

JERZY KWAŚNIEWSKI, HUBERT RUTA*

ZASTOSOWANIE ŚRODOWISKA ANSYS W PROJEKTOWANIU GŁOWICY POMIAROWEJ DO DIAGNOSTYKI ŻERDZI WIERTNICZYCH

APPLICATION OF ANSYS IN DESIGNING MEASURING HEAD FOR DIAGNOSIS DRILLING TUBES

Streszczenie

W artykule przedstawiono proces projektowania głowicy magnetycznej (do badania żerdzi wiertniczych) z wykorzystaniem metody elementów skończonych w oprogramowaniu ANSYS. Scharakteryzowano założenia projektowe, budowę i zasadę działania urządzenia. Przedstawiono wykonane analizy wpływu parametrów konstrukcyjnych głowicy na jej parametry metrologiczne. Zaprezentowano rozkłady pól magnetycznych potwierdzające słuszność przyjętych założeń projektowych oraz sposób rzeczywistej weryfikacji wyników.

Słowa kluczowe: NDT, MES, żerdzie wiertnicze, głowica magnetyczna

Abstract

The paper presents the design of magnetic head (to test the drilling tubes) using the finite element method in ANSYS software. Characterized conceptual design, construction and operation of the device. Presented analysis of the impact of design parameters on the objective function of optimization magnetic head (metrological parameter). The article presents the distributions of magnetic fields, and proposes a method to verify the results.

Keywords: NDT – non-destructive testing, FEM – finite element method, drilling tube, magnetic head

* Dr hab. inż. Jerzy Kwaśniewski, prof. PK, mgr inż. Hubert Ruta, asystent AGH, Katedra Transportu Liniowego, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

Oznaczenia

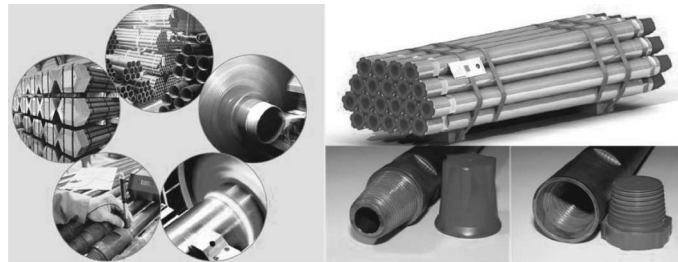
D, g, l	– średnica, grubość ścianki, długość żerdzi (rury płuczkowej) [mm]
wys_mag, sz_mag	– wysokość i szerokość magnesu o przekroju kwadratowym [mm]
$szcz$	– szczelina powietrzna pomiędzy nabiegunnikami a badaną rurą [mm]
SEM, ε	– siła elektromotoryczna indukcji [mV]
Φ_R	– składowa radialna (promieniowa) strumienia rozproszenia [Wb]
t	– czas [s]

1. Wstęp

Systemy diagnostyczne odgrywają niezwykle istotną rolę w procesie bezpiecznej i efektywnej eksploatacji różnego rodzaju maszyn i urządzeń oraz ich części. Ważne jest by diagnozowanie obiektu technicznego bądź jego elementów odbywało się w sposób niszczący przy jak najmniejszym czasie przestoju (wyłączenia) obiektu, szczególnie jeśli chodzi o obiekty przemysłowe.

Jedną z grup tego typu obiektów technicznych są urządzenia wiertnicze. Podstawowym elementem przewodu wiertniczego, umożliwiającym wykonywanie wierceń, są *żerdzie wiertnicze*, zwane również *rurami płuczkowymi*. W otworze wiertniczym w połączeniu z pozostałymi elementami przewodu żerdzie spełniają wiele istotnych zadań m.in. [1]:

- przenoszenie momentu obrotowego od urządzenia wiertniczego do narzędzia,
- wywieranie nacisku osiowego na narzędzie wierzące,
- doprowadzanie płynu wiertniczego do otworu – wynoszenie zwiercin,
- sterowanie osią wierzonego otworu według określonych założeń projektowych,
- wykonywanie prac związanych z funkcjami technologicznymi.



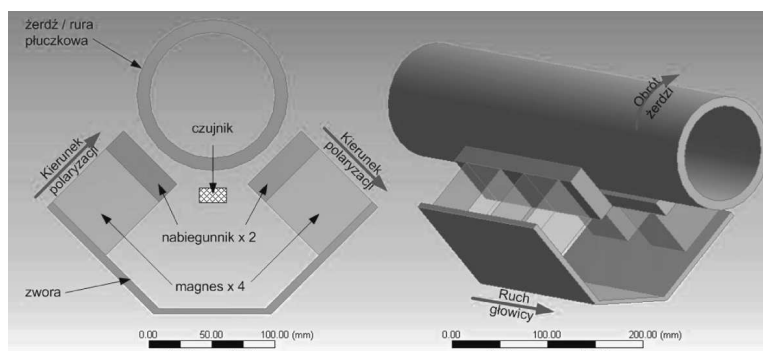
Rys. 1. Fizyczne wykonania żerdzi wiertniczych (rur płuczkowych) dostępnych w handlu [2]

Fig. 1. Drilling tubes of commercially available

Przykładowe parametry żerdzi wiertniczych dostępnych na rynku (rys. 1) [2]: średnica zewnętrzna $D = 70\text{--}140$ mm, grubość ścianki $g = 4,0\text{--}8,8$ mm, długość $l = 1500\text{--}6000$ mm, rodzaj stali N80/42CrMo4. Żerdzie te pracują w otworze w trudnych warunkach, generują na swojej powierzchni ogromne obciążenia podłużne, poprzeczne i skręcające, narażone są również na ścierne działanie skał oraz korozyjne działanie płynu wiertniczego [1]. Takie warunki pracy narażają te struktury mechaniczne na różnego rodzaju uszkodzenia powierzchni zarówno o charakterze wzdłużnym, jak i poprzecznym.

2. Koncepcja głowicy

W Katedrze Transportu Linowego Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie opracowano koncepcję urządzenia diagnostycznego, umożliwiającego przeprowadzanie badań nieniszczących żerdzi wiertniczych. Obwód magnetyczny głowicy składa się z wygiętej po obu stronach stalowej płyty stanowiącej zworę magnetyczną, na której symetrycznie osadzono cztery magnesy trwałe (NdFeB) odpowiednio spolaryzowane, oraz z dwóch nabiegunników (rys. 2). Każdy z nabiegunników zawiera po dwa magnesy spolaryzowane w jednym kierunku. W centralnym miejscu głowicy znajduje się czujnik, w którego skład wchodzi dziesięć pojedynczych cewek z rdzeniem ferromagnetycznym połączonych szeregowo. Tak zbudowany obwód magnetyczny przy zapewnieniu odpowiednio wysokiej energii magnetycznej, umożliwi miejscowe namagnesowanie badanego struktury do poziomu powyżej $B = 1,4$ [T] – wpływa to na wykrywalność wad.



Rys. 2. Model 3D analizowanej głowicy wraz z fragmentem badanej żerdzi wiertniczej
Fig. 2. 3D model of analyzed head with a drill tube (drill pipe) – the components and relationships

3. Zasada działania urządzenia

Urządzenie to działa na zasadzie miejscowego magnesowania badanej struktury ferromagnetycznej stałym polem magnetycznym oraz detekcji tego pola. W miejscu występowania uszkodzenia powstaje tzw. pole rozproszenia. Linie sił pola magnetycznego ulegają odchyleniu, „omijając” szczeliny powietrzne (miejsca ubytku przekroju metalicznego, np.: pęknięcia, starcia itp.). Fakt ten wpływa na kierunek wektora strumienia rozproszenia nad miejscem uszkodzenia oraz na wartość jego składowej radialnej. Zmiana wartości tego parametru w czasie wykrywana jest przez czujnik indukcyjny, a następnie przetwarzana na wielkość elektryczną (siłę elektromotoryczną indukcji **SEM**) i rejestrowana przez rejestrator bądź komputer z kartą do akwizycji danych.

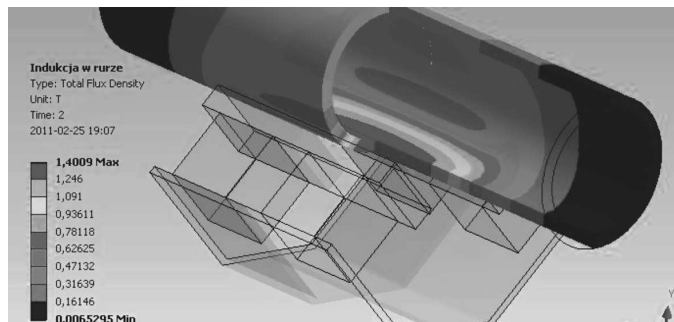
$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_R}{dt} \quad (1)$$

Celem przebadania całej powierzchni żerdzi oraz wyindukowania w czujniku siły elektromotorycznej indukcji **SEM** (ε), będącej wynikiem szybkości zmian strumienia mag-

netycznego w czasie (składowej promieniowej strumienia rozproszenia) – zgodnie z prawem Faradaya (1), zapewniono wzajemny ruch głowicy i rury (rys. 2). Badana rura obracana jest wokół osi za pomocą silnika prądu stałego. Równocześnie przesuwamy głowicę wzdłuż badanej rury. Otrzymany w ten sposób śrubowy cykl pomiarowy daje możliwość wykrycia wad zarówno poprzecznych, jak i wzdłużnych. Wartość SEM zależy proporcjonalnie od ubytku przekroju metalicznego oraz od prędkości przesuwu (obrotu) badanej rury względem głowicy. Aby uniezależnić wpływ prędkości przesuwu na wyniki pomiaru, można zastosować układ kompensujący.

4. Wykorzystanie środowiska ANSYS

W procesie projektowania głowicy pomiarowej posłużono się środowiskiem ANSYS, wykorzystując jego możliwości dotyczące symulacji rozkładów pól magnetycznych (rys. 3, rys. 4). Symulacje numeryczne z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych i analizy z udziałem modułu DesignXplorer, umożliwiły optymalny dobór parametrów konstrukcyjnych głowicy [3]. Podstawową funkcją celu tych działań optymalizacyjnych było uzyskanie odpowiednich parametrów metrologicznych głowicy m.in. indukcji magnetycznej w badanej strukturze w miejscu nad czujnikiem o wartości min ok. 1,4 [T].



Rys. 3. Analiza rozkładu pola magnetycznego (indukcji magnetycznej B[T]) w badanej strukturze. Koncentracja pola magnetycznego w miejscu badania (w pobliżu czujnika)

Fig. 3. Analysis of the distribution of magnetic field (magnetic induction B [T]) in the testing structure. The concentration of the magnetic field at the drill tube (near detector)

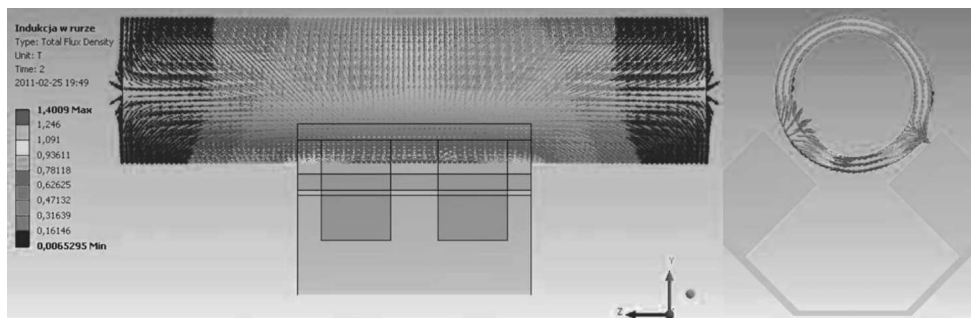
Na potrzeby analizowanego modelu przyjęto następujące przedziały wartości parametrów:

- średnica rury – $D = 100\text{--}135$ mm,
- grubość rury – $g = 5\text{--}10$ mm,
- wysokość magnesu – $wys_mag = 30\text{--}60$ mm,
- szerokość magnesu – $sz_mag = 30\text{--}60$ mm,
- szczelina powietrzna pomiędzy nabiegunkiem, a rurą – $szcz = 5\text{--}10$ mm.

Programowo każdemu z tych wymiarów został przypisany prefiks *DS* charakteryzujący dany wymiar jako parametr zmienny w podanym zakresie, np. średnica rury określana jest

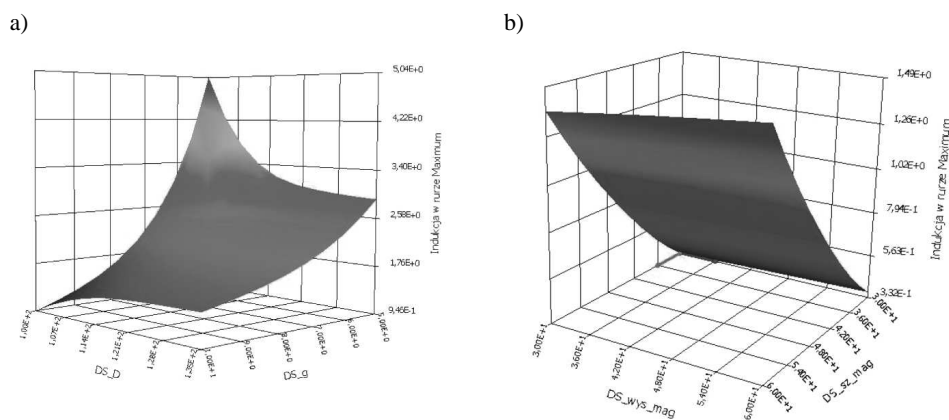
DS_D. Przeanalizowano kilkaset kombinacji ww. parametrów pod kątem zdefiniowanej funkcji celu. Wyniki analiz zaprezentowano na poniższych wykresach (rys. 5 – rys. 9).

Analizując wpływ parametrów konstrukcyjnych badanego obiektu (D , g [mm]) na funkcję celu (B [T]) (rys. 5), przyjęto następujące parametry głowicy magnetycznej: $wys_mag = 60$ mm, $sz_mag = 60$ mm, $szcz = 10$ mm. Uzasadnieniem dla tak dobranych wartości jest zapewnienie odpowiednio wysokiej energii magnetycznej w obwodzie (parametry magnesu) oraz najmniej korzystna z możliwych sytuacja związana z maksymalną szczeliną powietrzną pomiędzy głowicą (nabiegunnikami) a badaną rurą.



Rys. 4. Analiza rozkładu pola magnetycznego (indukcji magnetycznej B [T]) w badanej strukturze

Fig. 4. Analysis of the distribution of magnetic field (magnetic induction) in the testing structure

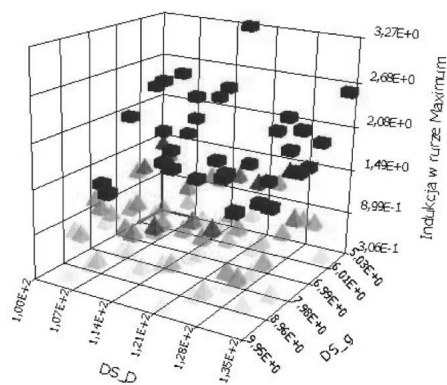


Rys. 5. a) Wpływ średnicy rury oraz jej grubości na wartość indukcji w żerdzi tuż nad czujnikiem indukcyjnym, b) Wpływ wysokości i szerokości magnesów na wartość indukcji w żerdzi

Fig. 5. a) Effect of tube diameter and its thickness on the value of induction in the tube just above the inductive sensor, b) Effect of the height and width of the magnets on the value of induction

Na wykresie 3D (rys. 5a) widzimy, iż przy tak przyjętych parametrach głowicy dla wielu możliwych typoszeregów badanych żerdzi w zakresie analizowanych ich parametrów

$D = 100\text{--}135$ mm, $g = 5\text{--}10$ mm, funkcja celu $B \geq 1,4$ [T] [4] została spełniona. Rysunek 5b przedstawia możliwości kształtowania poziomu energii magnetycznej w obwodzie za pomocą parametrów związanych z magnesami, tak by była spełniona założona ww. funkcja celu. Analizy tej dokonano dla danej żerdzi o parametrach $D = 135$ mm i $g = 10$ mm. Rysunek 6 prezentuje 100 różnych kombinacji wszystkich parametrów optymalizacji tj.: D , g , wys_mag , sz_mag , $szcz$, pod kątem realizacji funkcji celu $B \geq 1,4$ [T]. Parametrami przewodnimi są parametry związane z konstrukcją rury tj.: D , g . Analizy tej dokonano z nałożeniem pewnych priorytetów na zakresy analizowanych parametrów. Na parametry magnesów wys_mag , sz_mag nałożono priorytet minimum, tak by zminimalizować masę urządzenia przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiednio dużej energii magnetycznej, co jest związane z funkcją celu.



Rys. 6. Wielokryterialna optymalizacja – wybrane warianty parametrów spełniające funkcję celu
Fig. 6. Multicriteria optimization – variants of parameters realizing the objective function

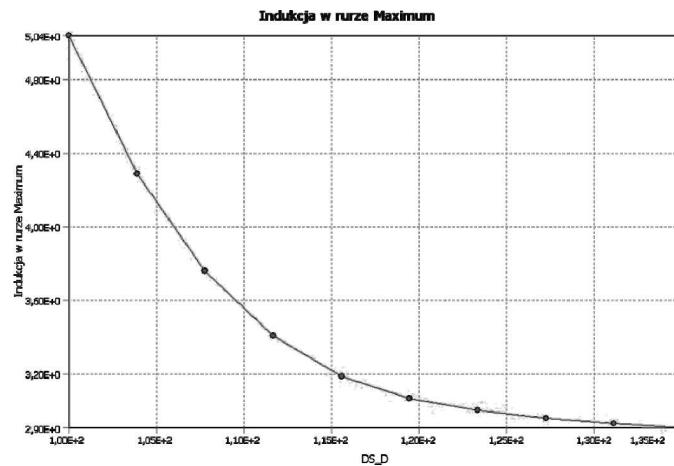
Graficzna reprezentacja realizacji funkcji celu przedstawia się następująco: sześciany – oznaczają osiągnięcie funkcji celu, czworościany – oznaczają nieosiągnięcie funkcji celu (kolorystyka zależna od stopnia zbliżenia do funkcji celu).

Tabela 1

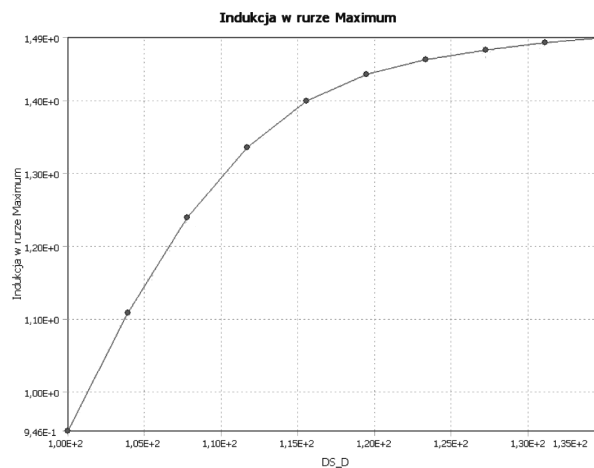
Wybrane warianty parametrów konstrukcyjnych głowicy odczytane z wykresu (rys.6)

Parametr	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3	Wariant 4
D [mm]	178	166	121	110
g [mm]	7,6	6,4	6,7	8,4
$szcz$ [mm]	8,0	6,7	9,8	7,4
wys_mag [mm]	47	44	36	50
sz_mag [mm]	59	54	53	56
B [T]	1,87	2,20	1,48	1,55

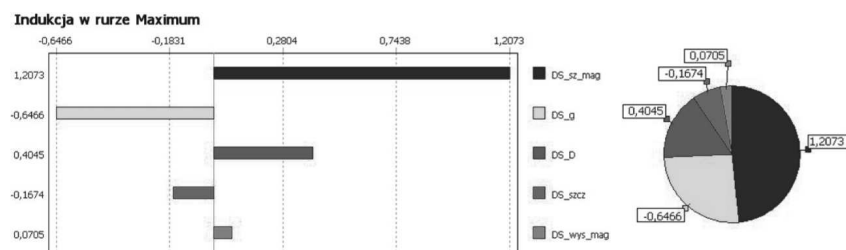
Poniższe wykresy (rys. 7, rys. 8) prezentują wpływ średnicy badanej żerdzi na wartość indukcji w jej wnętrzu (na funkcję celu) – tuż nad czujnikiem. Wykresy te zostały sporządzone dla dwóch różnych grubości badanej żerdzi. Widzimy zatem, jak duży wpływ na charakter zmian indukcji w badanej rurze ma kombinacja dwóch parametrów D , g . Ma to zasadniczy związek z podziałem strumienia magnetycznego przekazywanego przez



Rys. 7. Wartość B[T] w badanym obszarze rury w funkcji średnicy rury dla grubości $g = 5,0$ mm
 Fig. 7. The value of magnetic flux in the tube as a function of pipe diameter for $g = 5,0$ mm



Rys. 8. Wartość B[T] w badanym obszarze rury w funkcji średnicy rury dla grubości $g = 10,0$ mm
 Fig. 8. The value of magnetic flux in the tube as a function of pipe diameter for $g = 10,0$ mm

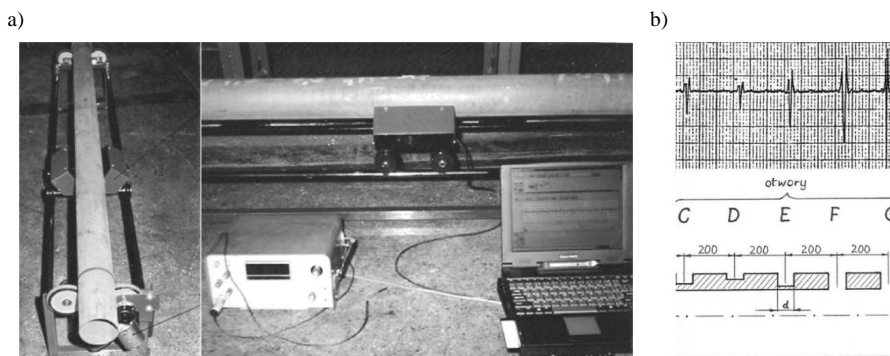


Rys. 9. Wpływ poszczególnych parametrów technicznych na funkcję celu optymalizacji
 Fig. 9. Effect of various technical parameters on the objective function of optimization

nabiegunniki do badanej struktury. Strumień ten dzieli się na strumień płynący „górną” bądź „dolną” częścią rury – patrząc w płaszczyźnie normalnej do osi rury (rys. 4). Rysunek 10 przedstawia „czułość lokalną” parametrów tzn. pokazuje w jakim stopniu zmiana danego parametru (zmiennej decyzyjnej optymalizacji) wpływa na funkcję celu i w którym kierunku – czyli czy wpływamy na funkcję celu B [T] w sposób „+” czy „-”.

5. Weryfikacja analiz numerycznych i podsumowanie

Celem weryfikacji rozważań teoretycznych oraz wyników analiz numerycznych, zbudowano stanowisko badawcze (rys. 10) składające się m.in. z ramy, po której porusza się głowica magnetyczna, rolek z napędem realizujących obrót badanej żerdzi oraz z urządzeń rejestrujących sygnał diagnostyczny. Przedmiotem badań rzeczywistych była specjalnie przygotowana rura kalibracyjna o średnicy $D = 100$ mm i grubości $g = 5$ mm, ze sztucznie przygotowanym szeregiem wad (przelotowe i nieprzelotowe) otwory oraz rowki „symulujące” uszkodzenia. Dla tak przygotowanej rury wykonano dodatkowo krzywe kalibracyjne pokazujące np. wpływ głębokości danego otworu o średnicy $d = 3$ mm na wartość indukowanej siły elektromotorycznej.



Rys. 10. Prototyp głowicy oraz kalibracyjna rura do weryfikacji eksperymentu numerycznego wraz z przykładowymi wynikami pomiarów

Fig. 10. A prototype of the magnetic head and the calibration tube to verify the numerical experiment

Przykładowe wyniki pomiarów rury kalibracyjnej dla odpowiadających zamodelowanych uszkodzeń zaprezentowano na rysunku 10b. Zapisu dokonano na rejestratorze z papierową taśmą termiczną. Amplituda sygnału charakteryzuje rozmiar uszkodzenia.

Podjęte działania z wykorzystaniem oprogramowania CAE ANSYS oraz jego możliwości związanych z analizą pól magnetycznych Metodą Elementów Skończonych, doprowadziły do powstania użytecznego urządzenia diagnostycznego. Wielokryterialna optymalizacja pod kątem parametrów metrologicznych (np. indukcja magnetyczna) oraz parametrów funkcjonalnych (gabaryty, masa) urządzenia pozwoliły na jego udoskonalenie.

Literatura

- [1] BCD POLAND Sp. z o. o. (bdc.com.pl).
- [2] F.P.H.U Drill Max s.c. (drillmax.pl).
- [3] Moaveni S., *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS 2008*.
- [4] Kwaśniewski J., *Zastosowanie wybranych metod analizy sygnału niestacjonarnego w diagnozowaniu lin i rur stalowych*, Studia Rozprawy Monografie Nr 86, Wydawnictwo IGSMiE, PAN, Kraków 2001.