

Parametry częstotliwościowe przetworników prądowych wykonanych w technologii PCB¹ HDI²

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów oraz analizę charakterystyk częstotliwościowych przetworników prądowych wykonanych w technologii PCB HDI. Najpierw omówiono konstrukcję bezrdzeniowych przetworników wykonanych w technologii PCB HDI. Następnie określono wartości elementów układu zastępczego przetwornika bezrdzeniowego. Na koniec przytoczono charakterystyki częstotliwościowe przetworników bezrdzeniowych wykonanych w tradycyjnej technologii PCB oraz w technologii HDI.

1. WSTĘP

Przetworniki prądowe pracujące na zasadzie cewki Rogowskiego, wykonane w tradycyjnej technologii wielowarstwowych PCB, charakteryzują się szerokim zakresem częstotliwości pracy. Częstotliwość rezonansu własnego tych przetworników wynosi powyżej 100 kHz, a błąd fazy oraz amplitudy w zakresie do 20 kHz jest pomijalny. Zastosowanie technologii PCB HDI do konstrukcji tych przetworników ma na celu zwiększenie ich czułości. Wiąże się to jednak ze zmianami parametrów elektrycznego układu zastępczego, a zwłaszcza ze wzrostem rezystancji oraz indukcyjności własnej przetworników. Powoduje to obniżenie częstotliwości rezonansu własnego, a tym samym zwężenie zakresu częstotliwości pracy.

Bezrdzeniowe przetworniki prądowe pracujące na zasadzie cewki Rogowskiego, wykonane w tradycyjnej technologii wielowarstwowych obwodów drukowanych, o szerokości ścieżki powyżej 100 μm i odstępem między ścieżkami powyżej 100 μm , charakteryzują się czułością do 5 mV/A [1, 2]. Wykorzystanie takich przetworników do pomiaru prądów o wartości skutecznej poniżej 1 A wiąże się z dużą niepewnością pomiaru z powodu małej wartości

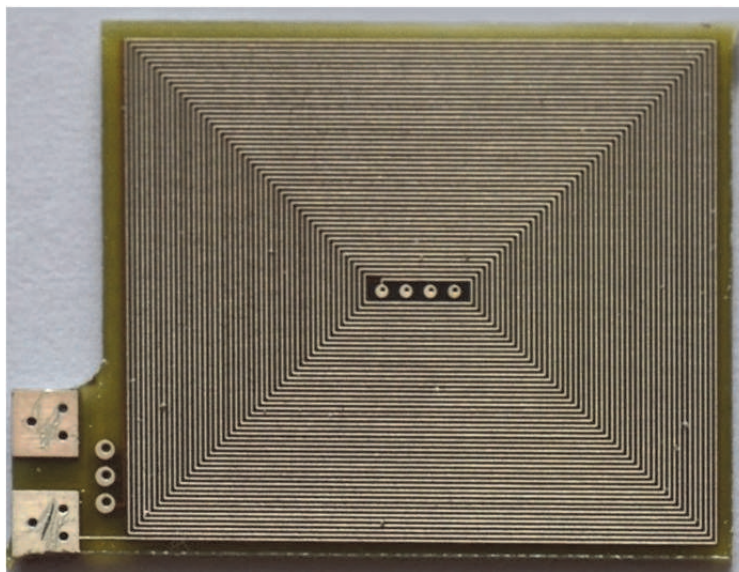
sygnału wyjściowego. Istnieje zapotrzebowanie na przetworniki prądowe o większej czułości, które mogłyby zostać zastosowane do pomiaru prądów o małych wartościach. Rozszerzenie dolnego zakresu mierzonych prądów poniżej 1 A wymaga zastosowania przetworników o czułości powyżej 5 mV/A. Zwiększenie czułości bezrdzeniowych przetworników prądowych jest możliwe przez zastosowanie technologii wielowarstwowych obwodów drukowanych o wysokiej gęstości połączeń – HDI (ang. *High Density Interconnect*).

2. KONSTRUKCJA BEZRZENIOWYCH PRZETWORNIKÓW WYKONANYCH W TECHNOLOGII PCB HDI

Technologia HDI charakteryzuje się mniejszą szerokością ścieżek obwodu drukowanego (poniżej 100 μm) oraz mniejszym odstępem między ścieżkami niż tradycyjna technologia PCB [3]. Większa gęstość mozaiki obwodu drukowanego pozwala stworzyć na tej samej powierzchni obwodu drukowanego większą ilość spiralnych zwojów tworzących przetwornik. Przekłada się to bezpośrednio na zwiększoną czułość przetwornika. Na rys. 1. ukazano płytkę wielowarstwową – tzw. listek z naniesioną spiralnie cewką – wykonaną w technologii HDI.

¹ PCB (ang. *Printed Circuit Board*) – płytka drukowana.

² HDI (ang. *High Density Interconnect*) – wysoka gęstość połączeń (upakowania).



Rys. 1. Cewka spiralna wykonana w technologii PCB HDI [3]

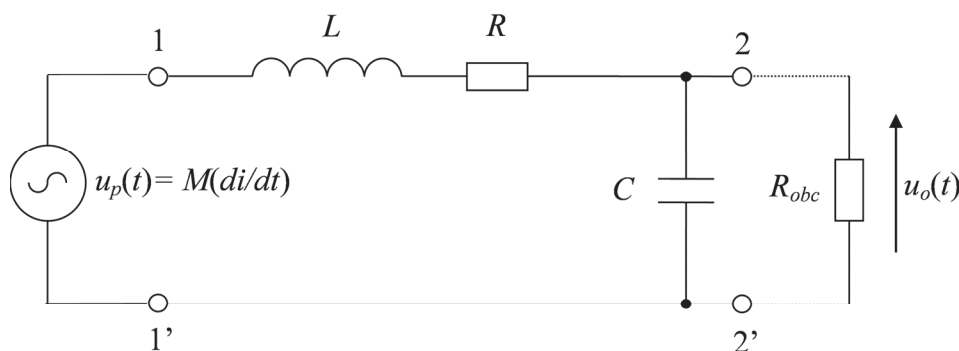
Zmniejszenie szerokości ścieżek oraz zwiększenie długości ścieżki miedzi tworzącej przetwornik powoduje zwiększenie indukcyjności własnej przetwornika oraz zwiększenie jego rezystancji. Teoretycznie rezystancja przetwornika o dwukrotnie większej liczbie zwojów oraz szerokości ścieżki zmniejszonej w stosunku 75% do przetwornika o rezystancji $1\text{ k}\Omega$, wykonanego w tradycyjnej technologii PCB, powinna wzrosnąć $2/0,75$ razy, czyli do wartości ok. $2,7\text{ k}\Omega$. W praktyce rezystancja przetwornika zależy od rodzaju laminatu – grubości warstwy miedzi, z której jest wykonany przetwornik – oraz od samego procesu trawienia. Wraz ze zmniejszaniem się grubości ścieżki zwiększają się jej podtrawienia, co ma znaczny wpływ na rezystancję. Pomiary rezystancji przetworników wykonanych w technologii PCB HDI wykazują, że rezystancja przetworników o dwukrotnie większej liczbie zwojów przekracza nawet wartość $20\text{ k}\Omega$ [3].

Zakres częstotliwości pracy przetworników bezrdzeniowych wykonanych w tradycyjnej technologii jest znacznie większy od zakresu częstotliwości,

które uwzględnia się przy pomiarze sygnałów prądowych w energetyce [4, 5, 6]. Zakres ten zależy od wartości elementów elektrycznego układu zastępczego przetwornika – indukcyjności własnej L , pojemności międzyzwojowej C i rezystancji R . Ponieważ wartości elementów elektrycznego układu zastępczego przetwornika bezrdzeniowego ulegają dużej zmianie przy zastosowaniu technologii PCB HDI, zostały wykonane pomiary w celu sparowania wartości tych elementów oraz przeprowadzona analiza dotycząca tego, jak kształtują się charakterystyki częstotliwościowe dla zmierzonych wartości.

3. WARTOŚCI ELEMENTÓW UKŁADU ZASTĘPCZEGO PRZETWORNIKA BEZRDZENIOWEGO

Elektryczny układ zastępczy przetwornika bezrdzeniowego został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Elektryczny układ zastępczy przetwornika bezrdzeniowego [5]

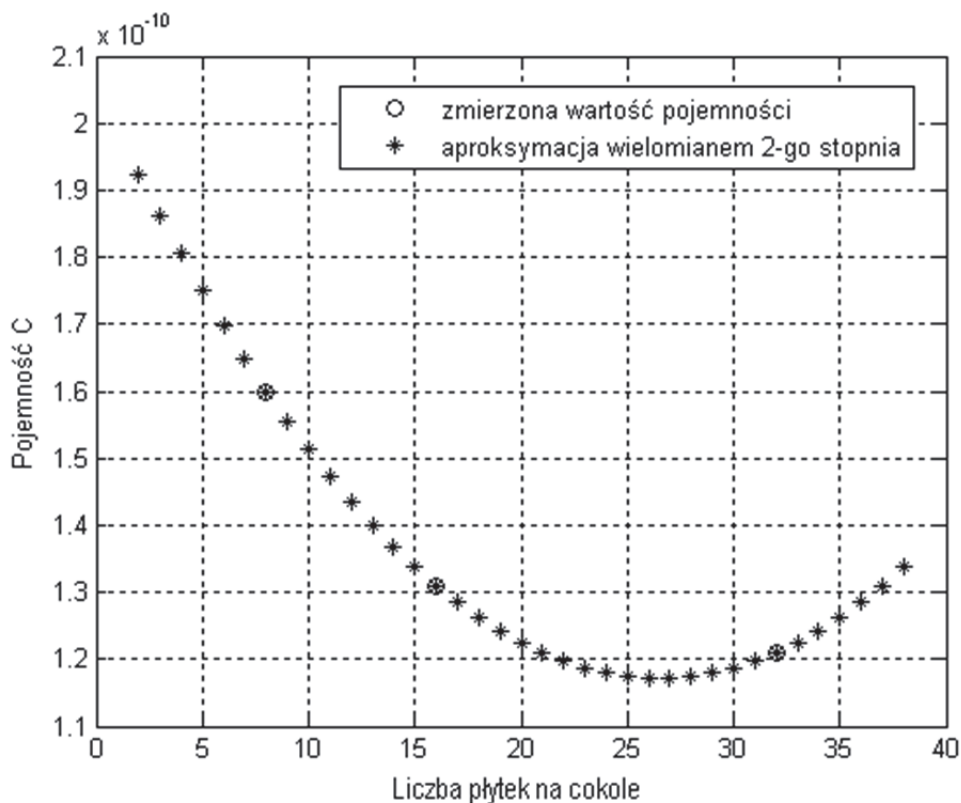
Napięcie na wyjściu przetwornika $u_o(t)$ jest proporcjonalne do pochodnej mierzonego prądu, reprezentowanej przez źródło $u_p(t)$, ale również jest kształtowane przez transmitancję układu zastępczego przetwornika. To właśnie charakterystykę częstotliwościową tej transmitancji dla $R_{obc} = \infty$ podaje się jako parametry częstotliwościowe przetwornika.

W przypadku przetworników wykonanych w tradycyjnej technologii PCB transmitancja układu zastępczego jest do pominięcia w zakresie częstotliwości do ok. 20 kHz [4, 5, 6]. W wypadku przetworników wykonanych w technologii PCB HDI tak nie

jest, gdyż zwiększeniu ulega zarówno wartość indukcyjności L , jak i – przede wszystkim – wartość rezystancji R .

W celu otrzymania przetwornika o jak największej czułości oprócz zwiększania ilości zwojów na pojedynczym listku dąży się do rozmieszczenia jak największej liczby listków na cokole przetwornika.

Badania przeprowadzone na Politechnice Wrocławskiej [7] wykazały, że wartość pojemności C przetwornika nie zmienia się w zasadniczy sposób wraz z liczbą listków (rys. 3).



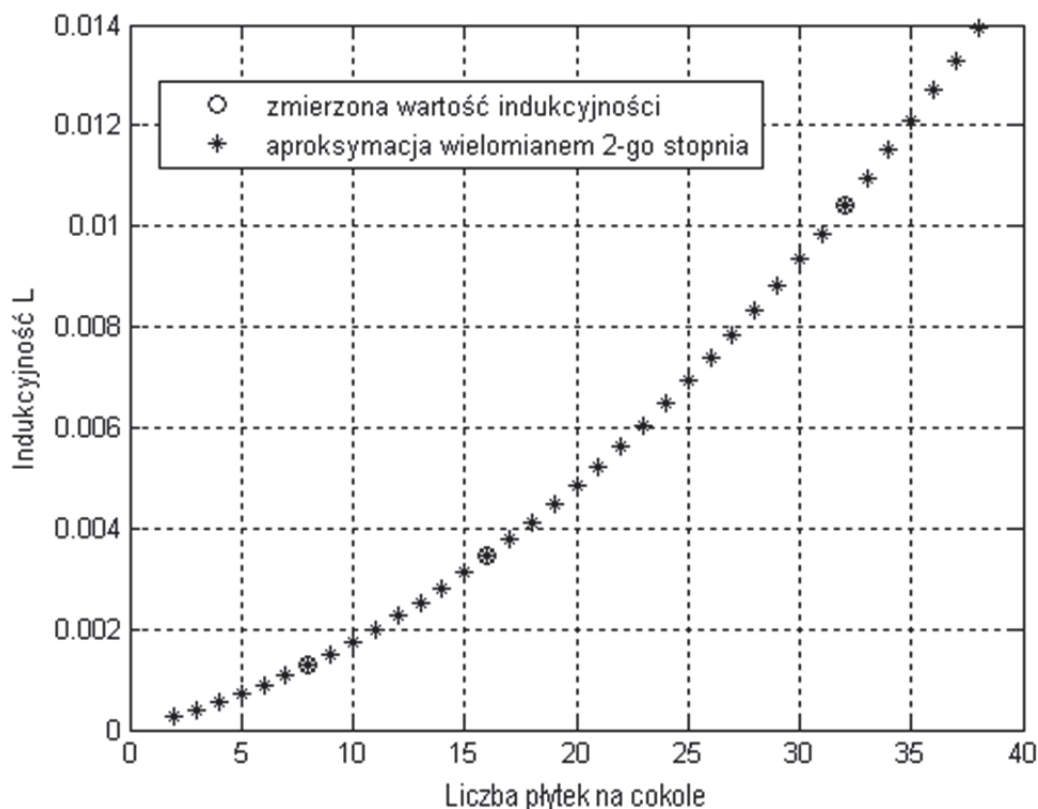
Rys. 3. Zależność indukcyjności własnej przetwornika bezrdzeniowego od liczby listków (płytek) [7]

Indukcyjność własna L rośnie w przybliżeniu z kwadratem liczby listków (rys. 4), a indukcyjność pojedynczego listka rośnie z kwadratem ilości spiralnych zwojów.

Jeśli przyjąć, że na cokole umieszczono 1,25 razy więcej listków wykonanych w technologii HDI niż listków wykonanych w tradycyjnej technologii PCB i dodatkowo każdy listek posiada 2 razy więcej zwojów, to indukcyjność własna przetwornika rośnie ok. 6,25 razy. Z kolei średnia zmierzona wartość rezystancji listka przedstawionego (rys. 4)

z danej partii produkcyjnej jest równa 638 Ω . Dla 40 listków daje to rezystancję równą ok. 25 k Ω . Zmierzona pojemność przetwornika jest równa 145 pF, natomiast jego czułość jest równa 2,5 mV/A.

W tabeli 1. zostały przedstawione wartości elementów układu zastępczego przetwornika wykonanego w tradycyjnej technologii PCB o 32 listkach oraz wartości elementów układu zastępczego przetwornika składającego się z 40 listków o takiej samej wielkości, lecz z dwukrotnie większą liczbą spiralnych zwojów.



Rys. 4. Zależność pojemności przetwornika bezrdzeniowego od ilości listków [7]

Tabela 1.

Wartości elementów układu zastępczego badanych przetworników [7]

| Typ przetwornika | R [Ω] | L [H] | C [pF] | S [mV/A] |
|--|-------|--------|--------|----------|
| Przetwornik wykonany w tradycyjnej technologii | 1167 | 0,0104 | 121 | 1,08 |
| Przetwornik wykonany w technologii PCB HDI | 25000 | 0,065 | 145 | 2,5 |

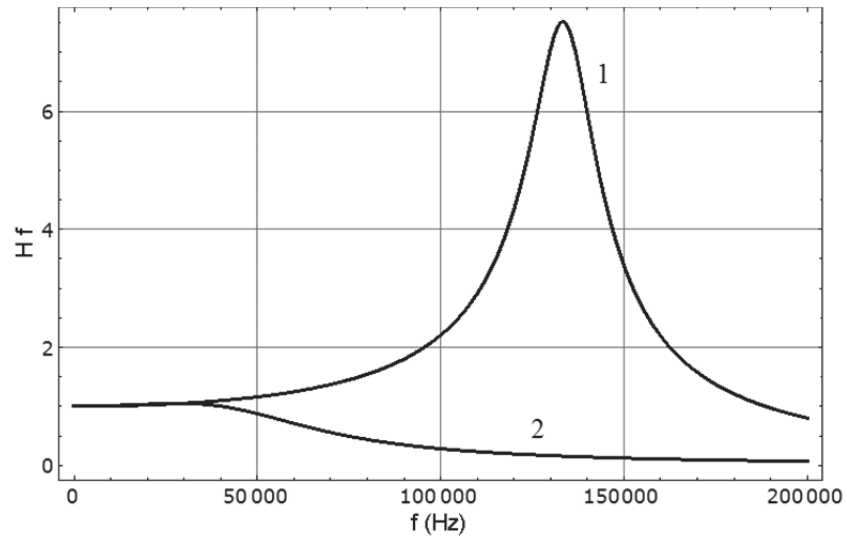
4. CHARAKTERYSTYKI CZĘSTOTLIWOŚCIOWE PRZETWORNIKÓW BEZRDZENIOWYCH WYKONANYCH W TRADYCYJNEJ TECHNOLOGII PCB ORAZ W TECHNOLOGII PCB HDI

Charakterystyki częstotliwościowe H(f) zostały wyznaczone dla przetworników o parametrach obwodu zastępczego podanych w tabeli 1. Wyrażają się one następującą zależnością:

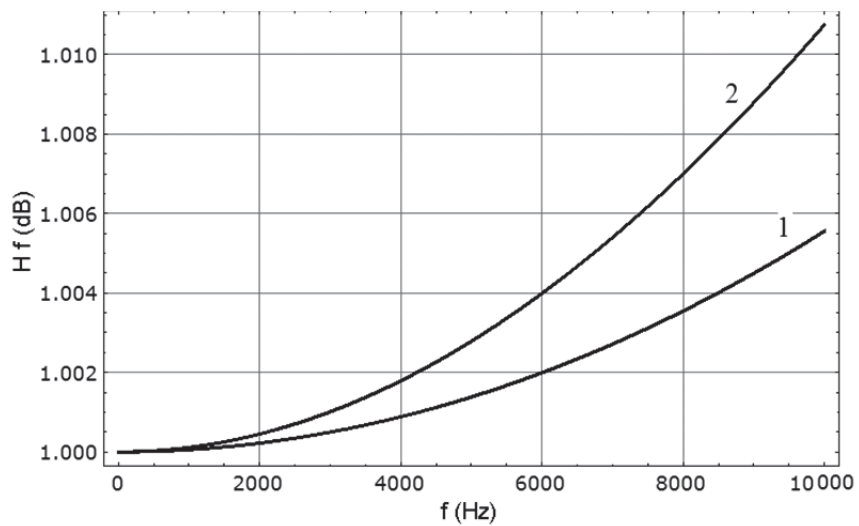
$$H(f) = \frac{1}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C - (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot L \cdot C} \tag{1}$$

Charakterystyki zostały przedstawione na rysunkach 5., 6., 7. i 8. Cyfrą „1” oznaczono charakterystyki przetwornika wykonanego w tradycyjnej

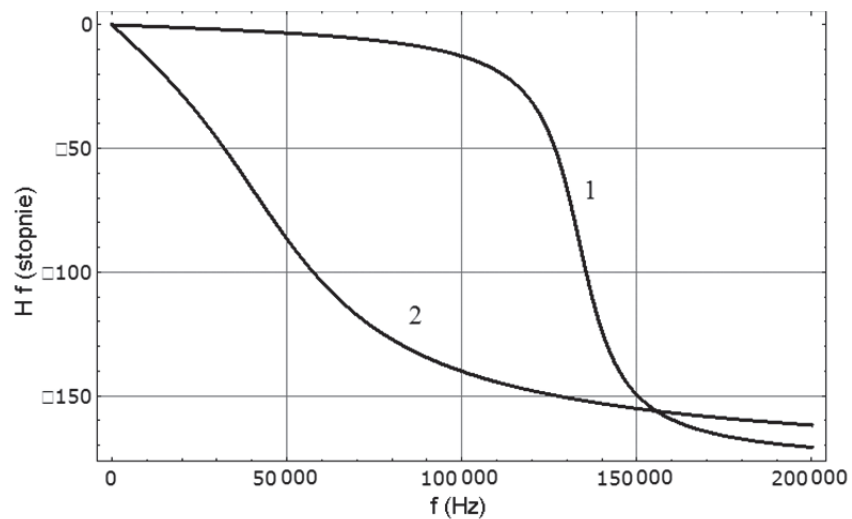
technologii PCB, natomiast cyfrą „2” – charakterystyki przetwornika wykonanego w technologii PCB HDI.



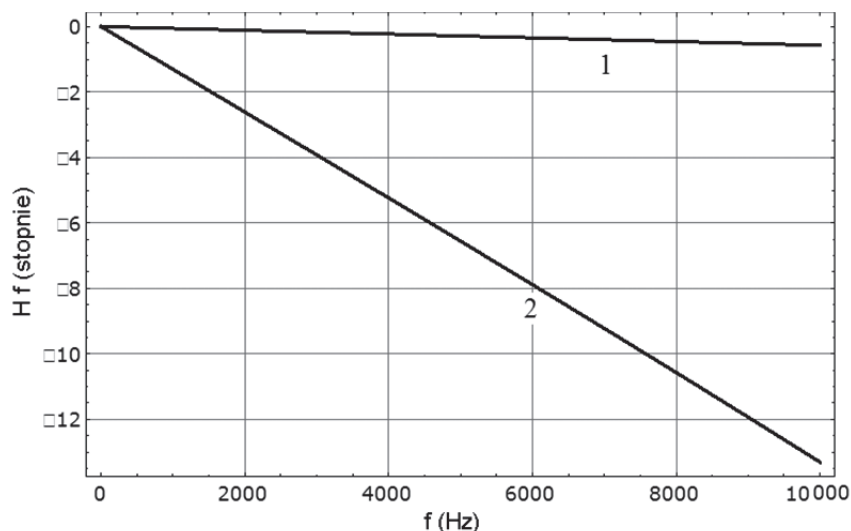
Rys. 5. Charakterystyki amplitudowe przetworników w zakresie częstotliwości obejmującym częstotliwości rezonansowe [7]



Rys. 6. Charakterystyki amplitudowe przetworników w zakresie częstotliwości do 10 kHz [7]



Rys. 7. Charakterystyki fazowe przetworników w zakresie częstotliwości obejmującym częstotliwości rezonansowe [7]



Rys. 8. Charakterystyki amplitudowe przetworników w zakresie częstotliwości do 10 kHz [7]

Charakterystyki częstotliwościowe przetworników bezrdzeniowych przedstawione na rysunkach od 6. do 8. pozwalają stwierdzić, że zakres częstotliwości pracy przetwornika wykonanego w technologii tradycyjnej jest znacznie wyższy niż przetwornika wykonanego w technologii PCB HDI, zwłaszcza jeśli chodzi o wierność odtworzenia fazy.

- Lisowiec A.: *Parametry cewek Rogowskiego jako czujników prądu w urządzeniach EAZ*. „Wiadomości Elektrotechniczne”, 2007, nr 2.
- Lisowiec A.: *Cewki Rogowskiego w urządzeniach EAZ z cyfrowym przetwarzaniem sygnałów*. „Elektronika”, 2006, nr 8.
- Miedziński B., Habrych M., Wiśniewski G., Dzierżanowski W., Fiałkowski Z.: *Raport serii SPRAWOZDANIA*, nr spr. I-8/S-24/2013, Instytut Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.

5. PODSUMOWANIE

Technologia PCB HDI umożliwia wytworzenie przetworników bezrdzeniowych o tych samych wymiarach i czułości dwa razy większej niż ma to miejsce w przypadku przetworników wykonanych w technologii tradycyjnej.

Przetworniki bezrdzeniowe powstałe w technologii PCB HDI charakteryzują się jednak dużą wartością rezystancji, nawet powyżej 20 k Ω . Ma to podwójnie ujemny skutek. Po pierwsze wymaga stosowania wzmacniaczy o dużej rezystancji wejściowej, najlepiej powyżej 1 M Ω . Po drugie zwiększona wartość rezystancji ogranicza pasmo częstotliwości, w których te przetworniki mogą być stosowane.

Literatura

- Lisowiec A., Nowakowski A.: *New constructions of current and voltage transducers for MV switchgear*. „Elektronika”, 2010, nr 7.
- Kowalski G.: *Projektowanie cewek Rogowskiego w technologii obwodów drukowanych*. „Elektronika”, 2011, nr 7.
- Klej T., Borowiecka K., Ramotowski E.: *Technologia HDI w obwodach drukowanych*. „Elektronika”, 2013, nr 4.
- Lisowiec A.: *Wpływ parametrów cewki Rogowskiego na wartości pomiarowe w stanach dynamicznych*. „Mechanizacja i Automatyka Górnictwa”, 2006, nr 8.