliwiającym osiągnięcie rozdzielczości ok. 10 bitów przy zakresie  $\pm 5$  V. Pewnym ograniczeniem wynikającym z właściwości konstrukcji jest niezbyt duża impedancja wejściowa oraz impedancja bariery, wystarczające jednak na ogół do zastosowań przemysłowych. Zasadę działania izolatora z barierą pojemnościową przedstawiono na rys. 6.

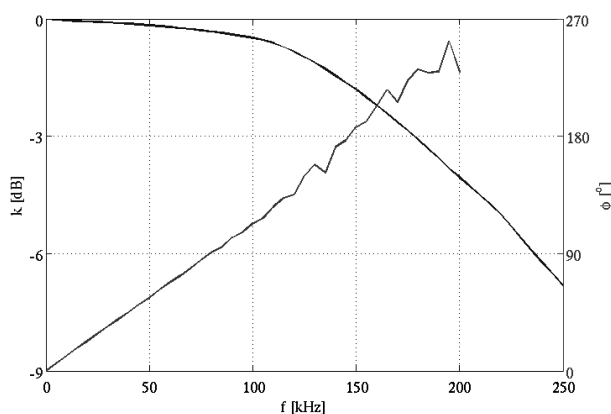


Rys. 6. Zasada działania izolatora pojemnościowego; 1 – modulator lub układ przełączający, 2 – bariera pojemnościowa, 3 – demodulator lub układ przełączający, 4 – układ wyjściowy, 5 – sterownik układu izolatora  
Fig. 6. Principle of operation of capacitive isolation amplifier; 1 – modulator or switching circuitry, 2 – capacitive barrier, 3 – demodulator or switching circuitry, 4 – input circuitry, 5 – controller

Na rys. 7 przedstawiono przykładową charakterystykę statyczną izolatora z barierą pojemnościową w wybranym zakresie napięć wejściowych oraz błąd nieliniowości tej charakterystyki, natomiast na rys. 8 przykładowe charakterystyki częstotliwościowe amplitudową i fazową.



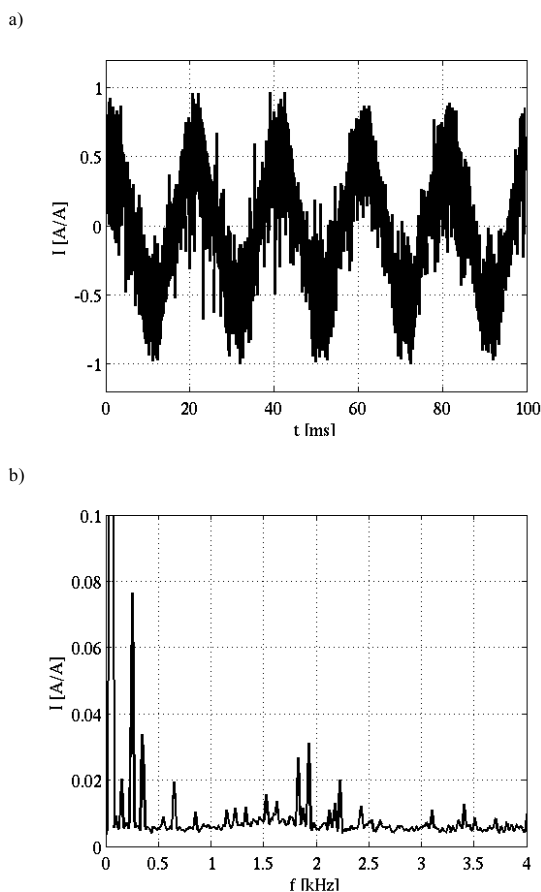
Rys. 7. Charakterystyka statyczna i błąd nieliniowości izolatora z barierą pojemnościową; 1-charakterystyka statyczna, 2-błąd nieliniowości  
Fig. 7. Output and nonlinearity error vs input voltage of a capacitive isolation amplifier; 1 – output voltage, 2 – nonlinearity error



Rys. 8. Charakterystyki częstotliwościowe izolatora galwanicznego z barierą pojemnościową; 1-charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa, 2-charakterystyka fazowo-częstotliwościowa  
Fig. 8. Frequency response of isolation amplifier with a high-voltage capacitive barrier; 1- amplitude vs frequency, 2 – phase vs frequency

Badania aplikacyjne opracowanych układów izolatorów galwanicznych z barierą pojemnościową przeprowadzono na energoelektronicznych sterowanych układach stosowanych do zasilania

odbiorników średniej mocy w Katedrze Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych AGH. Wykonano m. in. pomiary silnie odkształconego prądu falownika zbudowanego na tranzystorach IGBT z modulacją PWM o częstotliwości przełączania 19 kHz, o nominalnej wartości napięcia sterowanego 650 V i nominalnym prądzie ok. 40 A. Celem pomiarów było sprawdzenie skuteczności działania izolatorów galwanicznych z barierą pojemnościową w zastosowaniu do analizy widmowej mierzonego sygnału. Na rys. 9 przedstawiono przebieg czasowy sygnału oraz wyniki jego analizy.



Rys. 9. Przebieg czasowy prądu falownika a) oraz jego widmo częstotliwościowe b). Wartość prąжка widma dla częstotliwości 50Hz przyjęto równą jedności

Fig. 9. a) Time-series of a converter current and b) it's frequency spectrum. Spectrum normalized to a first (50 Hz) harmonic

## 5. Informacje o przedstawionych opracowaniach

Źródłem finansowania przedstawionych opracowań był projekt rozwojowy Ministerstwa NiSzw, zatem bardziej szczegółowe informacje zawarte są w sprawozdaniu z wykonania tego projektu. Projekt został wykonany przez zespół Katedry Metrologii na Wydz. EAIiE AGH pod kier. prof. Michała Szypra. Kontakt w sprawach merytorycznych: dr hab. inż. Andrzej Biń (tel. (012) 617 28 73 email: abien@agh.edu.pl); kontakt w sprawach formalnych: Centrum Transferu Technologii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2008, jako projekt badawczy rozwojowy.