

Jerzy MAZUR

Instytut Elektroniki
Politechniki Śląskiej

WYKRYWANIE PRZEDMIOTÓW METALOWYCH W OŚRODKU NIEMETALICZNYM PRZY WYKORZYSTANIU PRĄDÓW WIROWYCH

Streszczenie. Opisano i omówniono zadadę działania kilku modeli przyrządów przeznaczonych do wykrywania przedmiotów metalowych w niemetalicznym ośrodku, a działających na zasadzie wzbudzenia prądów wirowych w metalu i powstających w rezultacie zmianach impedancji cewki lub cewek pomiarowych. Zmiana impedancji jest wykrywana różnymi metodami.

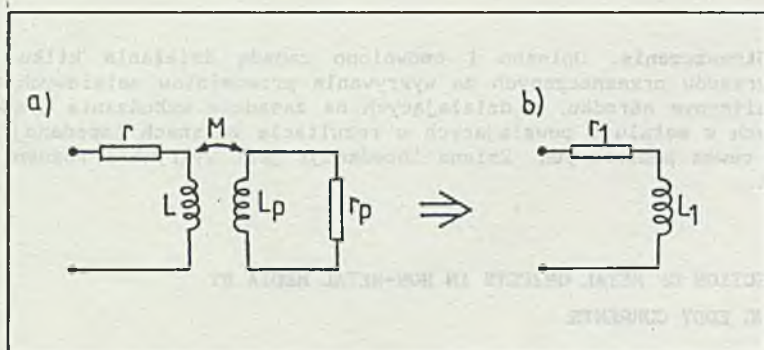
DETECTION OF METAL OBJECTS IN NON-METAL MEDIA BY USING EDDY CURRENTS

Summary. Some models of instruments for detection of metal objects in non-metal media are presented. The instruments operate basing on induction of eddy currents in metal and resulting changes of measurement coils impedances. Different methods are applied to indicate the changes.

ОБНАРУЖИВАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕДМЕТОВ В НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СРЕДЕ С ПОМОЩЬЮ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Резюме. В статье описан принцип действия нескольких моделей устройств предназначенных для обнаружения металлических предметов в неметаллической среде. Все они действуют используя эффект вихревых токов в металле и возникающие в его результате изменения импеданса измерительной катушки или катушек. Изменение импеданса обнаруживается разными методами.

W konduktometrii wiroprowodowej cewką pomiarową wytwarzającą zmienne pole magnetyczne przykładana się do powierzchni badanego metalu. Pole magnetyczne cewki pomiarowej wzbudza w badanym - najczęściej niemagnetycznym - metalu prądy wirowe. W tych warunkach układ "cewka pomiarowa - badany metal" zachowuje się jak układ sprzężonych cewek. Cewka pomiarowa, posiadająca indukcyjność L i rezystancję r , stanowi uzwojenie pierwotne, natomiast badany metal - uzwojenie wtórne o indukcyjności L_p obciążone rezystorem r_p (o wartościach zależnych od właściwości badanej próbki) [1]. Schematy zastępcze układu sprzężonych cewek przedstawiono na rys. 1. Po sprowadzeniu obwodu



Rys. 1. Schematy zastępcze układu: cewka pomiarowa - metal

a) schemat zastępczy, b) schemat zastępczy ze sprowadzeniem obwodu wtórnego do obwodu pierwotnego

Fig. 1. Substitutional schemes for system: measuring coil - metal

a) substitutional scheme, b) substitutional scheme with a secondary circuit led for the primary scheme

wtórnego na stronę pierwotną uzyskuje się uproszczony schemat zastępczy reprezentowany przez cewkę indukcyjną o indukcyjności L_1 o rezystor o rezystancji r_1 :

$$L_1 = L - L_p \frac{\omega^2 M^2}{r_p^2 + \omega^2 L_p^2}$$

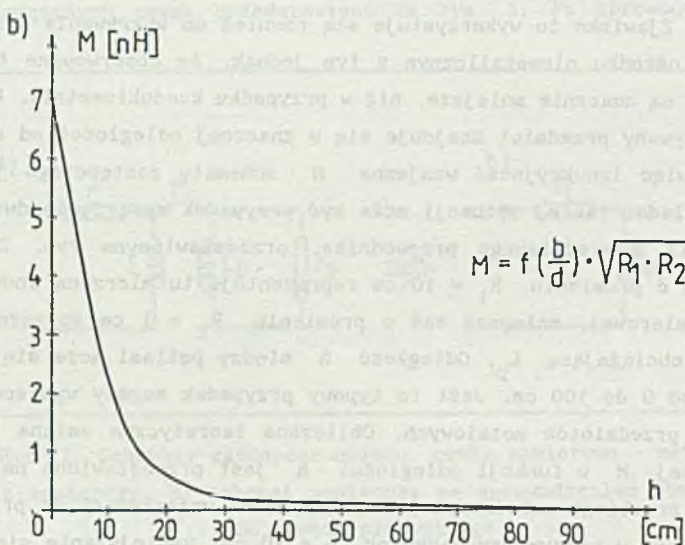
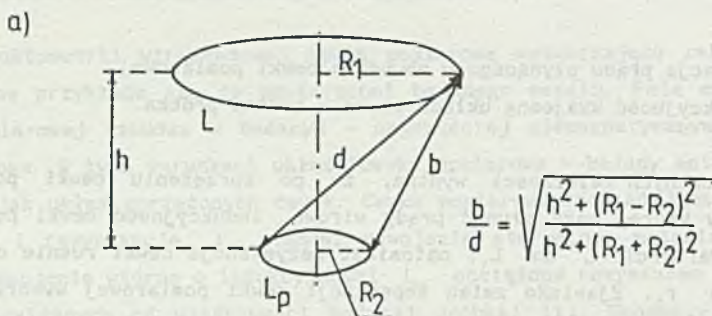
$$r_1 = r + r_p \frac{\omega^2 M^2}{r_p^2 + \omega^2 L_p^2}$$

gdzie:

- ω - pulsacja prądu płynącego w obwodzie cewki pomiarowej,
- M - indukcyjność wzajemna układu cewka - badana próbka.

Z przytoczonych zależności wynika, że po sprzężeniu cewki pomiarowej z próbką, w której mogą płynąć prądy wirowe, indukcyjność cewki pomiarowej maleje od wartości L do L_1 , natomiast rezystancja cewki rośnie od wartości r do r_1 . Zjawisko zmian impedancji cewki pomiarowej wykorzystywane jest w konduktometrii, gdyż z tych zmian można wnioskować o parametrach badanej próbki. Zjawisko to wykorzystuje się również do wykrywania przedmiotów metalowych w ośrodku niemetalicznym z tym jednak, że obserwowane tu zmiany indukcyjności są znacznie mniejsze, niż w przypadku konduktometrii. Wynika to stąd, że wykrywany przedmiot znajduje się w znacznej odległości od cewki pomiarowej, a więc indukcyjność wzajemna M schematu zastępczego jest niewielka. Przykładem takiej sytuacji może być przypadek sprzężenia dwóch pojedynczych pętli z miedzianego przewodnika, przedstawioną na rys. 2a. Niech większa pętla o promieniu $R_1 = 10$ cm reprezentuje tu mierzoną indukcyjność L (cewkę pomiarową), mniejsza zaś o promieniu $R_2 = 1$ cm sprzężoną z nią indukcyjność obciążającą L_p . Odległość h między pętlami może się zmieniać w granicach od 0 do 100 cm. Jest to typowy przypadek mogący występować przy wyszukiwaniu przedmiotów metalowych. Obliczona teoretyczna zmiana indukcyjności wzajemnej M w funkcji odległości h jest przedstawiona na wykresie (rys. 2b). Z przebiegu zależności $M = f(h)$ można wnioskować, że przy pewnej odległości - np. w naszym przypadku ok. $h = 20$ cm, zmniejszanie się M odbywa się z mniejszą szybkością wraz ze wzrostem odległości. Jest to wynikiem tego faktu, że linie sił pola wytwarzanego przez cewkę L docierają do poszukiwanego elementu już tylko w niewielkim stopniu. Przedmioty leżące w większej odległości mogą być już niewykrywalne, gdyż zmiana M leży poza granicą zdolności rozdzielczej lub czułości przyrządu. Określona w ten sposób odległość krytyczna jest, oczywiście, zależna od stosunku poziomu sygnału użytecznego do szumu, czułości zastosowanego detektora, zmian indukcyjności wzajemnej itp.

Jeżeli cewkę pomiarową wykorzysta się w obwodzie decydującym o częstotliwości generatora LC, to pojawienie się przedmiotu metalowego w polu cewki, powodujące zmniejszenie się indukcyjności cewki (w efekcie oddziaływania prądów wirowych), spowoduje wzrost częstotliwości generatora. Jeden z pierwszych przyrządów tego typu, to opracowany w latach wojny w Wojsku Polskim, w Anglii, tzw. szukacz min typu polskiego [2].



Rys. 2. Model i charakterystyka układu cewka pomiarowa - metal

a) model składający się z dwóch pojedynczych pętli miedzianego przewodnika,
 b) zależność indukcyjności wzajemnej M pojedynczych pętli od odległości między nimi

Fig. 2. Model and characteristics of system: measuring coil - metal

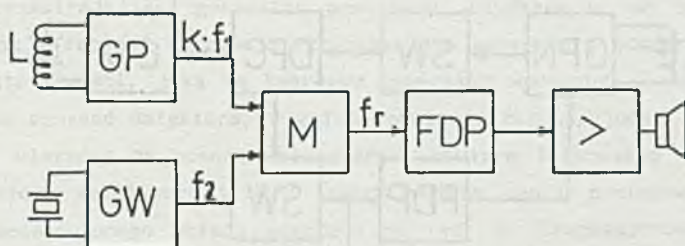
a) model composed of two single loops copper conductor, b) relationship between mutual inductance M of the two single loops and a distance between them

Zmianę częstotliwości generatora można wykrywać stosując drugi generator o częstotliwości stabilizowanej rezonatorem kwarcowym, mieszacz, filtr dolno-przepustowy oraz słuchawkę. Jeżeli częstotliwości generatora z cewką pomiarową i generatora kwarcowego różnią się - ze względu na czułość ucha ludzkiego - o 800 Hz do 1 kHz (przy braku metalu w polu cewki pomiarowej), to

sygnał wyjściowy mieszacza o częstotliwości różnicowej zostanie przesłany przez filtr do słuchawki. Pojawienie się metalu w polu cewki pomiarowej spowoduje zmianę częstotliwości generatora, a więc zmianę częstotliwości różnicowej i zmianę wysokości tonu (np. podwyższenie) w słuchawce. Jeżeli jednak uwzględni się, że zmiany częstotliwości generatora nie są duże oraz weźmie się pod uwagę niedoskonałość słuchawek i ludzkiego ucha, to jest oczywiste, że układ taki nie może mieć zadowalającej czułości.

Poprawę czułości przyrządu służącego do wykrywania przedmiotów metalowych można uzyskać wówczas, gdy generator z cewką pomiarową generuje składową podstawową oraz harmoniczne i gdy wykrywania zmiany częstotliwości dokonuje się dla k -tej harmonicznej. Schemat blokowy takiego układu przedstawiono na rys. 3 [3]. Jeżeli w polu cewki pomiarowej nie ma metalu, to uzyskiwana częstotliwość różnicowa wynosi:

$$f_{r1} = k \cdot f_1 - f_2$$



Rys. 3. Schemat blokowy przyrządu do wykrywania przedmiotów metalowych z porównywaniem częstotliwości generatorów na poziomie k -tej harmonicznej
 GP - generator z cewką pomiarową, GW - generator wzorcowy, M - mieszacz,
 FDP - filtr dolnoprzepustowy

Fig. 3. Block diagram of the detector of metal objects with comparison of generator frequency at the k -th harmonic level

GP - oscillator with measuring coil, GW - standard frequency oscillator, M - mixture, FDP - low pass filter

W badanym układzie modelowym obrano $f_{r1} = 300$ Hz. Pojawienie się metalu w polu cewki powoduje zmianę częstotliwości podstawowej o Δf . Częstotliwość k -tej harmonicznej wyniesie wówczas

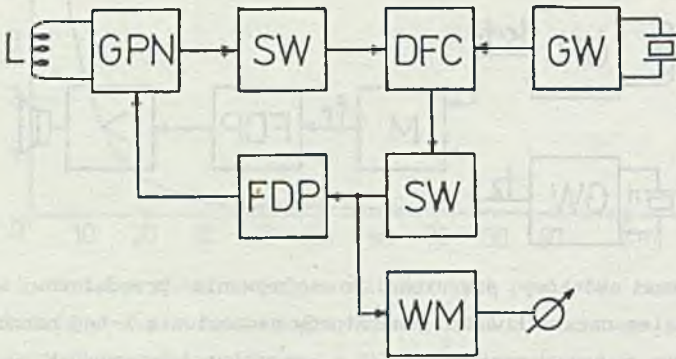
$$f_k = k(f_1 + \Delta f)$$

W tych warunkach częstotliwość różnicowa wyniesie:

$$f_{r2} = k(f_1 + \Delta f) - f_2 = kf_1 + k\Delta f - f_2 = f_{r1} + k\Delta f$$

Przedstawiony układ cechują więc k-krotnie większe zmiany częstotliwości różnicowej w odniesieniu do układu, w którym porównania częstotliwości dokonuje się na poziomie składowej podstawowej.

Poszukując struktury przyrządu o dużej czułości stwierdzono, że warunki te spełni układ, w którym zastosuje się czuły detektor fazowo-częstotliwościowy wykazujący maksymalną czułość wówczas, gdy dwa przebiegi podawane na jego wejścia mają równe częstotliwości, natomiast mają różne kąty fazowe. Generator z cewką pomiarową powinien więc być generatorem przestrajającym napięciem (GPN, ang.: voltage - controlled oscillator VCO), współpracującym z pętlą synchronizacji fazowej. Schemat blokowy przyrządu działającego zgodnie z tą koncepcją przedstawiono na rys. 4 [4]. Przy braku metalu w polu oddziaływania



Rys. 4. Schemat blokowy przyrządu do wykrywania przedmiotów metalowych z wykorzystaniem pętli synchronizacji fazowej

GPN - generator przestrajany napięciem (z cewką pomiarową), GW - kwarcowy generator wzorcowy, DFC - detektor fazowo-częstotliwościowy, SW - separator wtórnikowy, FDP - filtr dolnoprzepustowy, WM - woltmierz napięcia stałego

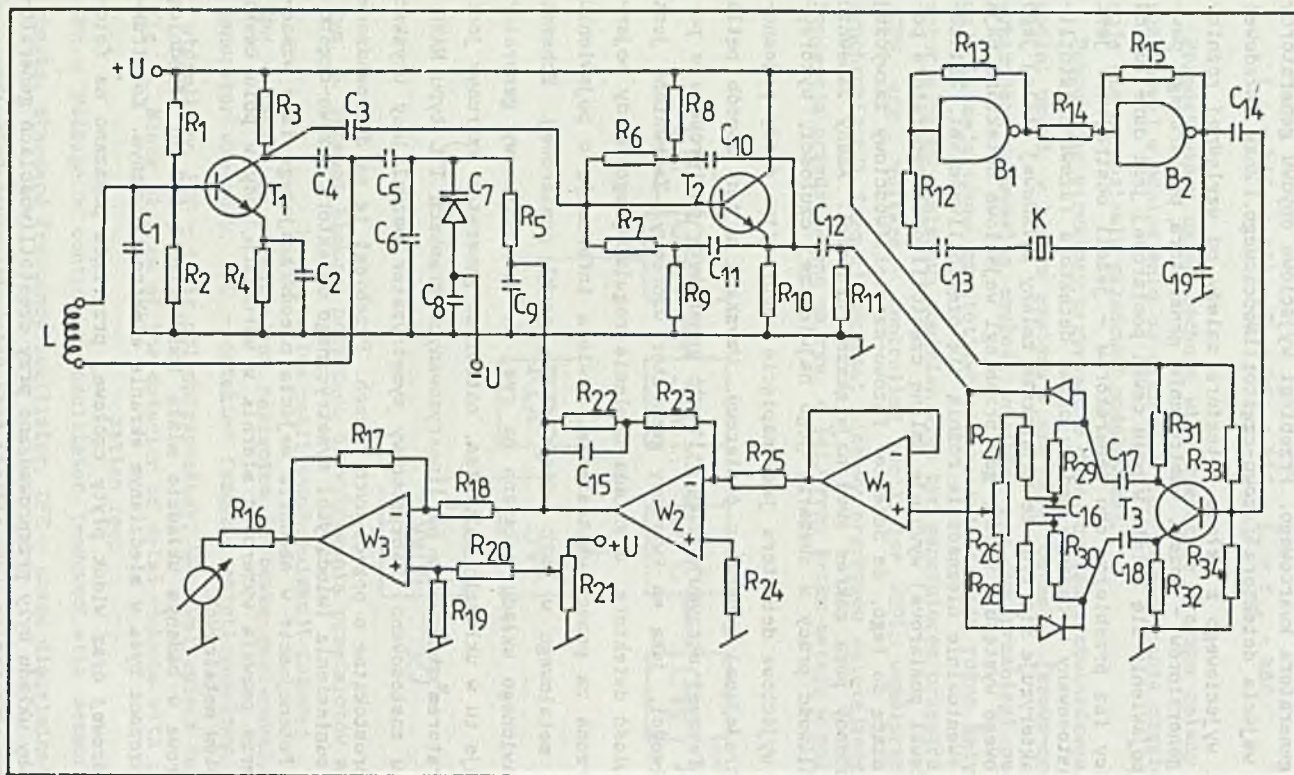
Fig. 4. Block diagram of the detector of metal objects with phase synchronization loop

GPN - voltage - controlled oscillator (endowed with measuring coil, GW - quartz, standard frequency oscillator, DFC - phase discriminator, SW - follower separator, FDP - low pass filter, WM - direct current voltmeter

cewki pomiarowej generator pomiarowy jest dostrojony do częstotliwości równej częstotliwości generatora kwarcowego. Przebiegi wyjściowe obydwu generatorów są podawane na wejścia detektora fazowo-częstotliwościowego. Znak składowej stałej napięcia wyjściowego z układu detektora zależy od względnej różnicy częstotliwości generatorów - jeżeli odstrojenie generatora pomiarowego powstałe w wyniku pojawienia się metalu w polu cewki pomiarowej jest duże lub od względnej różnicy faz przebiegów obu generatorów - jeżeli odstrojenie jest bardzo małe. Zastosowany w badanym modelu układ detektora fazowo-częstotliwościowego charakteryzuje się tym, że największe zmiany składowej stałej jego napięcia wyjściowego występują wtedy, gdy przebiegi wejściowe detektora mają różne fazy lub ewentualnie nieznacznie różnią się częstotliwościami. Zbliżenie metalu do cewki pomiarowej wywołuje zmianę częstotliwości generatora pomiarowego prowadzącą do tego, że detektor fazowo-częstotliwościowy zazwyczaj zostaje wyprowadzony poza zakres swej największej czułości. Aby zapewnić detektorowi możliwość pracy w obszarze jego największej czułości, wykorzystano napięcie wyjściowe detektora jako napięcie regulacyjne diody pojemnościowej, przestrajającej generator pomiarowy. Uzyskana w ten sposób pętla synchronizacji fazowej utrzymuje częstotliwość generatora pomiarowego w pobliżu częstotliwości, jaką ma kwarcowy generator wzorcowy. Zapewniona jest więc wysoka czułość detektora, a zmiana napięcia regulacyjnego diody pojemnościowej, mierzona za pomocą woltomierza, zawiera informację o pojawieniu się przedmiotu metalowego w polu oddziaływania cewki pomiarowej. Schemat ideowy przedstawionego układu pokazano na rys. 5. Tranzystorowy generator pomiarowy pracuje tu w układzie Colpittsa, natomiast generator wzorcowy jest kwarcowym generatorem zbudowanym na linearyzowanych bramkach TTL typu NAND. Na jego wyjściu zastosowano tranzystorowy symetryzator pozwalający uzyskać dwa przebiegi prostokątne o przeciwnych fazach. Przebiegi te są doprowadzone do dwóch wejść odniesienia (wiodących) symetrycznego detektora fazowo-częstotliwościowego. Potencjometr w obwodzie wejścia nieodwracającego fazę wzmacniacza woltomierza pozwala wyzerować miernik w warunkach, gdy w polu cewki nie ma przedmiotów metalowych.

Cewka pomiarowa w badanym układzie miała indukcyjność $180 \mu\text{H}$ (średnicę 300 mm) i umieszczona była w miedzianym ekranie elektrostatycznym. Konstrukcję cewki pomiarowej oraz widok płyty czołowej przyrządu pokazano na fotografii 1.

Pierwsze próby układu były przeprowadzane przy częstotliwościach generatorów równych 52,4 kHz, lecz wyższą czułość uzyskano przy częstotliwościach wyższych (209,7 kHz). Częstotliwość generatorów nie może być zbyt mała ze



Rys. 5. Schemat ideowy przyrządu do wykrywania przedmiotów metalowych z generatorem przestrajającym napięciem i pętlą synchronizacji fazowej

Fig. 5. Idea scheme of the metal - detector with voltage controlled oscillator and phase - locked - loop (PLL)



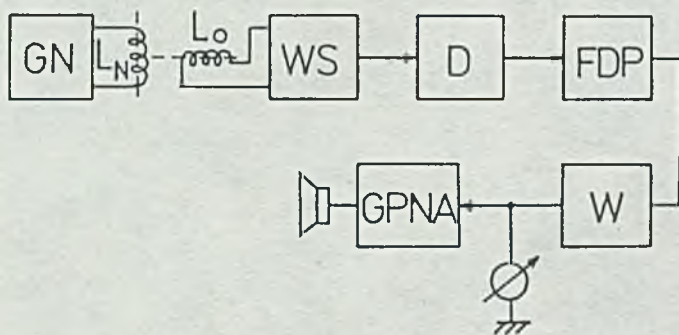
Fot. 1. Widok przyrządu do wykrywania przedmiotów metalowych z pętlą synchronizacji fazowej

Phot. 1. Metal - detector with phase - locked - loop

ze względu na to, że pociąga to za sobą konieczność stosowania cewek o znacznej liczbie zwojów i dużych wymiarach, a więc cewek o małej dobroci i sporym ciężarze. Ograniczenie częstotliwości od góry na poziomie kilku MHz wynika z ograniczonej głębokości wnikania fali elektromagnetycznej do ośrodka, w którym poszukuje się przedmiotów metalowych.

Analiza uzyskanych wyników oraz badania generatora z cewką pomiarową przeprowadzone za pomocą częstotliciomierza cyfrowego pozwoliły stwierdzić, że ograniczenie czułości przyrządu wynika z ograniczonego zasięgu pola wytwarzanego przez cewkę. W celu zwiększenia czułości układu o tej strukturze należy stosować cewkę pomiarową w obwodzie generatora mocy. Pociąga to za sobą konieczność starannego ekranowania podukładów oraz konieczność stosowania baterii zasilających o znacznej pojemności. Spełnienie tych wymagań prowadzi do zwiększenia gabarytów i ciężaru przyrządu, który powinien być urządzeniem przenośnym.

Kolejną przebadaną strukturą przyrządu do wykrywania przedmiotów metalowych był układ typu "nadajnik - odbiornik" [5] (rys. 6), w którym wykorzystuje się zjawisko polegające na tym, że zmienne pole elektromagnetyczne emit-



Rys. 6. Schemat blokowy przyrządu typu "nadajnik - odbiornik" do wykrywania przedmiotów metalowych

GN - generator nadajnika, L_N - cewka nadawcza, L_O - cewka odbiorcza, WS - wzmacniacz prądu stałego, GPNA - akustyczny generator przestraiany napięciem stałym

Fig. 6. Block diagram of the instrument type "transmitter - receiver" for metal detection

GN - transmitter oscillator, L_N - transmitter coil, L_O - receiver coil, WS - selective amplifier, D - detector, FDP - low pass filter, W - direct current amplifier, GPNA - low frequency voltage controlled oscillator

wane przez cewkę nadajnika wzbudza prądy wirowe w przedmiocie metalowym, znajdujący się w polu działania tej cewki, a prądy te wytwarzają własne pole zniekształcające pole pierwotne cewki. Kierunkowe cewki ramowe lub ferrytowe nadajnika i odbiornika są ustawione swymi płaszczyznami prostopadle do siebie i w pewnej wzajemnej odległości tak, aby przy braku metalu w polu działania cewek, cewka odbiorcza nie odbierała sygnału nadajnika. Widok cewek ramowych przyrządu oraz sam przyrząd pokazano na fotografii 2.

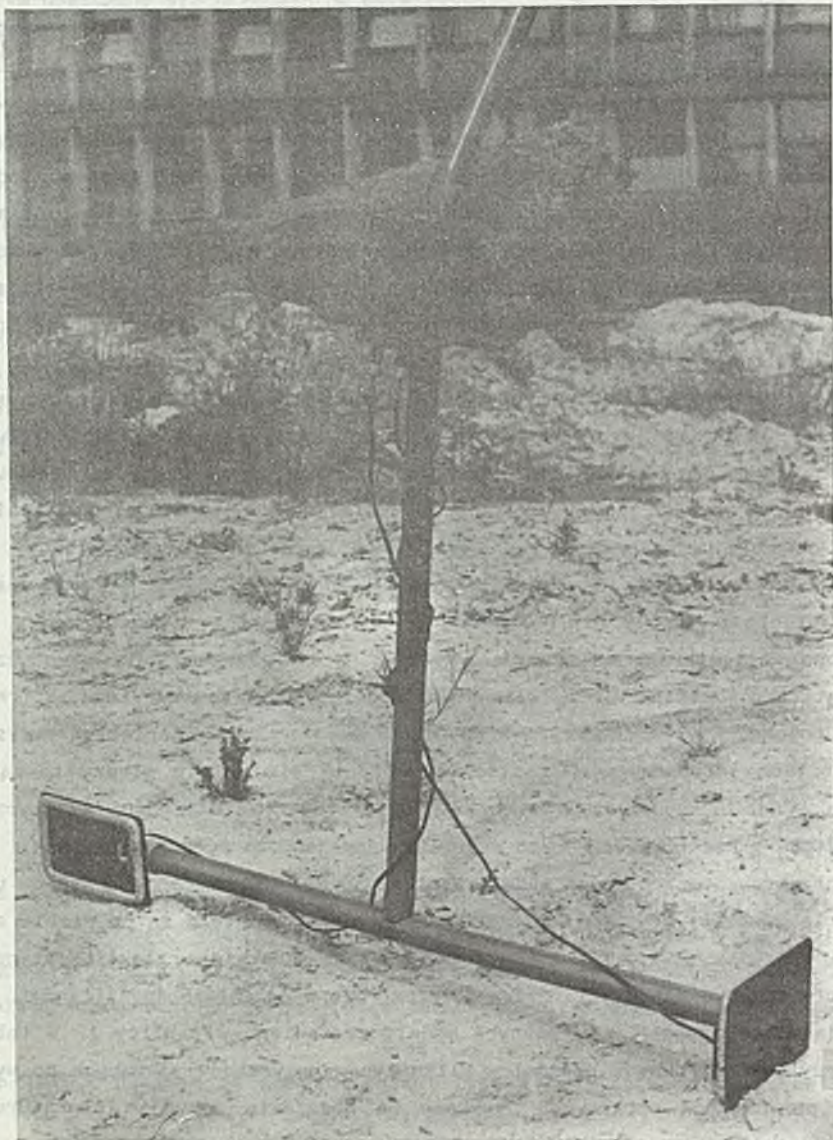
Zniekształcenie pola cewki nadawczej, wywołane przez prądy wirowe wzbudzone w poszukiwanym przedmiocie metalowym, powoduje pojawienie się sygnału w cewce odbiorczej. Sygnał ten wzmacniony we wzmacniaczu selektywnym, poddany detekcji i filtracji oraz ponownie wzmacniony we wzmacniaczu prądu stałego może być zmierzony woltomierzem napięcia stałego. Sygnał może być wykorzystywany także do zmiany częstotliwości generatora akustycznego przestrajanego napięciem, jeżeli wymagana jest akustyczna sygnalizacja pojawienia się przedmiotu metalowego w polu oddziaływania cewki nadawczej i odbiorczej.

Schemat ideowy układu typu "nadajnik - odbiornik" przedstawiono na rys. 7. Generator nadajnika jest generatorem Meissnera, pracującym na częstotliwości 97 kHz; jego cewka kolektorowa jest jednocześnie cewką nadawczą. Cewka odbiorcza jest umieszczona w obwodzie wejściowym trójstopniowego wzmacniacza selektywnego, na którego wyjściu znajduje się detektor tranzystorowy oraz filtr dolnoprzepustowy RC. Jednostopniowy wzmacniacz napięcia stałego dostarcza napięcia o wartości proporcjonalnej do odebranego sygnału, które jest mierzone woltomierzem oraz jest wykorzystane do przestrajania akustycznego generatora z mostkiem Wiena. Elementami regulacyjnymi mostka Wiena są tranzystory polowe, których kanały wykorzystano jako regulowane napięciem rezystory w gałęziach impedancyjnych mostka. Pojawienie się metalu między cewką nadawczą i odbiorczą wywołuje więc również zmianę częstotliwości akustycznego generatora z mostkiem Wiena, co sygnalizowane jest za pomocą słuchawek.

Z przeprowadzonych badań modelu wynika, że największą czułość układu uzyskuje się wówczas, gdy cewki nadawcza i odbiorcza oddalone są od siebie o ok. 60 cm. Ponadto cewki powinny być umieszczone w ekranie elektrostatycznym, żeby przypadkowe dotknięcie cewką do ziemi nie uruchamiało sygnalizacji.

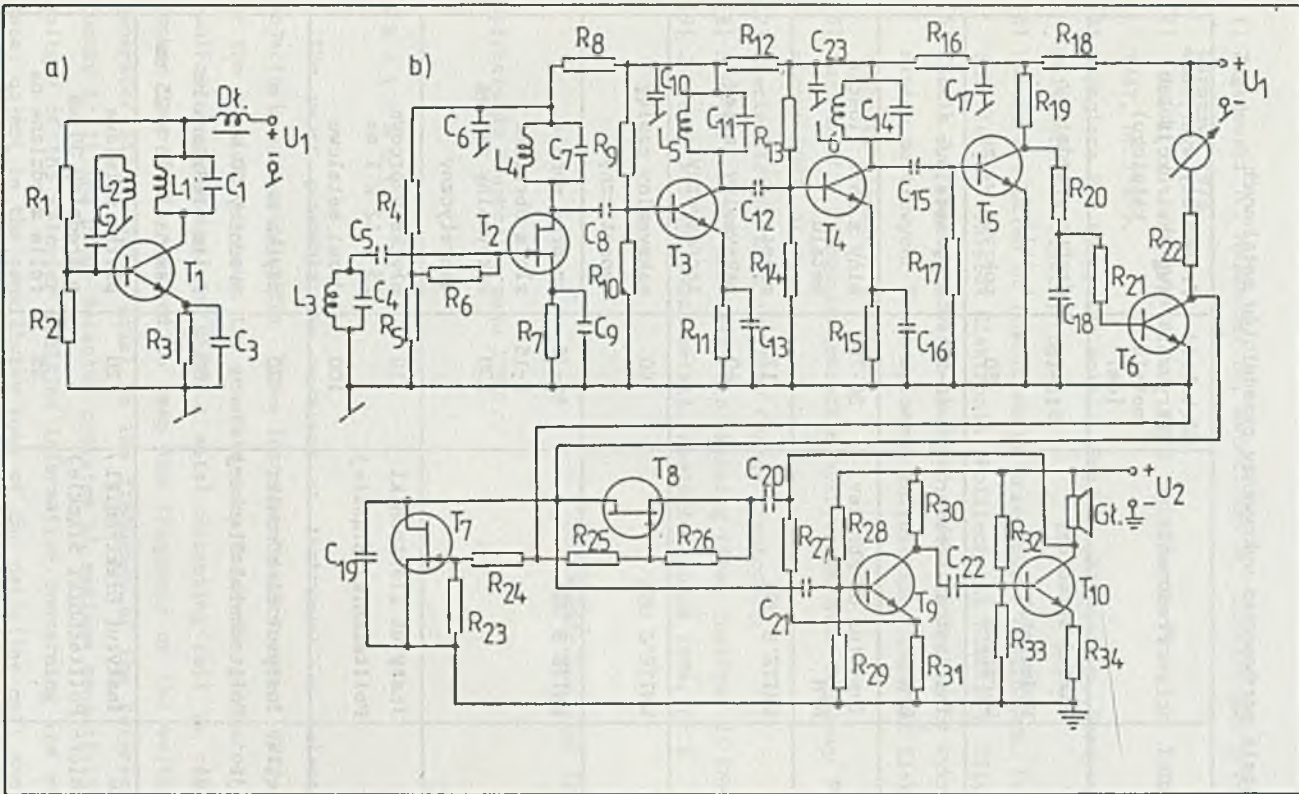
Osiągnięte parametry wykonanych modeli zestawiono w tabelicy 1. W tabelicy tej przytoczono również parametry kilku typów przyrządów służących do wykrywania przedmiotów metalowych uzyskane na podstawie pozycji literaturowych [6], [7] i [8].

Opisane w pracy modele zostały opracowane w Zakładzie Podstaw Elektroniki Instytutu Elektroniki między innymi w ramach prowadzonych prac dyplomowych i projektowych prac przejściowych.



Fot. 2. Widok przyrządu typu "nadajnik - odbiornik"

Phot. 2. Metal - detector type "transmitter - receiver"



Rys. 7. Schemat ideowy przyrządu typu "nadajnik - odbiornik
 a) nadajnik, b) odbiornik

Rys. 7. Idea scheme of the instrument type "transmitter - receiver"
 a) transmitter, b) receiver

Tablica 1

Tabela porównawcza wykrywaczy przedmiotów metalowych

Typ przyrządu	Producent	Głębokość wykrywania metalu [cm]	Przedmioty wykrywane (wg instrukcji lub katalogu)
LIS 2	Zakład Wytwórczy Wodomierzy, Warszawa	10-15	drobne przedmioty metalowe
		50	pokrywa włazu
Metex 4.100	Institut dr Förster RFN	40-70	miny metalowe
Metex 4.125	Institut dr Förster RFN	30-70	miny z małą ilością metalu
AF 101	WHITE'S USA	12	moneta
		60	maksymalny zasięg teoretyczny
BEACHCOMBER 60 VLF	WHITE'S USA	80	maksymalny zasięg teoretyczny
EAGLE II	WHITE'S USA	68-75	srebrna moneta
		8-15	złota obrączka
		230	maksymalny zasięg teoretyczny
Przyrząd wg [3]	Instytut Elektroniki Politechniki Śląskiej	10	plytka wzorcowa 25 x 12 x 1 mm
		100	drzwi metalowe
Przyrząd z pętlą synchronizacji fazowej wg [4]	Instytut Elektroniki Politechniki Śląskiej	30	plytka metalowa o średnicy 30 mm
		100	folia miedziana na laminacie 25 x 25 cm
Przyrząd typu "nadajnik-odbiornik" wg [5]	Instytut Elektroniki Politechniki Śląskiej	20	plytka metalowa o średnicy 30 mm
		85	folia miedziana na laminacie 23 x 12 cm

LITERATURA

- [1] Zagajewski T., Malzacher S., Kwieciński A.: Elektronika przemysłowa, WNT, Warszawa 1975.
- [2] Kosacki J.: Wykrywacz min typu polskiego. Przegląd Telekomunikacyjny 1947, nr 7-8-9.
- [3] Szynglera P.: Wykrywacz metali. Projekt przejściowy. Instytut Elektroniki Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [4] Kałuża R.: Układ do poszukiwania przedmiotów metalowych. Praca dyplomowa inżynierska. Instytut Elektroniki Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [5] Kusnik Z.: Zaprojektować i zbudować model urządzenia do wykrywania przedmiotów metalowych. Praca dyplomowa inżynierska. Instytut Elektroniki Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [6] Garstka J.: Zachodniemieckie wykrywacze min. Wojskowy Przegląd Techniczny 1987, nr 7.
- [7] Electronic'90: Katalog firmy Conrad Electronic.
- [8] FÖRSTER - Prüf- und Mesgeräte. Katalog firmy Institut dr Förster.
- [9] Janeczek A.: Wykrywacz metali. Radioelektronik 1986, nr 6.

Recenzent: Doc. mgr inż. Adam STRYK

Wpłynęło do Redakcji w maju 1990 r.

A b s t r a c t

The paper presents two versions of instrument for detection of metal objects in non-metal media. These instruments make use of eddy currents. One of the versions includes two generators: a reference generator and a voltage controlled generator, to which a metal detecting coil is connected. Phase locked loop (PLL) is used to keep the frequency of the voltage controlled generator at the value equal to the frequency of the reference generator. Thanks to it the phase detector operates at maximum sensitivity. The output voltage of the detector contains information concerning the existence of a metal object in the sensitivity zone of the detecting coil and this voltage is also used to bias a varicap which changes the frequency of the voltage controlled generator.

The second version is a "transmitter-receiver" type detector. Transmitting and receiving coils are placed in such a way that they are not coupled if there is no metal between them. Eddy currents induced in a metal object influence the field of the transmitting coil and it results in generating a signal at the output of the receiver.

The bloc and schematic diagrams of the described metal detectors as well as the results which have been obtained are also included in the paper. These detectors have been designed, assembled and tested, partly by students preparing for their diploma exams, at the Basic Electronics Department of the Institute of Electronics of the Technical University of Silesia.