

New Quality of Current Measurement in Power Switchgear with the Use of PCB Sensors

Authors

Aleksander Lisowiec
 Andrzej Nowakowski
 Paweł Wlazło

Keywords

current transducer, digital signal processing, PCB technology

Abstract

In the paper separable and non-separable current transducers using printed circuit board technology have been presented. The transducers are characterized by a measurement range from a fraction of an ampere to 100 kA, perfect linearity and measurement bandwidth from 10 Hz to 20 kHz. The PCB technology makes it possible to obtain very high repeatability of transducer electrical parameters. The spread in the value of the most important parameter – the sensitivity, in a typical production lot is less than 0.5%. The same transducer can work simultaneously with protection device and power meter. The wide bandwidth of the transducer made in PCB technology enables its use in power quality analyzers. The additional advantage of PCB technology is the possibility to integrate the transducer with signal processing circuits. The construction of separable current transducer using PCB technology makes it possible to install it over the wire with measured current without disconnecting primary circuits. Transducers made in PCB technology have very symmetric secondary winding which is a crucial factor in ensuring that the measurement results are largely independent of the external magnetic fields not associated with the measured current.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2015206

1. Introduction

Air-core current to voltage transducers based on Rogowski coil principle have been known for a long time [1]. However only recently, thanks to the advent of modern electronic circuits that do not require high-level/high energy input signals, they have found use as current sensors in power industry. Microprocessor controlled measurement devices used in power switchgear represent very small load for voltage and current measurement transducers. New technologies used for manufacture of low power air core current transducers with high dynamic range and wide measurement bandwidth enable the integration and miniaturization of primary and secondary circuits in power switchgear, which are the key element in Smart Grid networks.

The traditional technologies used for making Rogowski coil consisted of winding a wire on a nonmagnetic tubular carcass. The development of printed circuit board (PCB) technology has enabled the development of new technologies for the manufacture of air-core current transducers [2, 3]. The transducer is constructed from multilayer PCBs attached to a base board, which provides mechanical support and connects all boards together electrically, Fig. 1. On each layer of the multilayer board, there is

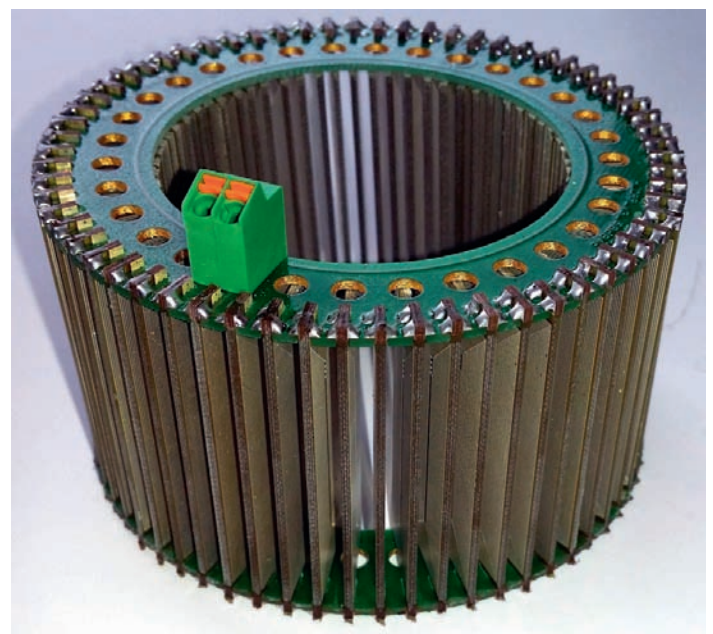


Fig. 1. Construction of the current transducer manufactured in PCB technology

a basic coil in the form of a spiral. The coils on neighboring layers are connected by vias, which may be buried or through. The main advantages of current transducers based on Rogowski coil principle are perfect linearity, extremely wide measurement range – from a fraction of Ampere to 100 kA and frequency bandwidth up to several kHz. The PCB technology brings about additional advantages over the traditional technology of making the air-core current transducers.

2. The advantages of PCB technology in air-core current transducer manufacture

2.1. Design freedom

PCB technology allows easy modification of the construction of air-core current transducers. All that is needed to obtain a transducer with different dimensions is to redesign the base board, Fig. 2. Also the conversion factor (sensitivity) – a transducer parameter defined below, can be easily modified by changing the number of multilayer boards mounted on the base board.

2.2. Symmetry

Another important advantage of PCB technology in transducer manufacture is the perfect symmetry of the transducer. Every multilayer board attached to the base board has a corresponding board lying on the opposite side of the base board. This symmetry ensures that the output voltage of the transducer is immune to the external magnetic field not associated with the measured current.

2.3. Repeatability of electrical parameters

PCB technology guaranties very high repeatability of electrical parameters of the transducer. The most important transducer parameter is the current-voltage conversion factor (also called sensitivity), which is the ratio of the RMS value of the voltage at the (open) output terminals of the transducer to the RMS value



Fig. 2. Current transducer of various sizes

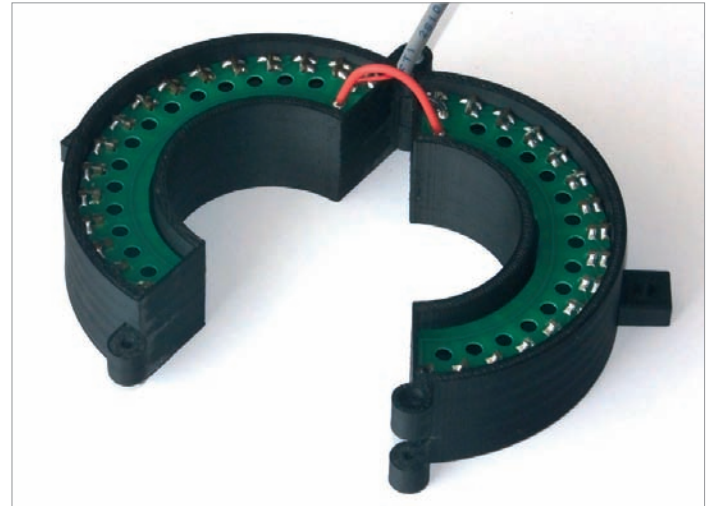


Fig. 3. Splittable current transducer – detached halves

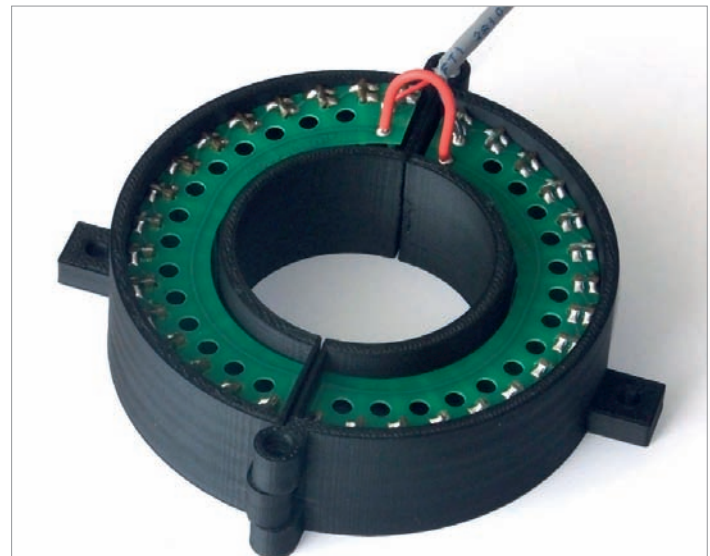


Fig. 4. Splittable current transducer – joined halves

of the 50 Hz sinusoidal current flowing in the conductor through the transducer. Typical spread of conversion factor values in a production lot is less than 0.5% around the mean and more than half of the transducers have sensitivities within 0.1% of the mean value.

2.4. Possibility to manufacture the splittable transducer

PCB technology is well suited to the construction of a splittable transducer [3]. This transducer is composed of two halves that can be split, Fig. 3, which allows easy mounting on the wire. Unlike splittable transducers manufactured in traditional technology, the splittable transducers manufactured in PCB technology preserve the perfect symmetry after the halves are joined together, Fig. 4.

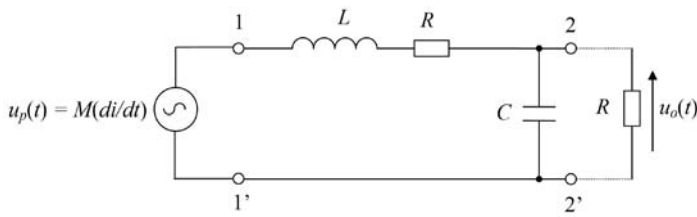


Fig. 5. Air-core current transducer electrical equivalent circuit

3. Transducer electrical parameters

Transducer equivalent electrical circuit is presented in Fig. 5. It consists of a voltage source with the output proportional to the time derivative of the measured current in series with the transducer self inductance L , resistance of the copper track forming the coils R and inter-turn capacitance C . The constant M is the mutual inductance of the transducer and it is proportional to the area of the single turn and to the turns density along the diameter of the transducer.

The frequency measurement bandwidth of the transducer is determined by the frequency characteristic of the transmittance $H(f)$ formed by L , R and C , between terminals 1–1' and 2–2'.

$$H(f) = \frac{1}{1 + i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C - (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot L \cdot C} \quad (1)$$

where i is the imaginary unit.

Generally the higher the transducer sensitivity, the larger the values of L , R and C are and consequently the lower the transducer bandwidth is. The amplitude and phase frequency characteristics of $H(f)$ for a commercial CR-55 transducer with 1 mV/A sensitivity and inner diameter equal to 55 mm, manufactured using PCB technology, have been presented in Fig. 6 and 7. For frequencies considerably lower than the transducer resonant frequency, the $H(f)$ amplitude and phase frequency characteristics are almost flat, Fig. 8 and 9.

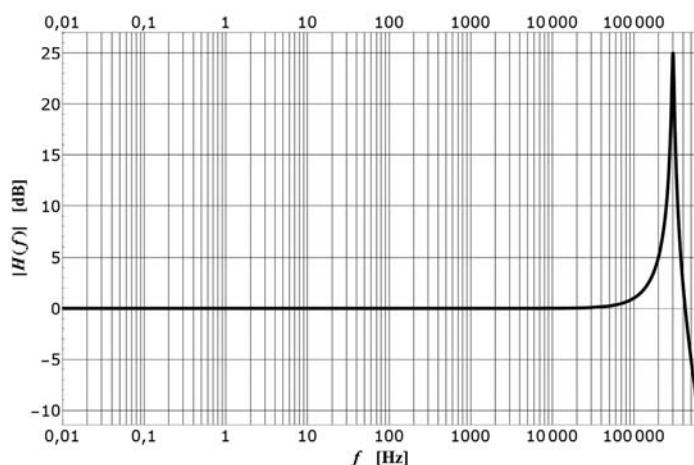


Fig. 6. $H(f)$ amplitude frequency characteristic

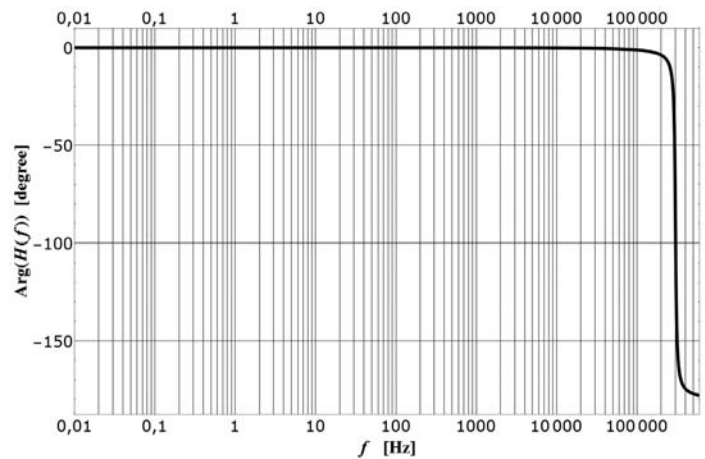


Fig. 7. $H(f)$ phase frequency characteristic

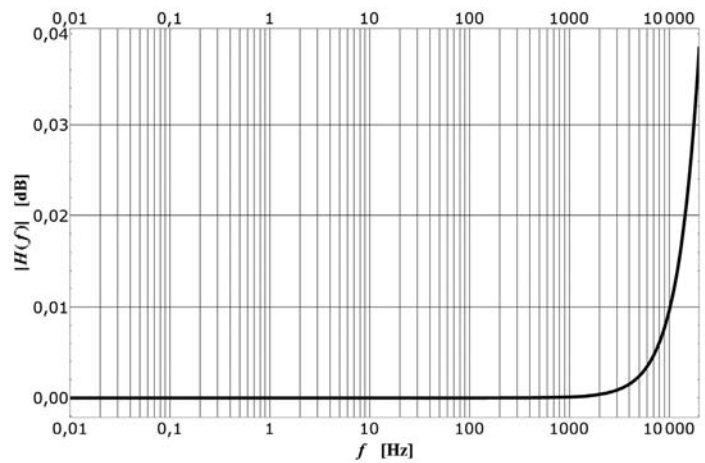


Fig. 8. $H(f)$ amplitude frequency characteristic in limited frequency range

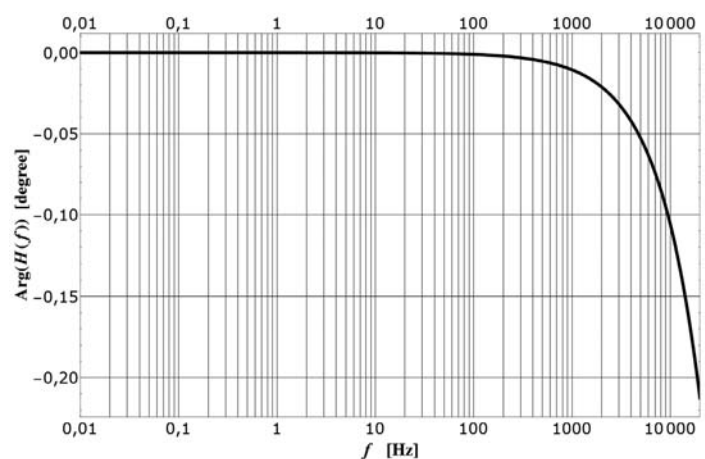


Fig. 9. $H(f)$ phase frequency characteristic in limited frequency range

4. Processing of the transducer output

Processing of the air-core transducer output in modern electronic devices is done in digital domain. First, the output voltage is low pass filtered to prevent aliasing and sampled. Next, the digital samples are subjected to resampling procedure in order to obtain the whole number of samples per period irrespective of the signal fundamental frequency. The digital sample train is integrated and finally the spectrum of the signal is determined by Discrete Fourier Transform.

Anti-aliasing and resampling filters can be implemented in such a way [4] that they have negligible influence on the accuracy of signal reconstruction. It is the digital integration that limits the bandwidth of the signal processing path. The methods of digital integration are well known [5] and the most common ones are trapezoidal and Simpson's methods [5]. The digital Simpson's integrator is particularly advantageous because its frequency characteristic is close to the ideal integrator frequency characteristic up to the one fourth of the sampling frequency. The digital implementation of Simpson's integrator is done according to

$$y_{n+1} = y_{n-1} + \frac{1}{3} \cdot (x_{n+1} + 4 \cdot x_n + x_{n-1}) \quad (2)$$

The accuracy of mapping of the measured current to its digital representation depends on the transfer function of the transducer, $T(f)$ (which includes the differentiation of the measured current)

$$T(f) = i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot H(f) \quad (3)$$

and the transfer function of the integrator, $F(f)$. $F(f)$ in the case of Simpson's formula (2) has the form

$$F(f) = \frac{e^{\frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{f_s}} + 4 + e^{-\frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{f_s}}}{3 \left(e^{\frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{f_s}} - e^{-\frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{f_s}} \right)} \quad (4)$$

where f_s is the sampling frequency.

The amplitude and phase frequency characteristics of the product of $T(f)$ (where $T(f)$ in this case is the transfer function of CR-55 current transducer) and $F(f)$, have been presented in Fig. 10 and 11 for $f_s = 102.4$ kHz. As can be seen, the spectrum of the signal is reproduced faithfully up to 400-th harmonic.

5. Conclusion

Air-core current transducers manufactured in PCB technology enable current measurement in the range up to 100 kA. The wide bandwidth makes it possible to determine the spectrum of the signal up to 400-th harmonic. The transducers have very repeatable electrical parameters and a single transducer can work with a protection device, power quality analyzer and metering device [6] thus enabling the construction of new switchgear with much lower raw material use and better measurement

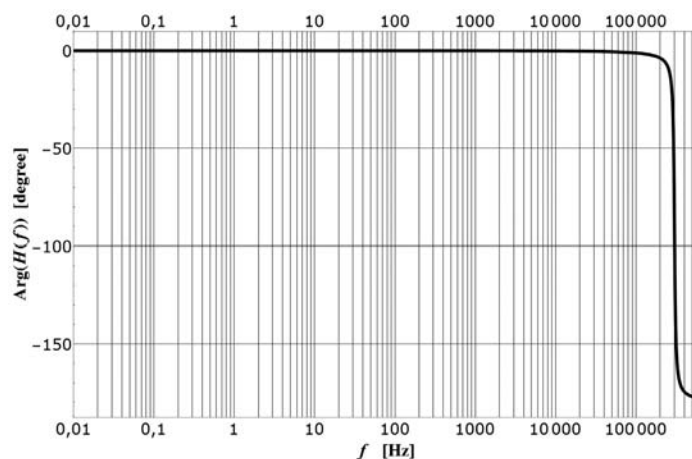


Fig. 10. Amplitude frequency characteristic of the current signal processing path

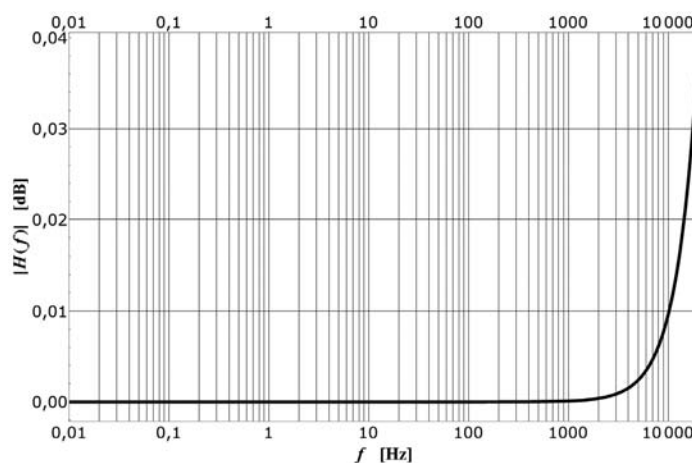


Fig. 11. Phase frequency characteristic of the current signal processing path

characteristics than those of the switchgear that use traditional current transformers.

Acknowledgment

This work was supported in part by The National Centre for Research and Development in Poland (Project No. PBS1/B4/2/2012).

REFERENCES

1. Tumański S., Induction coil sensors – a review, *Measurement, Science and Technology* 2007, Vol. 18, No. 3, R31-R46.
2. Lisowiec A., Kowalski G., Analiza wpływu geometrii przetworników prądowo-napięciowych na ich parametry elektryczne, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2014, No. 06, pp. 36–38
3. Lisowiec A., Kowalski G., Bezdrzeniowe przetworniki prądowe o konstrukcji rozłączalnej, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2014, No. 06, pp. 33–34.

4. Oppenheim A.V., Schafer R.W., Discrete-Time Signal Processing, Prentice Hall, 1998.
 5. Hamming R. W., Digital Filters, Prentice-Hall, 1983.
 6. Przybysz R., Wlazło P., Kowalski G., Bezrdzeniowy przetwornik prądowy jako element sieci sensorycznej AMI, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2014, No. 12, pp. 49–51.
-

Aleksander Lisowiec

Tele & Radio Research Institute, Warsaw
e-mail: aleksander.lisowiec@itr.org.pl

A graduate of Warsaw University of Technology. His current position is The Head of Smart Grid ICT Systems Department. His research is centered on new constructions of current and voltage transducers, tele-information systems in power industry and digital signal processing. Author of 70 scientific publications.

Andrzej Nowakowski

Tele & Radio Research Institute, Warsaw
e-mail: andrzej.nowakowski@itr.org.pl

A graduate of Gdańsk University of Technology. His current position is The Deputy Director for Research and Development. He is the author of 150 publications and 25 patents. He has developed many innovative solutions that have been implemented in protection equipment and telecommunication and information systems in power industry.

Paweł Wlazło

Tele & Radio Research Institute, Warsaw
e-mail: pawel.wlazlo@itr.org.pl

Graduate of Warsaw University of Technology, Electronics Department, specialty – automation.

His research interests include: communication and information technologies in power protection and monitoring equipment, used defined logic in bay controllers, smart power grids, industrial and medical measuring and diagnostic equipment.

Head of ICT and Electronics Centre. Author of numerous publications including nine publications in 2014.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 59–63. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Nowa jakość pomiaru prądów za pomocą sensorów PCB w rozdzielnicach energetycznych

Autorzy

Aleksander Lisowiec
Andrzej Nowakowski
Paweł Włazło

Słowa kluczowe

przetwornik prądowy, cyfrowe przetwarzanie sygnałów, technologia PCB

Streszczenie

W artykule przedstawiono rozłączalne i nierozłączalne bezrdzeniowe przetworniki prądowe wykonane w technologii wielowarstwowych obwodów drukowanych (PCB). Przetworniki te charakteryzują się zakresem pomiaru od ułamka ampera do 100 kA, doskonałą liniowością oraz pasmem częstotliwości od 10 Hz do 20 kHz. Zastosowana technologia PCB umożliwia uzyskanie dużej powtarzalności parametrów elektrycznych przetworników. Rozrzut najważniejszego parametru przetwornika, jakim jest współczynnik przetwarzania (czułość), w typowej partii produkcyjnej jest na poziomie poniżej 0,5%. Dzięki temu ten sam przetwornik może współpracować z urządzeniami zabezpieczeniowymi oraz urządzeniami pomiarowymi służącymi do rozliczania energii. Uzyskana szerokość częstotliwościowego pasma pomiarowego umożliwia zastosowanie tych przetworników prądu w analizatorach jakości energii. Zaletą zastosowania technologii PCB jest możliwość integracji przetworników prądowych z układami przetwarzania sygnałów. Konstrukcja rozłączalnego przetwornika prądowego wykonanego w technologii PCB umożliwia zainstalowanie go na przewodzie z mierzonym prądem bez rozłączania prądowych obwodów pierwotnych. Przetworniki wykonane w technologii PCB charakteryzują się doskonałą symetrią uzwojenia, dzięki temu wynik pomiaru za pomocą przetwornika jest w dużej mierze niezależny od zewnętrznych pól magnetycznych niezwiązanych z mierzonym prądem.

1. Wstęp

Bezrdzeniowe przetworniki prądu na napięcie pracujące na zasadzie cewki Rogowskiego są znane od wielu lat [1]. Jednak dopiero ostatnio, dzięki nowoczesnym układom elektronicznym,

niewymagającym dużych sygnałów, znalazły zastosowanie jako sensory prądu w elektroenergetyce. Powszechnie używane w rozdzielnicach energetycznych mikroprocesorowe urządzenia pomiarowe przedstawiają sobą bardzo małe obciążenie dla układników pomiarowych napięcia i prądu. Nowe technologie wytwarzania niskomocowych bezrdzeniowych przetworników prądu o wysokim zakresie pomiarowym i szerokim paśmie częstotliwości umożliwiają zintegrowanie oraz miniaturyzację obwodów pierwotnych i wtórnych rozdzielnic energetycznych, które są kluczowym elementem sieci Smart Grid.

Tradycyjne technologie wykonywania cewek Rogowskiego polegały na nawijaniu uzwojenia drutem na niemagnetycznym toroidalnym karkasie. Rozwój technologii wielowarstwowych obwodów drukowanych umożliwił jej zastosowanie do wytwarzania bezrdzeniowych przetworników prądowych [2, 3]. Przetwornik jest skonstruowany z wielu wielowarstwowych płytek PCB przymocowanych do płytki bazowej, która zapewnia sztywność mechaniczną oraz łączy wszystkie płytki elektrycznie (fot. 1). Na każdej z warstw wielowarstwowej płytki znajduje się cewka drukowana w postaci spirali. Cewki na sąsiadujących warstwach są połączone przelotkami, które mogą być zagrzebane.

Głównymi zaletami przetworników prądowych pracujących na zasadzie cewki Rogowskiego są doskonała liniowość, niezwykle szeroki zakres pomiarowy – od ułamków ampera do 100 kA oraz pasmo częstotliwości sięgające kilkudziesięciu kHz. Zastosowanie technologii PCB daje dodatkowe korzyści przy wytwarzaniu przetworników.

2. Zalety stosowania technologii PCB w produkcji bezrdzeniowych przetworników prądowych

2.1. Łatwość tworzenia przetworników o różnych wymiarach

Technologia PCB umożliwia łatwą modyfikację konstrukcji przetwornika. Najczęściej jedyna zmiana polega na zaprojektowaniu płytki bazowej o innych wymiarach (fot. 2). Łatwa jest też modyfikacja współczynnika przetwarzania (czułości) przetwornika – parametr ten został zdefiniowany poniżej, przez zmianę liczby wielowarstwowych płytek na obwodzie.

2.2. Symetria

Kolejną istotną zaletą stosowania technologii PCB przy wytwarzaniu przetworników jest ich doskonała symetria. Każda wielowarstwowa płytka przymocowana do płytki bazowej posiada odpowiadającą jej płytkę po przeciwnej stronie obwodu. Symetria ta powoduje, że napięcie wyjściowe przetwornika jest niewrażliwe na zewnętrzne pola magnetyczne niezwiązane z mierzonym prądem.

2.3. Powtarzalność parametrów elektrycznych

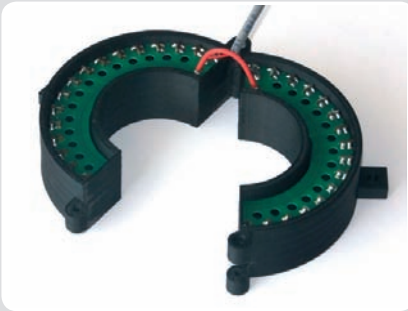
Technologia PCB gwarantuje dużą powtarzalność parametrów elektrycznych przetworników. Najważniejszym parametrem przetwornika jest współczynnik przetwarzania prądu na napięcie (zwany również czułością), który jest ilorazem wartości RMS napięcia na wyjściu nieobciążonego przetwornika do wartości RMS prądu sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz, płynącego w obwodzie pierwotnym. Typowy rozrzut współczynnika przetwarzania w partii produkcyjnej jest mniejszy niż 0,5% wokół wartości średniej, a ponad połowa przetworników mieści się z w przedziale $\pm 0,1\%$ wokół wartości średniej.



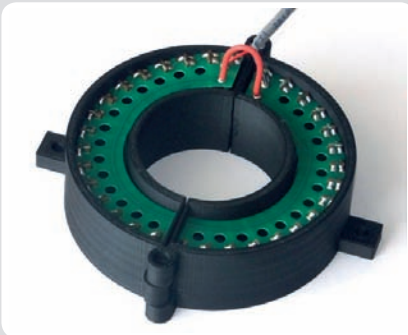
Fot. 1. Konstrukcja bezrdzeniowego przetwornika wykonanego w technologii PCB



Fot. 2. Przetworniki o różnych wymiarach



Fot. 3. Przetwornik o konstrukcji rozłączalnej z rozchylonymi połówkami



Fot. 4. Przetwornik o konstrukcji rozłączalnej ze złączonymi połówkami

2.4. Możliwość wytwarzania przetwornika rozłączalnego

Technologia PCB dobrze nadaje się do wytwarzania przetwornika rozłączalnego [3]. Przetwornik składa się z dwóch połówek, które mogą być rozłączone (fot. 3), co umożliwia łatwy montaż na przewodzie, bez rozłączania obwodów pierwotnych. W przeciwieństwie do przetworników wykonanych w tradycyjnej technologii nawijania drutem, przetwornik rozłączalny wykonany w technologii wielowarstwowych obwodów drukowanych po złączeniu zachowuje pełną symetrię (fot. 4).

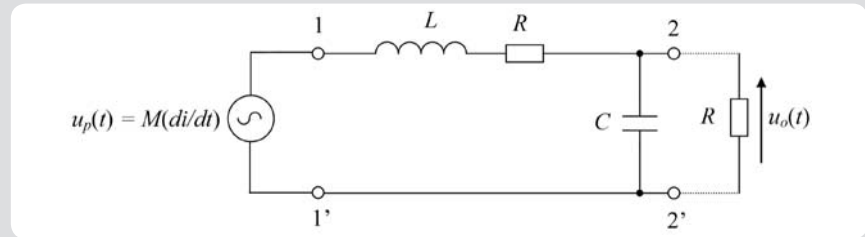
3. Parametry elektryczne przetwornika

Elektryczny układ zastępczy przetwornika został przedstawiony na rys. 1. Składa się on ze źródła napięciowego o napięciu proporcjonalnym do pochodnej mierzonego prądu połączonego szeregowo z indukcyjnością wzajemną L , rezystancją przetwornika R , wynikającą z rezystancji ścieżki miedzi tworzącej zwoje obwodu wtórnego, oraz pojemnością międzyzwojową C . Współczynnik M jest indukcyjnością wzajemną przetwornika i jest on proporcjonalny do powierzchni pojedynczego zwoju na warstwie wielowarstwowej płytki drukowanej oraz do gęstości zwojów na obwodzie przetwornika.

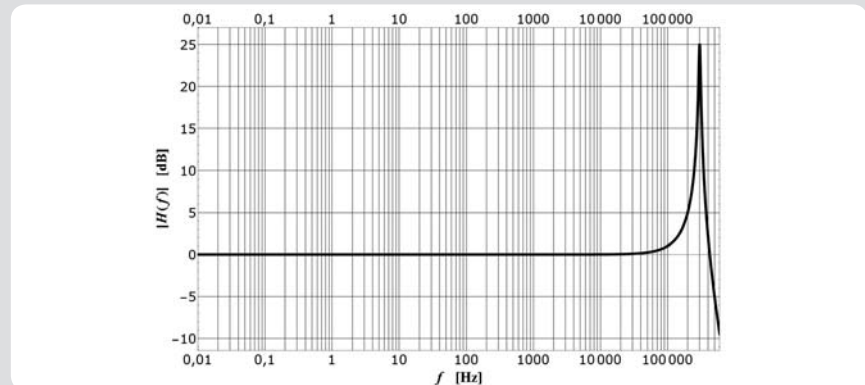
Szerokość pasma pomiarowego przetwornika jest determinowana charakterystyką częstotliwościową transmitancji $H(f)$ utworzonej przez L , R i C , między końcówkami 1-1' i 2-2',

$$H(f) = \frac{1}{1 + i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C - (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot L \cdot C} \quad (1)$$

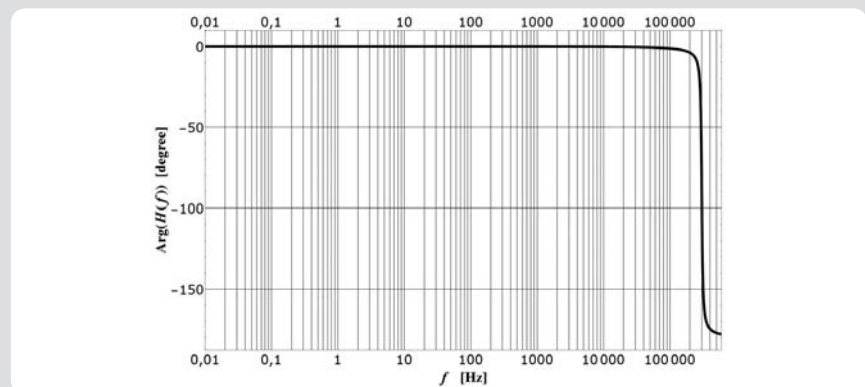
gdzie i jest jednostką urojoną.



Rys. 1. Równoważny elektryczny układ zastępczy przetwornika bezrdzeniowego



Rys. 2. Amplitudowa charakterystyka transmitancji $H(f)$



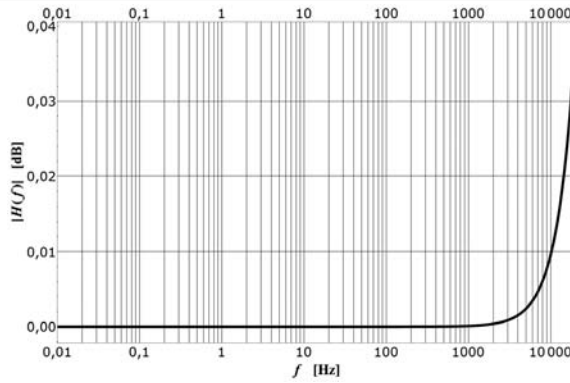
Rys. 3. Fazowa charakterystyka transmitancji $H(f)$

Modyfikacja konstrukcji przetwornika w kierunku uzyskania większej wartości współczynnika przetwarzania prowadzi do zwiększania wartości L , R i C i tym samym obniża pasmo pomiarowe. Charakterystyki amplitudowa i fazowa $H(f)$ przetwornika o symbolu CR-55, czułości 1 mV/A i wewnętrznej średnicy równej 55 mm, wykonanego w technologii PCB, zostały przedstawione na rys. 2 i 3. Dla częstotliwości znacznie mniejszych od częstotliwości rezonansowej, charakterystyki amplitudowa i fazowa $H(f)$ są prawie płaskie, rys. 4 i 5.

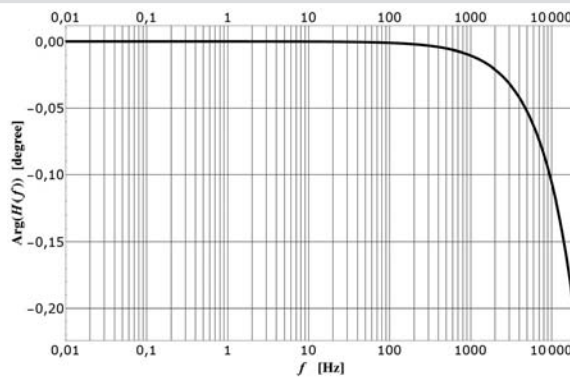
4. Przetwarzanie sygnału wyjściowego przetwornika

Przetwarzanie sygnału wyjściowego przetwornika w nowoczesnych urządzeniach elektronicznych odbywa się na drodze cyfrowej. Sygnał wyjściowy przetwornika przechodzi przez filtr dolnoprzepustowy w celu zapobieżenia krzyżowaniu pasma, a następnie jest próbkowany. Ciąg próbek

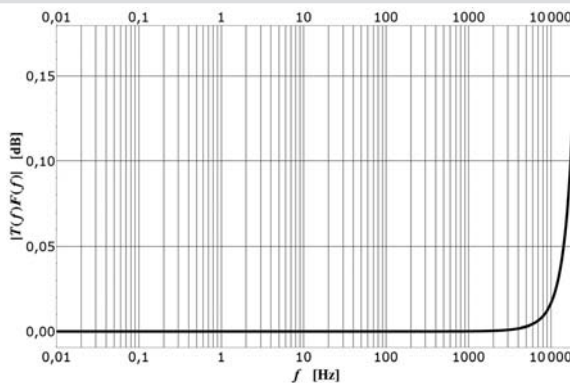
cyfrowych jest poddany operacji repróbkiwania w celu otrzymania całkowitej ilości próbek na okres niezależnie od wartości częstotliwości składowej podstawowej sygnału. Kolejną operacją jest całkowanie, po czym widmo sygnału jest wyznaczone za pomocą dyskretnej transformaty Fouriera. Prawidłowa implementacja filtrów antyaliasingowych oraz operacji repróbkiwania ma znikomy wpływ na prawidłowość odtworzenia kształtu sygnału [4]. Operacją, która ogranicza pasmo toru przetwarzania sygnału, jest całkowanie. Istnieje wiele znanych metod cyfrowego całkowania [5], z których najczęściej stosowanymi są metody trapezoidalna i metoda Simpsona [5]. W stosunku do metody trapezoidalnej całkowanie za pomocą metody Simpsona posiada zalety, gdyż charakterystyka częstotliwościowa integratora Simpsona jest bliska charakterystyki idealnego integratora do częstotliwości równej jednej czwartej częstotliwości próbkowania. Równanie całkowania metodą Simpsona:



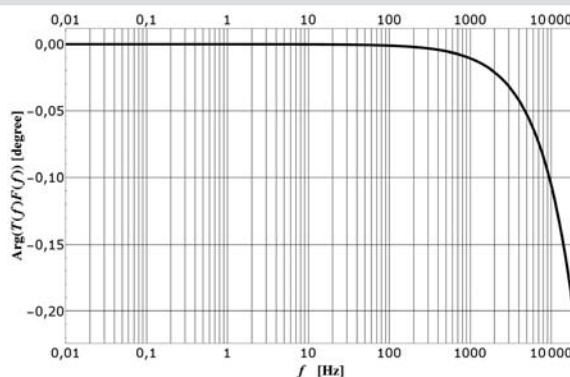
Rys. 4. Amplitudowa charakterystyka transmitancji $H(f)$ w ograniczonym zakresie częstotliwości



Rys. 5. Fazowa charakterystyka transmitancji $H(f)$ w ograniczonym zakresie częstotliwości



Rys. 6. Amplitudowa charakterystyka toru przetwarzania sygnału prądowego



Rys. 7. Fazowa charakterystyka toru przetwarzania sygnału prądowego

$$y_{n+1} = y_{n-1} + \frac{1}{3} \cdot (x_{n+1} + 4 \cdot x_n + x_{n-1}) \quad (2)$$

Dokładność odwzorowania mierzonego prądu za pomocą cyfrowej reprezentacji zależy od funkcji przenoszenia przetwornika $T(f)$ (zawierającej w sobie transmancję operacji różniczkowania)

$$T(f) = i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot H(f) \quad (3)$$

i funkcji przenoszenia układu całkującego $F(f)$. W przypadku formuły Simpsona (2) $F(f)$ wyraża poniższe równanie

$$F(f) = \frac{e^{\frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{f_s}} + 4 + e^{-\frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{f_s}}}{3 \left(e^{\frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{f_s}} - e^{-\frac{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{f_s}} \right)} \quad (4)$$

gdzie f_s jest częstotliwością próbkującą.

Charakterystyki amplitudowa i fazowa iloczynu $T(f)$ (gdzie $T(f)$ jest funkcją przenoszenia przetwornika CR-55) i $F(f)$ zostały przedstawione na rys. 6 i 7 dla $f_s = 102,4$ kHz. Widmo jest odtworzone wiernie do 400-tej harmonicznej.

5. Podsumowanie

Przetworniki bezrdzeniowe wytwarzane w technologii PCB umożliwiają pomiar prądu w zakresie do 100 kA. Szerokość pasma pomiarowego umożliwia wyznaczenie harmonicznej prądu do 400-tego rzędu. Przetworniki charakteryzują się dużą powtarzalnością parametrów elektrycznych i pojedynczy przetwornik może współpracować z urządzeniem zabezpieczeniowym, analizatorem jakości energii i licznikiem rozliczeniowym, co umożliwia konstrukcję nowych rozdzielnic o mniejszej materiałochłonności i lepszych parametrach metrologicznych od konstrukcji używających tradycyjnych przekładników prądowych.

W artykule przedstawiono wyniki prac prowadzonych w ramach projektu (Projekt nr PBS1/B4/2/2012) dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Bibliografia

1. Tumański S., Induction coil sensors – a review, *Measurement, Science and Technology* 2007, Vol. 18, No. 3, R31-R46.
2. Lisowiec A., Kowalski G., Analiza wpływu geometrii przetworników prądowo-napięciowych na ich parametry elektryczne, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2014, nr 6, s. 36–38.
3. Lisowiec A., Kowalski G., Bezrdzeniowe przetworniki prądowe o konstrukcji rozłączalnej, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2014, nr 6, s. 33–34.
4. Oppenheim A.V., Schafer R.W. *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall, 1998.
5. Hamming R.W., *Digital Filters*, Prentice-Hall, 1983.
6. Przybysz R., Wlazło P., Kowalski G., Bezrdzeniowy przetwornik prądowy jako element sieci sensorycznej AMI, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2014, nr 12, s. 49–51.

Aleksander Lisowiec

dr inż.

Instytut Tele- i Radiotechniczny, Warszawa

e-mail: aleksander.lisowiec@itr.org.pl

Ukończył studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej. Sprawuje funkcję kierownika Zakładu Systemów Teleinformatycznych Smart Grid. Obszar jego zainteresowań zawodowych obejmuje: nowe konstrukcje przetworników pomiarowych stosowanych w energetyce oraz cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Jest autorem 70 publikacji naukowych.

Andrzej Nowakowski

dr hab. inż., prof. nadzw. ITR

Instytut Tele- i Radiotechniczny, Warszawa

e-mail: andrzej.nowakowski@itr.org.pl

Ukończył studia na Politechnice Gdańskiej. Sprawuje funkcję zastępcy dyrektora Instytutu ds. Badawczo-Rozwojowych. Autor ok. 150 publikacji i 25 patentów oraz wielu nowatorskich rozwiązań wdrożonych w energetyce z zakresu mikroprocesorowych urządzeń EAZ i systemów teleinformatycznych.

Paweł Włazło

mgr inż.

Instytut Tele- i Radiotechniczny w Warszawie

e-mail: pawel.wlazlo@itr.org.pl | www.energetyka.itr.org.pl

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1993), kierunku automatyka. Autor wielu publikacji naukowych, w tym 9 opublikowanych w 2014 roku. Jego zainteresowania zawodowe obejmują: zagadnienia związane z teleinformatyką urządzeń EAZ, logiką użytkownika w sterownikach polowych, sieciami Smart Grid, a także przemysłową i medyczną aparaturą pomiarową oraz diagnostyczną. Pracuje na stanowisku kierownika Centrum Teleinformatyki i Elektroniki.