

## Projekt i synteza obwodu magnetycznego różnicowego przetwornika wiropądowego do badań nieniszczących

**Streszczenie.** W artykule omówiono zagadnienia dotyczące konstrukcji i optymalnego projektowania przetwornika wiropądowego do wykrywania wad powierzchniowych obiektów wykonanych z materiałów przewodzących. Zdefiniowano zadanie optymalizacji rozpatrywanego układu. Opracowano trójwymiarowy model połowy przetwornika pozwalający przeprowadzić badania symulacyjne rozważanej konstrukcji. Dokonano optymalizacji obwodu magnetycznego przyjmując za kryterium optymalizacyjne zwiększenie czułości układu i jego zdolności do wykrywania wad powierzchniowych. Korzystając z danych dotyczących symulacyjnie zoptymalizowanej konstrukcji obwodu magnetycznego, zbudowano prototyp przetwornika wiropądowego. Prototyp poddano testom sprawdzając poprawność działania układu. Badania przeprowadzono korzystając ze specjalnie przygotowanego obiektu testowego.

**Abstract.** This paper discusses issues concerning the construction and optimal design of an eddy current transducer for detecting surface defects in objects made of conductive materials. The optimisation task for the system under consideration is defined. A three-dimensional field model of the transducer was developed, allowing simulation studies of the considered design to be carried out. An optimisation of the magnetic circuit was carried out, taking as an optimisation criterion increasing the sensitivity of the system and its ability to detect surface defects. Using data on the simulation-optimised magnetic circuit design, a prototype eddy current transducer was built. The prototype was subjected to tests to verify the system's correct operation. Tests were carried out using a specially prepared test facility. (**Design and synthesis of the magnetic circuit of a differential eddy current transducer for non-destructive testing**).

**Słowa kluczowe:** badania nieniszczące, przetwornik wiropądowy, przetwornik indukcyjny różnicowy, prądy wirowe.

**Keywords:** non-destructive testing, eddy current transducer, differential inductive transducer, eddy currents

### Wstęp

Zjawisko powstawania prądów wirowych jest wykorzystywane w wielu dziedzinach nauki i techniki, m.in.: w miernictwie elektrycznym, w motoryzacji, przy budowie hamulców wiropądowych, metalurgii, a także ochronie środowiska (ekrany EMC) oraz badaniach diagnostycznych [1-6]. Szczególnie szeroko zjawisko to wykorzystuje się w elektrotermii, przy konstruowaniu pieców indukcyjnych [7], jak również przy budowie grzewczych urządzeń domowych [8]. Zjawisko powstawania prądów wirowych prowadzi także do efektów niepożądanych wówczas, gdy prądy wywołują straty energii w elementach konstrukcyjnych maszyn elektrycznych i transformatorów.

Istotną cechą zjawiska wywoływania prądów wirowych jest możliwość wykorzystania w badaniach materiałowych, a szczególnie w Badaniach Nieniszczących (BN) [9-11]. Pierwsze wzmianki o wykorzystywaniu prądów wirowych w tym obszarze pochodzą z lat trzydziestych XX wieku. Pierwszy możliwość zastosowania prądów wirowych w defektoskopii zauważył F. Förster [12-14]. Opracowana przez Förstera metoda jest do dziś powszechnie stosowana w BN. Należy zauważyć, że Metoda Prądów Wirowych (MPW) jest metodą wykorzystującą wspólne interakcje pomiędzy polami elektromagnetycznymi, a więc przy jej zastosowaniu nie dochodzi zazwyczaj do istotnych zmian w strukturze badanego obiektu czy materiału. MPW wykorzystuje się w strukturoscopii do sortowania wyrobów ze względu na ich właściwości elektryczne, a także w defektoskopii do wykrywania wad materiałowych. Badania w wyżej wymienionym zakresie przeprowadzone mogą być zarówno na etapie produkcji danego elementu jak i w czasie jego eksploatacji [15]. Kontrolę podlegać mogą również łączenia spawane elementów konstrukcyjnych. Metody MPW wykorzystuje się także do oceny wyrobów m.in. dla energetyki jądowej (np. ocena struktury rur wymienników ciepła), lotnictwa i astronautyki (poszycie statków powietrznych, elementy turbin) czy w hutnictwie. W porównaniu z innymi powszechnie stosowanymi technikami diagnostycznymi, metoda MPW jest relatywnie tania, szybka i bezpieczna [16]. Z uwagi na zjawisko

naskórkowości omawiana metoda pozwala na wykrywanie głównie wad powierzchniowych oraz podpowierzchniowych (defektoskopia). Stosując tę metodę możliwe jest wykrycie wad ukrytych m.in.: pod warstwą lakieru jak również w elementach wielowarstwowych [5,9]. Zalety tej metody, postanowili wykorzystać także Autorzy pracy, opracowując i wdrażając przetwornik wiropądowy (PW) dedykowany do wykrywania wad powierzchniowych. Należy zauważyć, że przetwornik wiropądowy jest głównym elementem układu defektoskopowego, a jego konstrukcja determinuje przydatność całego układu. Szerokie zastosowanie MPW w przetwornikach powoduje potrzebę dostosowania tej metody do różnych rodzajów wad. Obecnie systemy defektoskopii wiropądowej są poddawane ciągłym ulepszeniom, zmierzającym do zwiększenia ich skuteczności i poszerzenia zakresu stosowalności. Pozwala to dziś na badanie wyrobów, które ze względu na swoje właściwości, np. geometryczne nie mogły być wcześniej tą metodą testowane; a także na wykrywanie wad głębokich.

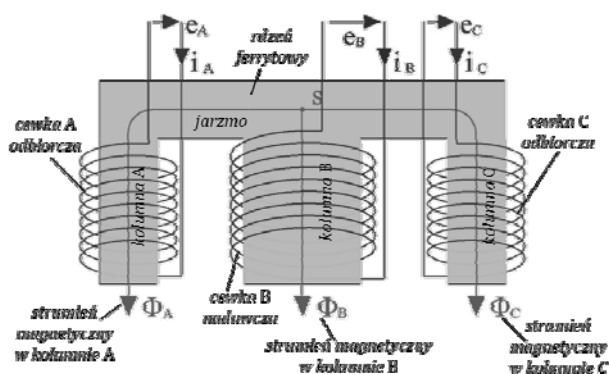
W niniejszej pracy Autorzy zrelacjonują wyniki badań związane z opracowaniem oraz optymalizacją konstrukcji przetwornika wiropądowego dedykowanego do wykrywania wad powierzchniowych, tj. rysy, wżery, pęknięcia czy otwory. W tym celu opracowali oni trójwymiarowy (3D) model połowy przetwornika, który posłużył do połowej analizy stanów pracy. Następnie, modyfikując obwód magnetyczny układu bazowego, dążyli do zwiększenia czułości systemu poprawiając tym samym efektywność wykrywania wad. W wyniku przeprowadzonej optymalizacji podjęto decyzję o budowie prototypu PW. Otrzymany prototyp poddano testom sprawdzającym skuteczność jego działania. Przeprowadzono inspekcję obiektu testowego.

### Koncepcja przetwornika wiropądowego

Na podstawie analizy porównawczej konstrukcji i zasady działania powszechnie stosowanych w defektoskopii wiropądowej przetworników podjęto decyzję o wyborze przetwornika indukcyjnego różnicowego (PIR). Przetwornik ten charakteryzuje się dużo większą czułością, tj.: współczynnikiem SNR (z ang. *Signal to Noise Ratio*) niż

popularne przetworniki bezwzględne [16]. Różnicowa konstrukcja przetworników wymaga jednak zastosowania w najprostszym układzie przynajmniej dwóch cewek, a gdy zastosuje się topologię transformatorową, trzech lub więcej.

W pracy Autorzy zdecydowali się na zastosowanie konstrukcji przetwornika opartej na topologii transformatora z rdzeniem ferrytowym typu E i układem złożonym z 3 cewek (rys. 1), z których dwie pracują w pomiarowym układzie różnicowym (cewka A i C), a trzecia (cewka B) jako cewka nadawcza, tj. generująca zmienny w czasie strumień magnetyczny, oznaczony symbolem  $\Phi_B$  (rys. 1). Dzięki zastosowaniu rdzenia wykonanego z ferrytu o dużej przenikalności magnetycznej projektowany przetwornik będzie charakteryzował się większą wartością wzmocnienia oraz lepszym ukierunkowaniem strumieni magnetycznych powstających w PIR. Duża wartość rezystywności materiału sprawi natomiast, że w rdzeniu praktycznie nie będą się indukowały prądy wirowe. Rdzeń posłuży także do stabilizacji pozycji cewek oraz umożliwi ich wzajemne sprzężenie magnetyczne o pożądanej wartości.



Rys. 1. Projektowany przetwornik indukcyjny różnicowy

Przyjęty układ o rozdzielonych funkcjach uzwojeń, pozwala projektantowi na dobór ich parametrów z większą swobodą. Takie podejście zapewnia większą swobodę konfiguracji i rozmieszczania cewek. Użycie trzech cewek umożliwi zastosowanie konfiguracji różnicowej, w której sygnał różnicowy uzyskiwany jest na drodze magnetycznej lub elektrycznej. W zaproponowanym rozwiązaniu jest to realizowane na drodze elektrycznej i polega na pomiarze różnicy przebiegów dwóch sił elektromotorycznych ( $sem$ )  $e_A$  i  $e_C$  indukowanych w cewkach pomiarowych. Niniejszy efekt otrzymuje się łącząc cewki kolumn skrajnych w sposób przeciwsobny (rys. 2) uzyskując tym samym różnicę  $sem$  wyindukowanych w cewkach kolumn skrajnych, nazywaną indukowanym napięciem różnicowym  $e_{diff}$ :

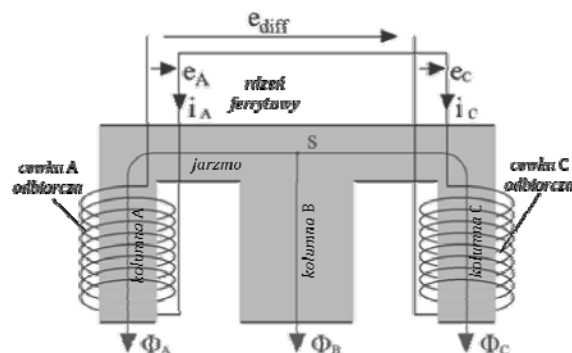
$$(1) \quad e_{diff} = e_A(t) - e_C(t) = - \left( z_A \frac{\partial \Phi_A(t)}{\partial t} - z_C \frac{\partial \Phi_C(t)}{\partial t} \right),$$

gdzie:  $z_A$  i  $z_C$  to liczba zwojów odpowiednio uzwojenia A i C, podczas gdy  $\Phi_A$  oraz  $\Phi_C$  reprezentują przebiegi strumieni magnetycznych w kolumnach skrajnych PIR.

### Założenia projektowe PIR

W projekcie Autorzy zdecydowali się na rdzeń z gotowych kształtek ferrytowych dostępnych na rynku. Ferryty wytwarzane są poprzez spiekanie materiałów, w różnych proporcjach. Najczęściej są to ferryty manganowo - cynkowe lub niklowo - cynkowe, które poza wymienionymi tu pierwiastkami zawierają w swoim składzie tlenki żelaza. W porównaniu do blach elektrotechnicznych, cechują się znacznie wyższą wartością rezystywności, jednak niższą wartością indukcji nasycenia  $B_s < 0.5$  T. W przypadku projektowanego przetwornika, który docelowo

będzie wykrywać wady powierzchniowe w materiałach przewodzących, tj. płyty i elementy konstrukcyjne wykonane z aluminium, wartość indukcji  $B_s \approx 0,5$  T nie powinna zostać przekroczona.



Rys. 2. Sposób konfiguracji – połączenia cewek pomiarowych w projektowanym przetworniku PIR

Finalnie, do budowy przetwornika wybrano gotowy rdzeń o wymiarach ograniczonych z jednej strony przez możliwości wykonania miniaturowego przetwornika, z drugiej strony z uwagi na jego rozdzielczość przestrzenną będącą pochodną wymiarów przetwornika. W pracy zrezygnowano z stosowania rdzeni, w których występuje dodatkowa szczelina powietrzna w obszarze kolumny środkowej. Rdzeń z szczeliną dodatkową pogarsza w tym przypadku czułość pomiaru [17].

W badaniach przyjęto następujące założenia doboru rdzenia:

- dobór materiału rdzenia zgodnie z [18], tj. zdecydowano się na wybór jednego z rdzeni wykonanych z materiału: N87 lub T46, oraz
- ograniczenia wymiarowe:
  - maksymalna szerokość rdzenia: 30 mm;
  - najmniejsza szerokość kolumny rdzenia: 2 mm.

Na podstawie wyżej wymienionych założeń zdecydowano się na wybór rdzenia typu EF 25 [19], tj. rdzenia o szerokości  $S = 25$  mm, wysokości  $H = 12,8$  mm, głębokości  $G = 7,5$  mm, wysokości kolumn  $K = 8,7$  mm oraz odległość pomiędzy kolumnami skrajnymi  $O = 17,5$  mm. O rodzaju użytego materiału (N87 lub T46), z którego będzie wykonany rdzeń, zdecydowano jednak podczas procesu optymalizacji obiektu. Finalnie, w wyniku przeprowadzonych obliczeń projektowych lepszym okazał się materiał N87. Dlatego, w dalszej części pracy ograniczono się do prezentacji wyników otrzymanych właśnie dla tego materiału.

Wymiary zewnętrzne cewek określono w procesie optymalizacji. Rozważone zostanie zastosowanie karkasów umożliwiających łatwiejsze wykonanie oraz pozycjonowanie uzwojeń. Wymiary drutu nawojowego będą uzależnione od powierzchni przekroju cewek oraz liczby zwojów. Z uwagi na możliwości technologiczne, średnica drutu nie powinna być zbyt mała, co zadecyduje o maksymalnej możliwej liczbie zwojów. Liczba ta zostanie określona po realizacji optymalizacji, ponieważ proces ten nie ma bezpośredniego wpływu na wartości parametrów połowych samego przetwornika. W odniesieniu do cewek przyjęto następujące założenia projektowe:

- minimalny wymiar wewnętrzny ograniczony jest wymiarami rdzenia;
- maksymalny wymiar zewnętrzny ograniczony przestrzenią między kolumnami rdzenia i wysokością rdzenia;
- minimalna średnica drutu nawojowego: 0,1 mm.

Przyjęto również, że cewka nadawcza będzie zasilana ze źródła prądowego, tj. źródła prądu sinusoidalnie zmiennego o stałej wartości amplitudy i wartości maksymalnej 20 mA. Dzięki takiemu wymuszeniu, generowany strumień magnetyczny będzie ulegać zmianie tylko wówczas, gdy

indukcyjność wypadkowa układu ulegnie zmianie [20], co jest równoznaczne ze zmianą samej konstrukcji obwodu magnetycznego obiektu. Ponadto, generowany strumień  $\Phi_B$  powinien być na tyle duży by powstające szумы nie wpływały bezpośrednio na sygnał pomiarowy. Z drugiej strony sygnał zasilający powinien posiadać na tyle małą wartość amplitudy, by nie generować zniekształceń wynikających z nieliniowej charakterystyki materiału rdzenia.

Przyjęto, że maksymalna częstotliwość, z jaką będzie pracował układ to 10 kHz, i dla tej częstotliwości wykonano przede wszystkim obliczenia projektowe. Dla tak przyjętej wartości częstotliwości projektowany przetwornik powinien wykrywać wady powierzchniowe o głębokości do 1 mm łącznie z niewielkimi rysami powstałymi na badanych elementach - co było jednym z założeń Autorów pracy.

### Optymalizacja konstrukcji przetwornika PIR

Głównym celem procesu optymalizacji przetwornika PIR było poszukiwanie rozwiązania o większej czułości. Czułość to istotny parametr decydujący o skuteczności wykrywania wad. Czułość (SNR) definiuje się jako stosunek „sygnału” do „szumu”, gdzie jako wartość „sygnału” przyjmuje się maksymalną wartość amplitudy sygnału pomiarowego ( $S_{faul}$ ) czujnika w sytuacji wykrycia wady, podczas gdy „szumem” przyjęto się zwykle nazywać wartość amplitudy sygnału ( $S_{faul\_free}$ ) mierzonego przez czujnik w przypadku badania elementu pozbawionego wad:

$$(2) \quad SNR = \frac{S_{faul}}{S_{faul\_free}},$$

Optymalizując konstrukcję przetwornika Autorzy dążyli do uzyskania jak największej wartości właśnie tego parametru.

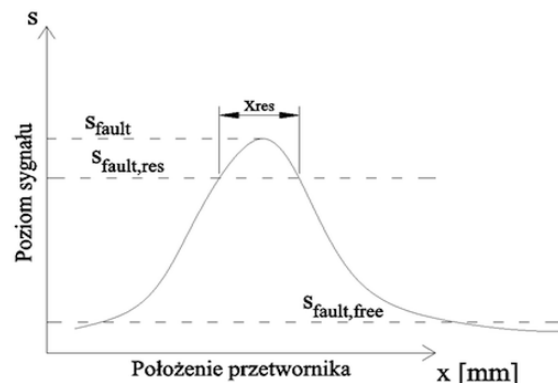
Drugim z parametrów decydujących o przydatności danego czujnika jest jego rozdzielczość. Rozdzielczość czujnika decyduje przede wszystkim o możliwości wykrycia wady i jej lokalizacji, jak również o rozróżnieniu pojedynczej wady od kilku wad występujących blisko siebie. Definiując rozdzielczość, można posłużyć się pewną odległością, przy której wartość sygnału  $S$  jest większa niż pewna przyjęta wartość graniczna. W celu określenia rozdzielczości należy określić zależność sygnału  $S$  będącego odpowiedzią czujnika, podczas testów elementu posiadającego wadę, w funkcji położenia samego czujnika (rys. 3). Tak zdefiniowana zależność będzie posiadała swoje maksimum ( $S_{faul}$ ) w miejscu wykrycia wady. Przyjmując następnie, jako wartość graniczną, pewną wartość sygnału maksymalnego ( $S_{faul\_res}$ ), otrzymuje się przedział definiowany jako rozdzielczość  $x_{res}$  określoną w wybranej jednostce długości. Im większa wartość  $x_{res}$  tym lepsza rozdzielczość czujnika. Dlatego drugim składnikiem determinującym funkcję celu, o niższej jednak randze w procesie optymalizacyjnym, jest składnik opisujący rozdzielczości urządzenia.

W pracy proces optymalizacji został przeprowadzony z wykorzystaniem 3D modelu połowego układu z czujnikiem PIR. Model został opracowany w środowisku obliczeniowym ANSYS Maxwell [21]. Ze względu na symetrię obwodu magnetycznego czujnika zdecydowano się na analizę tylko 1/2 jego modelu (rys. 4). Pozwoliło to ograniczyć wielkość analizowanej przestrzeni oraz liczbę elementów metody bez wpływu na wartość uzyskiwanych wyników. Przystępując do właściwej syntezy układu, w pierwszej kolejności zbadano wpływ poszczególnych wymiarów cewek na wartość czułości SNR. Tworząc model połowy układu uwzględniono możliwość modyfikacji następujących wymiarów uzwojeń, tj.:

- odległość uzwojeń od rdzenia (parametr **CCD**), tj. grubość karkasu,
- głębokość uzwojeń (parametr **CMT** dla cewki nadawczej i **CST** dla cewek pomiarowych),

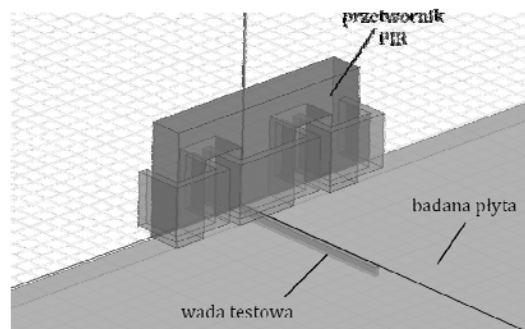
- wysokość uzwojeń (parametr **CMH** dla cewki nadawczej i **CSH** dla cewek pomiarowych),
- długość uzwojeń (parametr **CML** dla cewki nadawczej i **CSL** dla cewek pomiarowych)
- szerokość uzwojeń (parametr **CMW** dla cewki nadawczej i **CSW** dla cewek pomiarowych) oraz ich lokalizacji od dolnej krawędzi kolumn (parametr **CMD** dla cewki nadawczej oraz **CSD** dla cewek pomiarowych).

Wyżej wymienione wielkości dotyczące uzwojeń czujnika stanowiły zmienne decyzyjne stosowane przy optymalizacji.



Rys. 3. Graficzna interpretacja parametrów zastosowanych w procesie optymalizacyjnym

Następnie, dla konfiguracji wykazującej największą czułość zbadano wpływ parametrów materiałowych rdzenia. Największy wpływ ma tu przede wszystkim przenikalność magnetyczna rdzenia. W procesie optymalizacji uwzględniony został także wpływ przewodności elektrycznej rdzenia na wartość SNR. Do testów symulacyjnych, a tym samym optymalizacyjnych wykorzystana została przez Autorów wada zdefiniowana w postaci prostokątnego otworu zlokalizowanego w płycie aluminiowej o głębokości 1 mm. Powzięta wartość 1 mm wynikała m.in. z przyjętej wartości częstotliwości sygnału zasilającego czujnik.



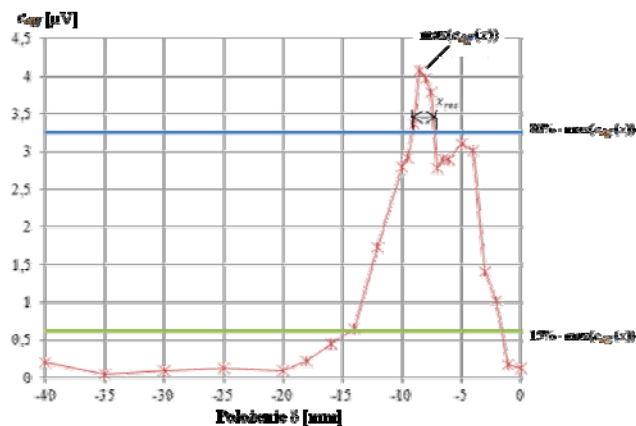
Rys. 4. Widok 1/2 modelu symulacyjnego układu testowego z przetwornikiem PIR opracowanego w programie Maxwell

Poszukując maksimum funkcji celu, zastosowano metodę systematycznego przeglądu umożliwiającą wyznaczenie wartości parametrów decyzyjnych. Wartością użytą do określania wartości parametrów SNR i rozdzielczości  $x_{res}$  była zależność opisująca indukowane napięcie różnicowe  $e_{diff}$  w funkcji położenia  $\delta$  przetwornika względem badanego obiektu. Przyjęto, następujące wartości zmiennych decyzyjnych dla obiektu startowego, tj.:

**CCD** = 0.8 mm, **CMT** = 1 mm, **CST** = 1 mm, **CML** = **CSL** = 9.1 mm, **CSD** = **CMD** = 1,8 mm, **CMH** = **CSH** = 6 mm, **CMW** = 9.1 mm, **CSW** = 5.4 mm.

Zależność przedstawiająca wartość amplitudy napięcia  $e_{diff}$  w funkcji położenia  $\delta$  dla obiektu startowego zilustrowano na rys. 5. Na tym etapie procesu optymalizacji konstrukcji

przetwornika wartość napięcia  $e_{diff}$  określano dla jednostkowej liczby zwojów poszczególnych cewek, a zatem  $e_{diff}$  wyrażano w  $\mu V/zwoj$ . Obliczenia wykonano dla wartości przepływu cewki nadawczej równej 1 A.



Rys. 5. Zależność indukowanego napięcia różnicowego w funkcji położenia  $\delta$  dla obiektu startowego.

Zaznaczone na rys. 5 wielkości wykorzystane w procesie optymalizacyjnym PIR zdefiniowano następująco:

- czułość SNR – definiowana przez zależność (2) składa się z dwóch czynników; pierwszym czynnikiem jest tu maksymalna wartość amplitudy sygnału (napięcia różnicowego) w sytuacji wykrycia wady obiektu, tj.:

$$(3) \quad S_{faul} = \max(e_{diff}(x)),$$

drugim czynnikiem jest wartość amplitudy indukowanego napięcia różnicowego w przypadku braku uszkodzenia obiektu pod czujnikiem, którą w niniejszej pracy określono jako wartość średnią sygnału, dla sygnałów mniejszych od 15% wartości maksymalnej, tj.:

$$(4) \quad S_{faul\_free} = \left( \sum_{x=0}^n e_{diff}(x) \right) \cdot n^{-1},$$

dla  $x \rightarrow e_{diff}(x) < 15\% \cdot \max(e_{diff}(x))$

- rozdzielczość  $x_{res}$  - wartość graniczna, którą w pracy określano dla wartości sygnału (napięcia) stanowiącej 80% wartości maksymalnej sygnału, tj.:

$$(5) \quad x_{res} = x_1 - x_2 \quad \text{przy czym} \quad x_1 > x_2,$$

gdzie parametr wartości granicznej jest określony jako:

$$(6) \quad S_{faul\_res} = e_{diff}(x_1) = e_{diff}(x_2) = 80\% \cdot \max(e_{diff}(x)),$$

Dla początkowych wartości zmiennych decyzyjnych PIR jego czułość SNR = 34,4 [ $\mu V/\mu V$ ], podczas, gdy rozdzielczość  $x_{res} = 1.51$  [mm]. W wyniku przeprowadzonej optymalizacji, uzyskano obiekt o współczynniku SNR = 47,4 [ $\mu V/\mu V$ ] i  $x_{res} = 1.82$  [mm]. Dla optymalnego przypadku uzyskano następujące wartości zmiennych decyzyjnych:

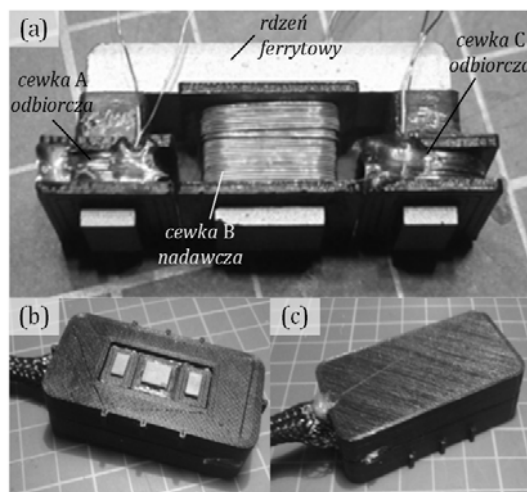
**CCD** = 0.4 mm, **CMT** = 1.5 mm, **CST** = 1.5 mm, **CML** = **CSL** = 11 mm, **CSD** = **CMD** = 1,7 mm, **CMH** = 6 mm, **CSH** = 2 mm, **CMW** = 11 mm, **CSW** = 7.4 mm.

Ostatnim elementem obliczeń projektowych był dobór liczby zwojów. W przypadku cewki nadawczej kierowano się wartością maksymalną amplitudy prądu zasilania mniejszą niż 20 mA, przy maksymalnej wartości napięcia źródła prądowego 1 V, dostępną przestrzenią na uzwojenie oraz wartością przepływu równą 1A. Dla ww. warunków uzyskano liczbę zwojów  $z_B = 60$  nawiniętych drutem o średnicy 0.25 mm. Liczbę zwojów cewek pomiarowych

obliczono przyjmując, jako ograniczenie minimalną średnicę drutu nawojowego ( $d = 0.12$  mm) i dostępną powierzchnię uzwojenia ( $S_{cu} = 1.2$  mm<sup>2</sup>). Dla tak postawionych warunków otrzymano liczbę zwojów cewek pomiarowych  $z_A = z_C = 100$ . Szczegółowy sposób obliczania liczby zwojów dla poszczególnych cewek układu przedstawiono w pracy [22].

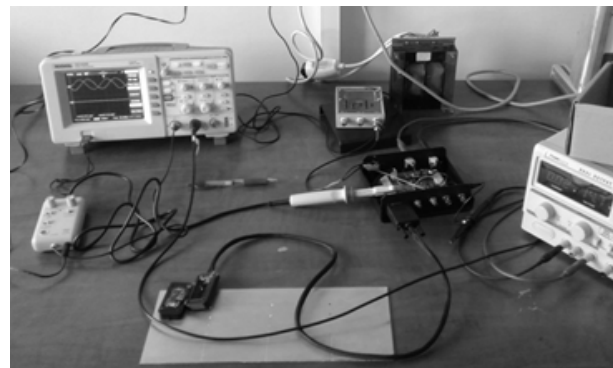
### Budowa prototyp i testy opracowanego przetwornika

Na podstawie wyników obliczeń projektowych, Autorzy zbudowali prototyp przetwornika PIR. Widok zbudowanego przetwornika pokazano na rysunku 6. W celu sprawdzenia poprawności jego pracy wykorzystano istniejące stanowisko laboratoryjne [20]. Do testów wybrano blachę aluminiową o grubości 1,5 mm, w której nawiercono otwory o różnych średnicach (1, 1,5 i 3 mm) i różnych głębokościach (ok. 0,5; 1 i 1,5 mm). Dodatkowo w obiekcie wykonano serię nacięć o różnej głębokości, tj. ~0,3, 0,5 i 0,8 mm. Widok stanowiska oraz obiektu badanego pokazano odpowiednio na rys. 7 i 8.



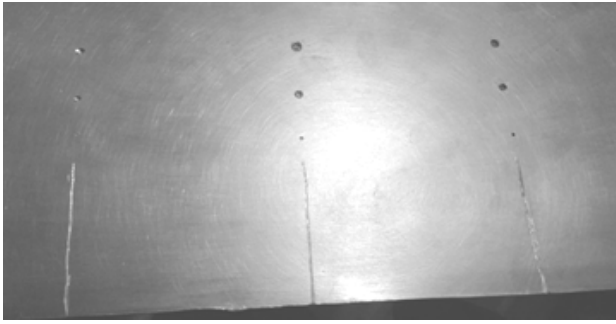
Rys. 6. Widok badanego przetwornika: (a) obwód magnetyczny, (b) i (c) obudowa wraz z czujnikiem.

Autorzy artykułu przeprowadzili wiele różnorodnych prób oraz testów opracowanego przetwornika. Na potrzeby niniejszej pracy ograniczyli się jednak do zaprezentowania tylko wybranych wyników pomiaru. Na rys. 9 przedstawiono wyniki testów uzyskane podczas badania obiektu w obrębie strefy z otworami o stałej średnicy równej 1.5 mm oraz różnej głębokości, podczas gdy na rys. 10 zilustrowano wyniki badań uzyskane dla obszaru, w którym znajdowały się rysy (rowki) o różnej głębokości. Na obu wspomnianych rysunkach umieszczono pionową linię, która wyznacza fazę początkową sygnału referencyjnego (kąąt  $\pi/2$ ) w odniesieniu do pozostałych sygnałów. W obu przypadkach testowych uszkodzenia mierzono tym samym obszarem przetwornika, tj. umieszczając przetwornik tak, aby wada występowała pomiędzy jego lewą a środkową kolumną.

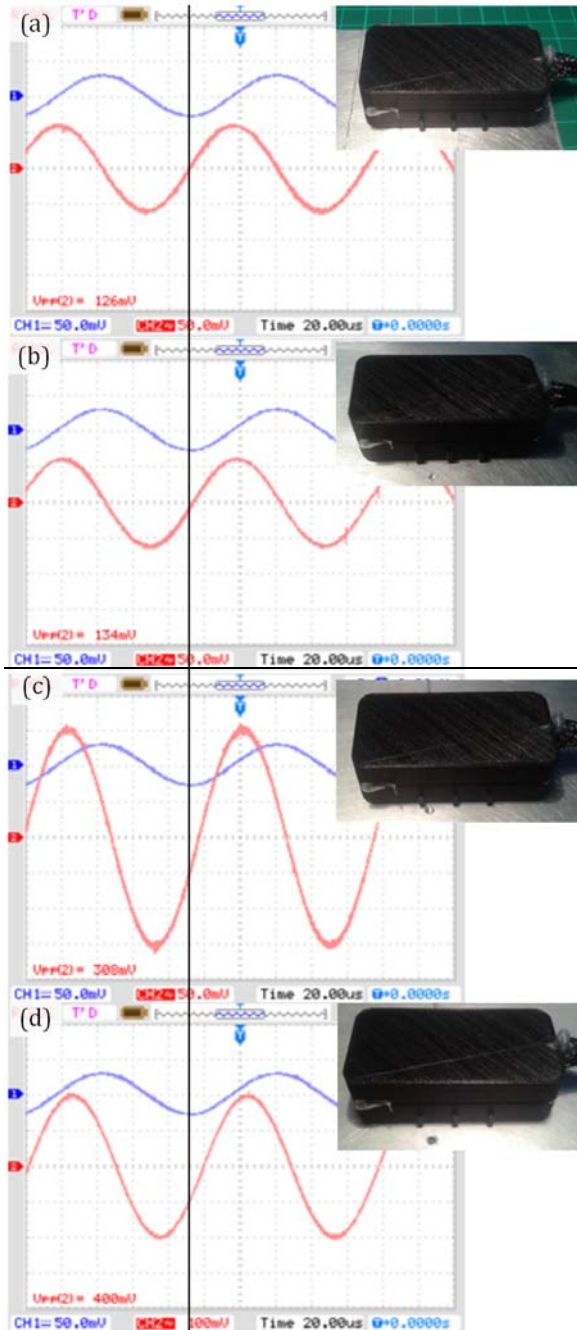


Rys. 7. Widok stanowiska testowego

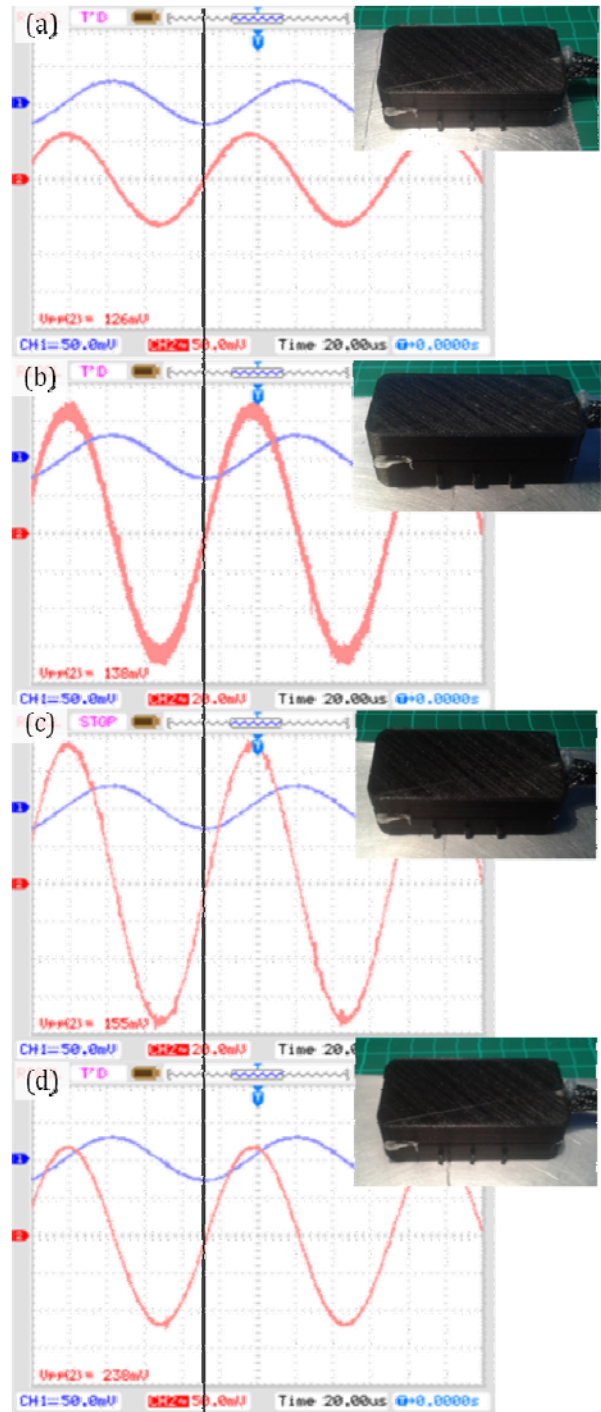




Rys. 8. Widok badanej płyty z wykonanymi uszkodzeniami w postaci nacięć oraz otworów



Rys. 9. Przebiegi napięcia referencyjnego (niebieski) oraz napięcia różnicowego (czerwony); badane uszkodzenie jest otwór o średnicy 1.5 mm i różnej głębokości; fotografie (po prawej) przedstawiają: a) miejsca położenia przetwornika w strefie bez uszkodzeń, b) otwór o głębokości  $\sim 0.5$  mm; c) otwór o głębokości  $\sim 1$  mm; d) otwór o głębokości  $\sim 1.5$  mm.



Rys. 10. Przebiegi napięcia referencyjnego (niebieski) oraz napięcia różnicowego (czerwony); badane stref z nacięciami; fotografie (po prawej) przedstawiają: a) miejsca położenia przetwornika w strefie bez uszkodzeń, b) nacięcie o głębokości  $\sim 0.3$  mm; c) nacięcie o głębokości  $\sim 0.5$  mm; d) nacięcie o głębokości  $\sim 0.8$  mm.

Dla obu rodzajów uszkodzeń zaobserwowano wzrost amplitudy sygnału wyjściowego. Uszkodzenia płytkie, tj. o małej głębokości wywoływały niewielkie, ale zauważalne zmiany wartości amplitudy sygnału napięcia różnicowego ponad wartość odniesienia. Dla uszkodzeń o większych głębokościach wartość amplitud sygnału pomiarowego była odpowiednio większa. Świadczy to o zadowalającej czułości przetwornika w odniesieniu do wartości głębokości badanego uszkodzenia. Zauważono, że pomiary wykonane dla obszaru testowego z otworami charakteryzowały się większymi wartościami amplitudy sygnału pomiarowego. Może to uzasadniać większą głębokością otworów

w odniesieniu do głębokości rys obszaru testowego z rowkami. Podczas testów zauważono także, że wady odwzorowane w postaci rowków nie wprowadzały zmian fazy sygnału. Zmiany fazy sygnału zaobserwowano w przypadku analizy obszarów z otworami. Zwrócono również uwagę, że wielkość uszkodzenia, w tym przypadku różna głębokość wady powodowała znaczące przesunięcie fazy sygnału pomiaru względem sygnału referencyjnego. Przyczyn niniejszego efektu, tj. przesunięcia fazy sygnału pomiarowego, należy upatrywać w sposobie indukowania się prądów wirowych w strefie z otworami i nacięciami. W przypadku otworów prądy wirowe opływające te otwory wywołując strumień przesunięty znacząco w fazie.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki prac nad opracowaniem optymalnego pod względem parametrów użytkowych, z uwzględnieniem możliwości wykonawczych wykonaniem i przetestowaniem prototypu różnicowego przetwornika wiropądowego. Przetwornik ten opracowano z myślą o wykrywaniu niewielkich powierzchniowych wad materiałów przewodzących. Szczegółowo mówiono konstrukcję projektowanego czujnika. Zdefiniowano zadanie optymalizacji jego konstrukcji, wskazano kryteria optymalizacji oraz zaimplementowano obliczenia w komercyjnym środowisku obliczeniowym. Na potrzeby procesu optymalizacji obwodu opracowano 3D model połowy, który posłużył do analizy ustalonych stanów pracy rozpatrywanego przetwornika. Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń zbudowano oraz przebadano prototyp. Wykazano przydatność opracowanej konstrukcji układu przy wykrywaniu wad powierzchniowych. Ponadto wykazano poprawność postawionego zadania projektowo-optymalizacyjnego. Uzyskane wyniki badań sugerują poprawność przyjętej metodyki badawczej.

**Autorzy:** mgr inż. Bogusław Gruszczyński, Politechnika Poznańska, e-mail: [boguslaw.gruszczyński@gmail.com](mailto:boguslaw.gruszczyński@gmail.com); dr hab. inż. Rafał M. Wojciechowski prof. PP, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [rafal.wojciechowski@put.poznan.pl](mailto:rafal.wojciechowski@put.poznan.pl).

## LITERATURA

- [1] Mehaddene H., Mohelleb H., Berkache A., Eddy currents non-destructive testing and evaluation of ferromagnetic medium, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), No. 2, 112 – 116.
- [2] Allen J., Eddy-current testing in practice, *OAK Ridge National Laboratory*, Report, 1959.
- [3] Nath S., Babu R., Varghese G., Ashin S, Varghes C., Eddy current braking in automobiles, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(2018), No. 4, 2936 – 40.
- [4] Di Barba P., Dughiero F., Sieni E., Field synthesis for the optimal treatment planning in magnetic fluid hyperthermia, *Archives of Electrical Engineering*, 61,(2012), No. 1,57-67.
- [5] Żurek Z., Chmiela B., Idziak P., Kowalski K., Wolnik P. Magneto-sprężystość w stalach krzemowych. Diagnostyka struktury i defektu – Eksperyment, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 1/2019 ss 97-104.
- [6] Żurek Z., Duka P.: RLC circuits for material testing and NDT, Institute of Electrical Drivers & Machines KOMEL, 012015, ISBN 9788393109080, BOOK Komel. <http://www.komel.kato.wice.pl/ksiazki.html>.
- [7] Du H., Li J., Qu Y., Mathematical modeling of eddy-current loss for a new induction heating device, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014 (2014), Article ID 923745.
- [8] Kan, C., Chu, G., Zhang, J., Ma, B., Analysis on eddy current field and temperature field of induction heating cooker, *Journal of Shenyang University of Technology*, 36 (2014), No. 6. 613-8.
- [9] Żurek Z., Dobmann G., Idziak P., Kowalski K., Structural Health Monitoring and NDT for Thin Steel sheets under LDC testing with flat asymmetric PCB Sensor, *International Symposium on Structural Health Monitoring and Nondestructive Testing (SHM-NDT 2018)* Saarbrücken 04-05.10.2018.
- [10] Żurek Z., Stokłosa Z., Chmiela B., Idziak P., Kowalski K., Czulość detekcji zmian struktury w stali, NDT SHM w transporcie, *Napędy i Sterowanie* 1(2019), 66-73.
- [11] Żurek Z., Idziak P., Kowalski K. Pieruń G., Miniaturowy defektoskop rezonansowy dla diagnostyki wstępnej w transporcie szynowym. Pomiary magnetyczne i magneto-indukcyjne, *Napędy i Sterowanie* 11 (2018), 111-123,
- [12] Blitz, J. Eddy current principles. in: *Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing. Non-Destructive Evaluation Series*, 3(1997). Springer, Dordrecht.
- [13] Förster F., Theoretische und experimentelle Ergebnisse des magnetischen Streuflusseverfahrens, *Materialprüfung*, 23 (1981), 371-378.
- [14] Förster F., New findings in die field of non-destructive magnetic leakage inspection. *NDT & E International*, 1986, 3-14.
- [15] Żurek Z., Magnetic contactless detection of stress distribution and assembly defects in constructional steel element. *NDT & E International* 38 (2005), No. 7, 589-595.
- [16] Lewińska-Romicka A., Defektoskopia wiropądowa: *Poradnik*, Warszawa: *Biuro Gamma*, 1997.
- [17] Sabbagh H., A model of eddy-current probes with ferrite cores, *IEEE Transactions on Magnetics*, 23 (1987), no. 3, 1888 – 1904.
- [18] EPCOS AG, „Ferrite Materials - Ferrites and Accessories, On-line <https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/529404/products/product-catalog/ferrites-and-accessories/epcos-ferrites-and-accessories/ferrite-materials> (access 20.07.2022).
- [19] EPCOS AG, Ferrites and accessories - E 25/13/7 (EF 25), 2017. On-line: [https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/e\\_25\\_13\\_7.pdf](https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/e_25_13_7.pdf), (access 20.07.2022).
- [20] Gruszczyński B., Projekt stanowiska do wiropądowego wykrywania nieciągłości powierzchniowej i wad elementów konstrukcyjnych, *Praca dyplomowa, Politechnika Poznańska*, Poznań, 2018.
- [21] ANSYS, Inc., „Maxwell Help,” Southpointe, 2019.
- [22] Gruszczyński B., Optymalizacja obwodu magnetycznego różnicowego przetwornika wiropądowego do badań nieniszczących, *Praca Magisterska, Politechnika Poznańska*, Poznań, 2019.