

Zygmunt BIERNACKI

INSTYTUTU ELEKTRONIKI I SYSTEMÓW STEROWANIA POLITECHNIKI CZĘSTOCHOWSKIEJ
ZAKŁAD METROLOGII I ELEKTRONIKI

Aspekty konstrukcyjne i kontrolne wykrywaczy wtrąceń metalicznych



Prof. dr hab. inż. Zygmunt Biernacki ukończył w 1958 r. Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej. W Politechnice Częstochowskiej pracuje od 1962 r. Należy do wąskiego grona inicjatorów i organizatorów Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej. W 1969 r. uzyskał stopień dra nauk technicznych z metrologii elektrycznej, a w 1990 r. dra habilitowanego w Państwowym Uniwersytecie Elektrotechnicznym w Sankt Petersburgu w zakresie systemów pomiarowo-informacyjnych. W latach 1987-91 pełni funkcje dyrektora Instytutu Elektrotechniki Przemysłowej, a w latach 1991-94 oraz 1996-1998 dyrektora Instytutu Elektroniki i Systemów Sterowania. Od 1980 r. jest członkiem Komisji Kształcenia K.M. i A.N. PAN w Warszawie. Od 1986 r. jest członkiem Komisji Metrologii Oddziału Katowickiego PAN, a od 1992 r. zastępcą przewodniczącego Prezydium Komisji. W 1998 r. uzyskał tytuł naukowy profesora nauk technicznych z dyscypliny Elektrotechnika i specjalności Metrologia Elektryczna. Jest autorem lub współautorem około 310 publikacji i kilkunastu patentów. Jego obszar działalności naukowo-badawczej to Metrologia Elektryczna i Elektronika ze szczególnym zainteresowaniem pomiarami elektrycznymi wielkości nieelektrycznych.

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę naukowo-techniczną związaną z budową i eksploatacją wykrywaczy wtrąceń metalicznych w tworzywie niemetalicznym. Na wstępie wyeksponowano rolę występowania elementów metalowych w środowiskach niemetalicznych dla przebiegu procesów technologicznych w różnych gałęziach przemysłu, a w tym szczególnie znaczenie urządzeń wykrywających dla detekcji i identyfikacji wtrąceń metalowych.

Zaproponowano model fizyczny układu „sensor - wtręcenia”, w oparciu o który dokonano analizy funkcjonalnej dla wykrywacza z sensorem indukcyjnym. Sprecyzowano zależność funkcjonalną określającą postać sygnału wyjściowego wykrywacza indukcyjnego od identyfikowanego wtręcenia metalicznego. Omówiono także stosowane w praktyce różne odmiany wykrywaczy wraz z własnymi opracowaniami. Dokonano oceny właściwości techniczno - eksploatacyjnych omawianych wykrywaczy w tym elektronicznego wykrywacza EAGLE produkcji zachodniej. Artykuł zakończono wnioskami i wykazem przedmiotowej literatury.

Abstract

The paper presents selected theoretical and technological problems related to the construction and exploitation of detectors of metallic inclusions in a non-metallic medium. In the beginning the role of metallic inclusions within non-metallic media in various industrial technological processes is discussed, with special focus on devices detecting and identifying metallic inclusions.

A physical model of the 'sensor - inclusions' system is developed, which is the basis of functional analysis of a detector with an inductive sensor. Next, a functional relationship is determined which defines the form of the inductive detector output signal from the identified metallic inclusion. Then, various types of detectors are discussed among which are the author's original designs. The technological and exploitation properties of a number of detectors are assessed, including electronic detector EAGLE. Finally, conclusions are presented.

Wprowadzenie

W różnorodnych sferach działalności bytowej i produkcyjnej człowieka pojawia się często konieczność stwierdzenia obecności a następnie lokalizacji elementów metalowych, w tym także z metali szlachetnych oraz kontroli substancji nieprzewodzących na obecność w nich wtrąceń metalicznych.

W doniesieniach publikacyjnych z tej dziedziny a także opisach patentowych [1,5] pojawiają się nierzadko informacje o różnych koncepcjach rozwiązań konstrukcyjnych i układów elektronicznej aparatury kontrolno-pomiarowej przeznaczonej do tego celu. Aparatura ta, zwana często wykrywaczami lub detektorami metali, znalazła wielorakie zastosowania m.in.: w wojsku - do lokalizacji min i systemów zapór minowych, w budownictwie - do identyfikacji elementów konstrukcji metalowych oraz tras ułożenia przewodów elektrycznych itp. W ważnym dla Gospodarki Narodowej przemyśle: energetycznym, drzewnym, hutniczym, papierniczym i innych niepożądane przedmioty metalowe występują w surowcach i półfabrykatch. Należy tu także podkreślić, że szybka kontrola bagażu i pasażerów przy użyciu wykrywaczy metali zapewnia bezpieczeństwo podróży (terrorizm) w komunikacji pasażerskiej (lotniczej, morskiej itp.).

Użycie wykrywaczy to nie tylko lokalizacja poszukiwanego wtręcenia metalowego i określenie jego wymiarów ale także często identyfikacja metrologiczna - czy jest to metal dia -, para - lub ferromagnetyczny? Istotnym parametrem wykrywacza jest jego czułość a tym samym zasięg reagowania na wtręcenia metaliczne, który zależy także od jego konstrukcji oraz rodzaju i gabarytów wykrywanego wtręcenia metalowego.

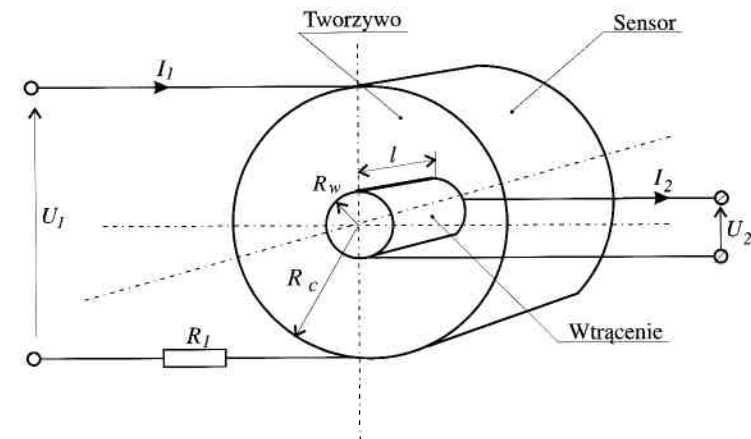
Aparatura wykrywająca wyposażona jest we własne źródło energii w. cz. , która penetruje badany obszar powodując zmianę sygnału wyjściowego najczęściej w postaci prądu wskazywanego przez miernik wykrywacza [2]. W roli mierników (wskaźników) stosowane są: słuchawki teletechniczne, miliwoltomierze, elektroniczne mierniki potencjału, diody świecące LED itp. [3,4]. Stosowany zakres częstotliwości pracy wykrywaczy mieści się w przedziale od 100 kHz do 25 MHz.

Podstawy funkcjonowania wykrywaczy

Analizując stosowane rozwiązania wykrywaczy, pod względem ich konstrukcji i istoty funkcjonowania, można wymienić następujące zasady :

- pomiar różnicy częstotliwości Δf ;
- równoważenie indukcyjności $L_x - L_w = 0$;
- kompensacja indukcji wzajemnej M ;
- emitowanie i kontrola selektywne sygnałów elektromagnetycznych o zdeterminowanej częstotliwości.

Analizę problemu wykrywania wtrąceń metalicznych w środowisku nieprzewodzącym można sprowadzić do układu złożonego z sensora wykrywacza oraz elementu metalowego, który da się zamodelować adekwatnym obwodem elektrycznym (rys. 1).



Rys. 1. Elektryczny model układu - „sensor-wtrącenie”.

W oparciu o własne rozwiązania konstrukcyjne i badania różnych odmian wykrywaczy stosowanych m.in.: na transporterach taśmowych węgla (np. w hucie Częstochowa) [2,4] stwierdza się, że w większości przypadków wykrywacze wyposażone są w sensory indukcyjne, dla których przyjęto: R_1, L_1, U_1, I_1, z_1 oraz R_2, L_2, U_2, I_2, z_2 - parametry (rezystancja, indukcyjność, napięcie, prąd i liczba zwojów) - odpowiednio sensora indukcyjnego oraz wtrącenia metalicznego.

W zaproponowanym układzie, obowiązują następujące zależności:

$$U_1 = R_1 i_1 + \frac{d}{dt}(L_1 i_1) + \frac{d}{dt}(M i_2), \quad (1)$$

$$U_2 = R_2 i_2 + \frac{d}{dt}(L_2 i_2) + \frac{d}{dt}(M i_1). \quad (2)$$

Przyjmując zerowe warunki początkowe i stosując przekształcenie Laplace'a, otrzymano równania:

$$I_1'(R_1 + pL_1) = U_{m1} \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} \quad (3)$$

bez wtrącenia metalowego oraz

$$I_1(R_1 + pL_1) + pMI_2 = U_{m1} \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} \quad (4)$$

z wtrąceniem metalowym. W celu określenia wartości SEM-nej E_2 indukowanej we wtrąceniu metalicznym można wykorzystać znane [4] wyrażenie:

$$E_2 = 4kf \cdot \phi_m = 4kf \cdot \pi \cdot R_w^2 \cdot B_m \quad (5)$$

Po prostych przekształceniach analitycznych sformułowano wyrażenie na moc traconą we wtrąceniu (przyjęto tu wtrącenie w formie walca o promieniu R_w i długości l):

$$P = \frac{2k^2 l f^2 B_m^2 \pi R_w^4}{\rho} \quad (6)$$

Znając wartość zastępczej rezystancji wtrącenia oraz mocy w nim traconej, prąd wyindukowany I_2 można wyrazić zależnością:

$$I_2 = \sqrt{\frac{P}{R_w}} = \frac{\sqrt{2k f \mu I_1 z_1 \pi R_w^3}}{2\rho R_c} = AI_1 \quad (7)$$

Dokonyjąc odwrotnej transformacji Laplace'a-Carsona równań (3) i (4) oraz uwzględniając to, że istotne znaczenie ma tylko zmiana wartości skutecznej prądu, I_1 , otrzymano:

$$\Delta I_1 = I_1 - I_1' = \frac{U_{m1}}{\sqrt{2}} \left[\frac{1}{\sqrt{R_1^2 + \omega^2(L_1 + MA)^2}} - \frac{1}{\sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}} \right] \quad (8)$$

Zmiana prądu ΔI_1 jest rezultatem zmiany indukcyjności ΔL sensora pomiarowego określonej zależnością:

$$\Delta L = MA = M \frac{\sqrt{2k f \mu} \cdot z_1 \pi R^3}{2\rho R_c} \quad (9)$$

w powyższych wzorach oznaczają:

U_{m1} - wartość szczytowa napięcia sensora;

M - indukcyjność wzajemna między sensorem a wtrąceniem;

ρ - rezystywność materiału wtrącenia;

k - współczynnik kształtu;

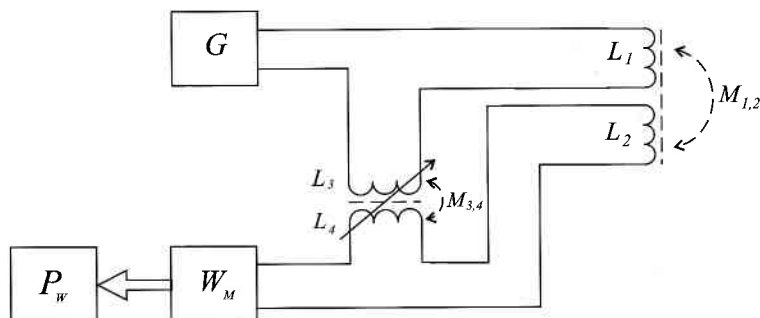
R_c - średni promień sensora indukcyjnego;

B_M - wartość szczytowa indukcji magnetycznej we wtrąceniu.

Takie parametry sensora jak: częstotliwość, liczba zwojów z_1 , średnia droga strumienia magnetycznego wpływają wprost lub odwrotnie proporcjonalnie na wielkość zmiany indukcyjności ΔL [2].

Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych wykrywaczy

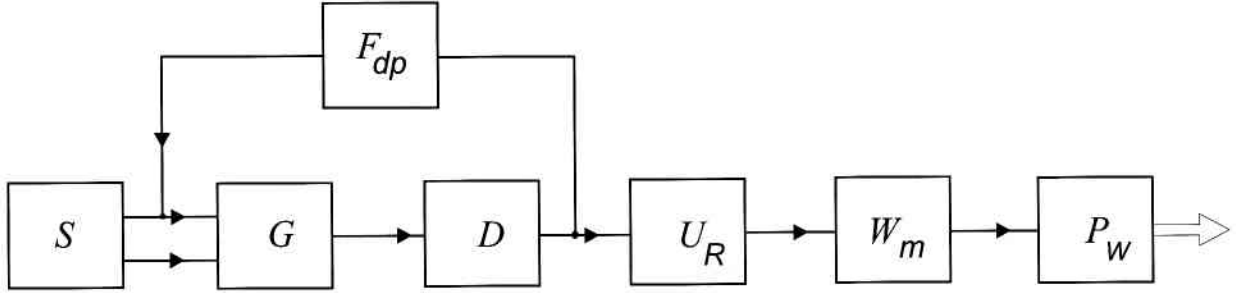
Spośród znanych [2] rozwiązań układowych wykrywaczy na uwagę zasługuje układ działający na zasadzie zmiany indukcyjności wzajemnej M . W jego skład wchodzi (rys. 2): elektroniczny generator zasilający w.c.z. - G , sensor o cewkach L_1 i L_2 , układ cewek L_3, L_4 o nastawianym współczynniku sprzężenia, wzmacniacz mocy W_m i przełącznik wykonawczy P_w .



Rys. 2. Układ z pomiarem indukcyjności wzajemnej M

Regulując indukcyjność wzajemną $M_{3,4}$ pomiędzy cewkami L_3 i L_4 , doprowadza się układ do stanu równowagi. Pojawienie się wtrącenia metalicznego zakłóca ten stan powodując wystąpienie napięcia, które po wzmożeniu pobudza urządzenie wykonawcze P_w . Zaletą tego układu jest duża czułość i niewrażliwość na zmiany częstotliwości generatora; wadą natomiast jest znaczny wpływ czynników zewnętrznych, np.: temperatury, drgań mechanicznych itp.

Innym rozwiązaniem jest wykrywacz rezonansowy (rys. 3). W jego układzie mierzy się zmianę indukcyjności cewki S , która



Rys. 3 Układ rezonansowy z pojedynczą cewką

jest częścią składową obwodu drgającego generatora G . Napięcie zmienne z generatora jest prostowane w detektorze D .

Odpowiednia część napięcia stałego, proporcjonalna do amplitudy napięcia zmiennego generatora, podawana jest przez filtr dolnoprzepustowy F_{dp} na wejście generatora G do stabilizacji pracy układu. Zmiany napięcia stałego za detektorem D wywołane zmianą dobroci cewki S formowane przez układ różniczkujący U_R , przekazywane są w postaci impulsów na wzmacniacz W_m .

Różnorodność rozwiązań układów wykrywczy rezonansowych jest znaczna, przy czym różnią się one pomiędzy sobą sposobem „obróbki” informacji o wtrąceniu. Oprócz zmian napięcia generowanego, zmian częstotliwości tegoż napięcia, bardzo często stosowane są układy wykrywczy rezonansowych, w których wtrącenie metaliczne powoduje „zerwanie” drgań w wyniku przeciążenia generatora.

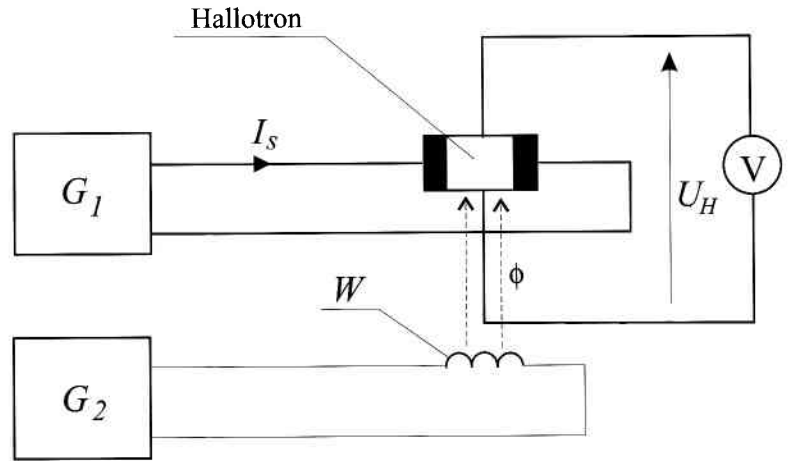
Na uwagę zasługuje także wykrywacz z czujnikiem hallotronowym działający w oparciu o zjawisko Halla (rys.4). Sensor

składa się z jednego lub kilku hallotronów oraz źródła pola elektromagnetycznego (wzbudnik W).

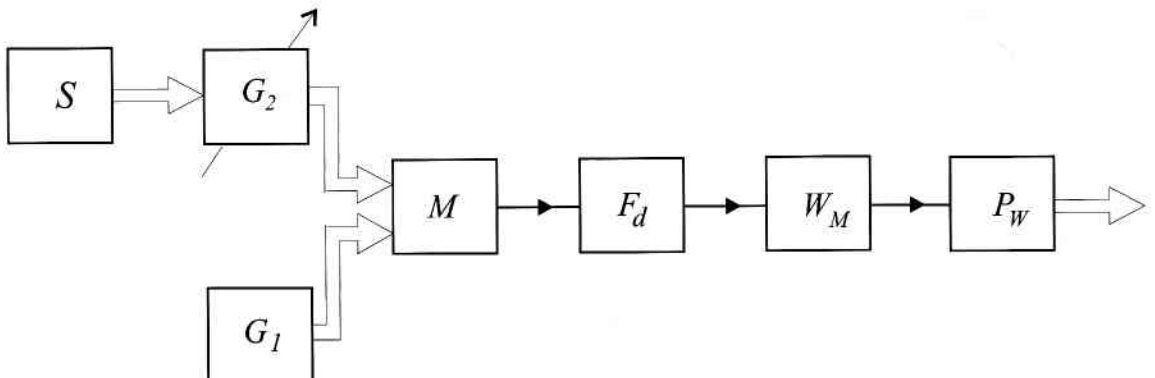
Zakłócenie rozkładu linii pola elektromagnetycznego, wywołane wtrąceniem metalicznym powoduje zmianę strumienia magnetycznego Φ przenikającego przez hallotron, a tym samym pojawienie się na jego wyjściu zmiennego napięcia Halla (U_H). Zwiększenie czułości wykrywacza osiąga się przez wzrost częstotliwości prądu zasilającego wzbudnik. Innymi sposobami zwiększenia czułości jest użycie koncentratów ferromagnetycznych oraz stosowanie cewek rdzeniowych. Wykrywacz ten jest

układem znacznie mniej wrażliwym na zmiany indukcyjności cewek pod wpływem temperatury [1].

Najczęściej stosowanym wykrywaczem jest układ działający na zasadzie interferencji, zwany też wykrywaczem dudnieniowym (rys. 5). Bazuje on na różnicy częstotliwości pomiędzy



Rys. 4. Wykrywacz hallotronowy



Rys. 5. Wykrywacz dudnieniowy

dwoma identycznymi generatorami tj. generatorem wzorcowym G_1 (o stałej częstotliwości f_1) a generatorem G_2 z sensorem indukcyjnym S (zmienna częstotliwość f_2). W stanie wyjściowym, kiedy w polu cewki wykrywacza brak jest wtrąceń metalicznych, częstotliwości obu generatorów są równe. W chwili pojawienia się wtrącenia metalicznego w zasięgu cewki pomiarowej, częstotliwość generatora drugiego ulegnie odpowiedniej zmianie. W wyniku zdudnienia obu tych częstotliwości w modulatorze M otrzymuje się na wyjściu napięcia o częstotliwościach f_1, f_2 i $f_1 \pm f_2$. Z powodu zniekształceń powstających w mieszaczu mogą także pojawić się sygnały $mf_1 \pm nf_2$. Za pomocą filtru dolno-przepustowego F_d z otrzymanego widma drgań można wydzielić częstotliwość różnicową $\Delta f = f_2 - f_1$. Następnie sygnał ten po wzmocnieniu podawany jest na podzespół wyjściowy P_w .

Wykrywacz dudnieniowy wtrąceń metalicznych, zbudowany w Zakładzie Metrologii Elektrycznej Politechniki Częstochowskiej, wykazuje dużą czułość i niezawodność pracy. Został on wdrożony do kontroli procesów technologicznych m. in. w hucie „Częstochowa”, Fabryce Celulozy i Papieru w Kostrzynie nad Odrą i innych. Znane dotychczas wykrywacze pracują w przedziale częstotliwości (50 ÷ 200) kHz.

Jakiegokolwiek zaistniałe zakłócenie, spowodowane przez zewnętrzne pole elektromagnetyczne o ww. zakresie częstotliwości, może spowodować zadziałanie wykrywacza hallotronowego dając mylną informację o istnieniu wtrącenia. Natomiast przy wykrywaczu dudnieniowym wzmocniony impuls wywołał wtrąceniem posiada częstotliwość rzędu od kilkudziesięciu do kilkuset Hz, która jest ułamkiem częstotliwości zasilającej cewkę pomiarową. Sygnały zakłócające, które mogą wywołać nieprawidłowe zadziałanie układu mają w wykrywaczu dudnieniowym ograniczony przedział częstotliwości. Układ z dwoma generatorami jest niezawodny w działaniu, gdyż oba generatory nie wpływają na siebie i nie istnieje możliwość ich wzajemnego „wciągania” się częstotliwościowego. Aby zapobiec rozstrajaniu się generatorów należy je zbudować w tej samej konfiguracji i z takich samych elementów [1].

Innym wykrywaczem zbudowanym w oparciu o zasadę interferencji jest wykrywacz ATV-218 [5]. Jego głównym elementem składowym jest układ scalony UL1321. Układ ten zawiera w swej strukturze wewnętrznej dwa identyczne przedwzmacniacze m.cz. o maksymalnym wzmocnieniu po 60 dB każdy. Urządzenie (podobnie jak poprzednie) składa się z dwóch generatorów w.cz., mieszacza i wzmacniacza m.cz. zasilającego np. słuchawki. Średnie częstotliwości generatorów wynoszą 450 kHz. Częstotliwość jednego generatora zależy od wartości indukcyjności czujnika L oraz nastawianej pojemności C . Pojemność ta umożliwia ustawienie tzw. „zera dudnień”.

Sygnał emitowany we wskaźniku po „jednej stronie zera” odpowiada wykryciu materiału ferromagnetycznego. Natomiast gdy elementem poszukiwanym jest diamagnetyk (złoto, miedź) to przy zbliżeniu sensora sygnał powoli zanika, przechodzi przez „zero” i ponownie narasta. Średni zasięg pracy wykrywacza to około 50 ± 10 cm [5].

Wykrywacz metali „EAGLE” [3] umożliwia lokalizację wtrąceń metalowych oraz ich identyfikację ze względu na rodzaj metalu (żelazo, aluminium, złoto, srebro). Podobnie jak wyżej, podzespołami są tu 2 generatory o częstotliwościach kilkudziesięciu kHz. Jeden z nich stanowi częstotliwość wzorcową, a drugi jest przestrajany poprzez sondę stanowiącą jego element drgający i służący do detekcji wtrąceń metalicznych. Urządzenie zawiera ponadto mikroprocesory w układzie bloków A/C, zespół przycisków wielofunkcyjnych z wyświetlaczem cyfrowym. Wskaźnikiem jest głośnik lub słuchawki np. telefoniczne. Czujnikiem jest sonda indukcyjna w postaci dysku na wysięgniku z możliwością nastawy jej płaszczyzny pracy w stosunku do powierzchni penetracji.

Wykrywacz może pracować w trzech reżimach funkcjonalnych:

- jako wykrywacz metali w ogóle,
- jako identyfikator rodzaju wykrytego metalu np. Fe, Au, Ag itp.,
- jako lokalizator głębokości wykrytego metalu.

Zasięg pracy wykrywacza wynosi ok. 25 ÷ 50 cm. Głębokość wykrywanych wtrąceń metalicznych zależy od rodzaju metalu a także od jego wymiarów i kształtu. Oprócz sygnału dźwiękowego, informującego o obecności przedmiotu metalowego, na wyświetlaczu jest podawana głębokość w calach od 9,5 do 0 [3]. Wykrywacz ten może też pracować jako urządzenie rozpoznające nominały monet dolarowych i wskazywać ewentualne fałszywe (np. w bankach, kantorach itp).

Uwagi końcowe

- Wśród omawianych wykrywaczy trudno spotkać rozwiązanie spełniające wszystkie oczekiwania użytkowników.
- Największą trudność sprawia ustalenie za pomocą wykrywacza rodzaju i kształtu poszukiwanego przedmiotu.
- Przykładowo moneta o średnicy około 25 mm wywoła zmiany 64-krotnie mniejsze niż inny przedmiot z takiego samego materiału o średnicy około 100 mm, znajdujący się w tej samej odległości. Podobnie przedmiot metalowy oddalony od sensora o 200 mm wywoła zmiany 4096-krotnie mniejsze niż taki sam przedmiot oddalony na odległość 50 mm.
- Prawidłowość pracy wykrywaczy w praktyce jest mocno utrudniona z powodu znajdujących się w obszarze poszukiwania metalowych elementów konstrukcyjnych, zaś w gruncie występowania wtrąceń rudopodobnych, większych skupisk wody gruntowej itp.
- Wzrastające zapotrzebowanie na urządzenia wykrywające przedmioty (wtrącenia) metaliczne pobudza do dalszego ich doskonalenia i poszukiwania nowych rozwiązań układowych i konstrukcyjnych o lepszych właściwościach kontrolnych.

Literatura

- [1] Z. BIERNACKI, L. BOROWIK, R. JANICZEK.: Krytyczna ocena indukcyjnych urządzeń wykry-wających wtrącenia metaliczne. Materiały V Międzuczelnianej Konferencji Metrologów, Częstochowa 1979 r.
- [2] Z. BIERNACKI, R. JANICZEK.: Elektryczne sposoby wykrywania wtrąceń metalicznych w materiałach nieprzewodzących. Z.N.P.CZ. Elektrotechnika Nr 6, Częstochowa 1974 r.
- [3] Z. BIERNACKI, M. KURKOWSKI.: Instrukcja eksploatacji elektronicznego wykrywacza metali EAGLE. Częstochowa 1995 r.
- [4] L. BOROWIK, R. JANICZEK, J. MROŹEK.: Dobór parametrów indukcyjnych sensorów wtrąceń metalicznych. Materiały „Seminarij promocyjnego” - Zastosowanie sensorów, Częstochowa 10-12. 09. 1991.
- [5] A. JANECZEK, SP5AHT.: Prosty wykrywacz metali, Elektronika praktyczna 7/94.