

Janusz GUZIK
Brunon SZADKOWSKI

Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej
Politechniki Śląskiej

SONDA DO POMIARÓW GRUBOŚCI PRZEPOŃ AZBESTOWYCH W ELEKTROLIZATORACH PRZEMYSŁOWYCH

Streszczenie W pracy przedstawiono konstrukcję przetwornika (sondy) do pomiaru grubości azbestowej warstwy osadzonej na metalowym podłożu, opartą na wiroprądowej zasadzie pomiaru. Uwzględniono specyficzne warunki pomiaru, w jakich metoda wiroprądowa nie była dotychczas stosowana. Dotyczy to głównie niejednorodności podłoża wykonanego jako metalowa siatka. Dla wykonanego modelu przetwornika zbadano wpływ rodzaju (Al, Fe) i parametrów siatki (oczko 2-4 mm) na zmiany impedancji cewki przetwornika. Wyniki obliczeń z odpowiednimi danymi doświadczalnymi. Przedstawiono wnioski praktyczne dotyczące warunków i zakresu stosowania opracowanej sondy. Wskazano zalecenia związane z wyborem najkorzystniejszego układu pomiarowego współpracującego z sondą.

1. Wstęp

Pomiary grubości przepon azbestowych w elektrolizerach przemysłowych służyć mogą zarówno do oceny stopnia zużycia przepon podczas eksploatacji, jak również do kontroli procesu technologicznego nakładania warstw azbestu przy produkcji elektrod stosowanych w elektrolizerach.

Zastosowanie znanych przyrządów pomiarowych do wymienionych celów nie jest bezpośrednio możliwe. Znane rozwiązania odnoszą się do sytuacji, w której mierzona warstwa nieprzewodząca nałożona jest na jednorodnym, metalowym podłożu. W przypadku elektrolizerów - warstwa azbestu (przepona) nałożona jest na niejednorodne podłoże, jakim jest metalowa siatka.

Celem opracowania jest opis konstrukcji przetwornika (sondy pomiarowej) nadającego się do pomiarów grubości przepon azbestowych 1-5 mm na metalowej siatce, przy czym dodatkowym utrudnieniem jest ograniczony dostęp do badanego obiektu zainstalowanego w elektrolizerze. Sonda pomiarowa musi być wprowadzona do szczelin między siatkami elektrolizera pokrytymi azbestem (odstęp ok. 45 mm) na głębokości w granicach 50 - 800 mm.

Grubości nieprzewodzących warstw na podłożach metalowych można mierzyć różnymi metodami stosując przetworniki pojemnościowe lub indukcyjne [3,5,6].

Użycie drugiej grupy przetworników pozwala uniknąć zakłócającego wpływu całego układu sprzężeń pojemnościowych pomiędzy poszczególnymi siatkami elektrolizera.

Możliwości zastosowania przetworników bazujących na wykorzystaniu zmian reluktancji obwodu magnetycznego w układzie rdzeń - przepona - siatka, jak wykazały badania wstępne, są również ograniczone. Wynika to głównie z powodu ich niedostatecznej szczelności [5,6].

W dalszym ciągu podjęto próbę zastosowania przetworników działających na zasadzie prądów wirowych. Pomiar grubości odbywa się wówczas poprzez pomiar impedancji cewki przetwornika.

2. Podstawy teoretyczne

Zależność zmian impedancji cewki przetwornika wiroprądowego od jej odległości od podłoża metalowego jest złożona i wymaga każdorazowo podania szczegółowych założeń dotyczących warunków pomiaru. W literaturze [1,2,4,7,8,9,10] podane zależności obowiązują dla podłoża przewodzącego, którym jest izotropowa elektrycznie i magnetycznie płyta. Wówczas bezwzględne przyrosty części rzeczywistej ΔR i urojonej ΔX impedancji cewki przetwornika $\Delta Z = \Delta R + j \Delta X$ wyrażają się zależnościami [4]:

$$\Delta R(d) = \frac{\mu_0 \mu_{wr} r \omega z^2}{d \sqrt{2 \omega \mu_0 \mu_{wp} \gamma}} \quad (1)$$

$$\Delta X(d) = \frac{\mu_0 \mu_{wr} r \omega z^2}{d 2 \mu_0 \mu_{wp} \omega \gamma} - \mu_0 \mu_{wr} \omega r z^2 \left(\ln \frac{4r}{d} - 2 \right)$$

gdzie: z - liczba zwojów cewki przetwornika,

r - promień cewki przetwornika,

d - odległość cewka-płyta (grubość przepony),

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni,

μ_{wr} - przenikalność magnetyczna rdzenia cewki przetwornika,

μ_{wp} - przenikalność magnetyczna płyty,

γ - konduktywność płyty,

ω - pulsacja prądu zasilającego cewkę przetwornika,

przy czym reaktancja X cewki przetwornika umieszczonej w dużej odległości ($d = \infty$) od metalowego podłoża (płyty) opisana jest równaniem:

$$X = \mu_0 \mu_{wr} r \omega z^2 \left[\left(\ln \frac{8r}{\pi \phi} \right) - 2 \right] \quad (2)$$

gdzie: r_ϕ - promień przekroju drutu użytego do nawinięcia cewki.

Dobierając wartość pulsacji ω , odpowiednie zmiany impedancji ΔZ cewki przetwornika mogą być praktycznie tylko zmianami składowej urojonej ΔX . W tym celu wystarczy spełnić warunek: $\Delta R (d_0) \ll X$, z którego wyznaczamy wymaganą wartość pulsacji:

$$\omega \gg \frac{1}{2 d_0^2 \mu_0 \mu_{wp} \gamma [\ln (8 r/r_\phi) - 2]^2} \quad (3)$$

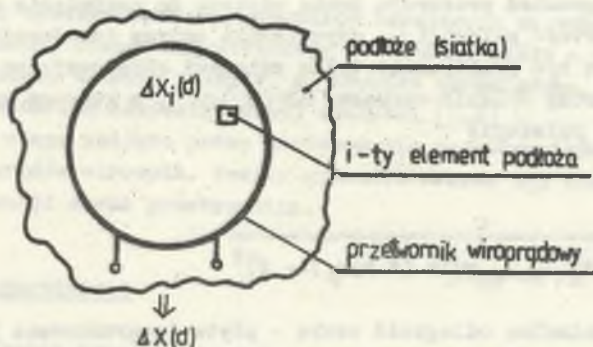
gdzie: d_0 - minimalna odległość cewka - płyta (uwarunkowana konstrukcją przetwornika).

Przyjmując następnie, że reaktancja cewki umieszczonej bezpośrednio na płycie jest równa $X + \Delta X (d_0)$, można charakterystykę przetwarzania przetwornika $F(d)$ zapisać w postaci unormowanej zależności:

$$F(d) = \frac{\Delta X (d + d_0) - \Delta X (d_0)}{X + \Delta X (d_0)} = \frac{(d + d_0)^{-1} - (d_0)^{-1} + \sqrt{2\omega \mu_0 \mu_{wp} \gamma} \ln \left(\frac{d + d_0}{d_0} \right)}{(d_0)^{-1} + 2\omega \mu_0 \mu_{wp} \gamma \ln (2 d_0/r_\phi)} \quad (4)$$

Zależności (1) i (4) są wprawdzie słuszne tylko dla przypadku, gdy podłoże stanowi metalowa płyta, jednak mogą być podstawą do dalszej analizy uwzględniającej niejednorodności podłoża typu siatka. Odpowiednią analizę można sprowadzić do analizy oddziaływania podłoża złożonego z i -tych elementów stanowiących powtarzalny fragment siatki (rys.1). Fragment taki przedstawiono na rys.2, gdzie przez S oznaczono jego powierzchnię całkowitą, a przez S_0 - powierzchnię oczka siatki. Przy pomijalnie małej głębokości wnikania prądów wirowych do podłoża (np. przy 1000 Hz około 0,1 mm) można przyjąć, że rozpatrywane podłoże jest tworem płaskim. Całkowity przyrost reaktancji cewki przetwornika $\Delta X(d)$ jest sumą przyrostów reaktancji $\Delta X_1(d)$ spowodowanych oddziaływaniem i -tych elementów podłoża.

Oddziaływanie podłoża w przypadku "siatki" jest słabsze niż w przypadku "płyty". W rozpatrywanym i -tym elemencie podłoża (rys.2) - osłabienie oddziaływania jest proporcjonalne do stosunku powierzchni $(S - S_0)/S$.



Rys. 1. Przetwornik wiroprowadzący sprzężony z podłożem typu siatka
 Fig. 1. Eddy-current transducer coupled with netlike base

Elementarna zmiana składowej urojonej $\Delta X_1(d)$ spowodowana niejednorodnością podłoża jest wtedy równa (por. równ. (1)):

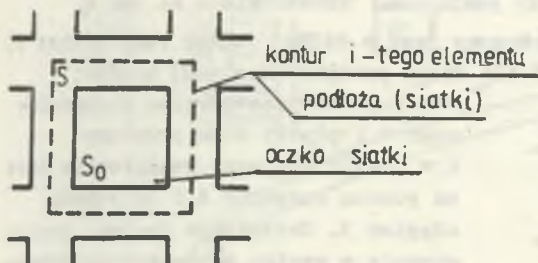
$$\Delta X_1(d) = \frac{S - S_0}{S} \cdot \frac{\mu_0 \mu_{WR} \omega r \cdot z^2}{d \cdot 2\omega \mu_0 \mu_{WP} \gamma} - \mu_0 \mu_{WR} r \omega z^2 [\ln(4r/d) - 2] \quad (5)$$

przy czym współczynnik proporcjonalnością $(S - S_0) / S$ dotyczy tylko pierwszego członu zależności (1), gdyż drugi człon nie zależy od parametrów podłoża (μ_{WP}, γ). Stąd unormowana charakterystyka przetwarzania $F(d)$ uwzględniająca niejednorodność podłoża jest określona zależnością:

$$F(d) = \frac{\sum_{i=1}^N [\Delta X_1(d + d_0) - \Delta X_1(d_0)]}{X + \sum_{i=1}^N \Delta X_1(d_0)} = \frac{\Delta X_1(d + d_0) - \Delta X_1(d_0)}{X/N + \Delta X_1(d_0)} =$$

$$= \frac{[(S - S_0)/S] \cdot [(d + d_0)^{-1} - (d_0)^{-1}] + \sqrt{2\omega \mu_0 \mu_{WR} \gamma} \ln[(d + d_0)/d_0]}{[(S - S_0)/S] (d_0)^{-1} + \sqrt{2\omega \mu_0 \mu_{WR} \gamma} \left\{ \ln \left[\frac{(d_0/4r)(8r/r_\phi)}{2} \right] + 2 - \frac{2}{N} \right\}} \quad (6)$$

gdzie N oznacza liczbę i -tych elementów podłoża umieszczonych pod sewką przetwornika.

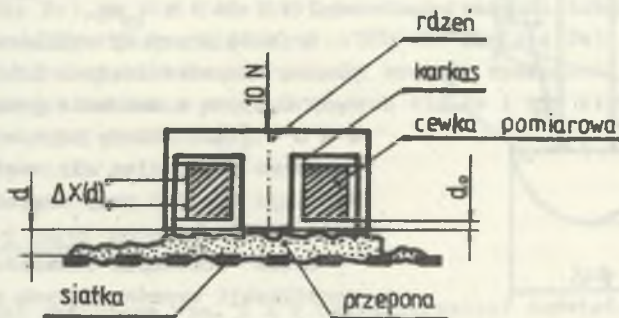


Rys.2. I-ty element podłoża użyty do obliczeń

Fig.2. I-base element used for calculation

3. Konstrukcja sondy pomiarowej

W badaniach wykorzystano cewkę przetwornika wiroprowadowego o następujących danych: ilość zwojów $z = 44 \times \text{DNE } 0,3 \text{ mm}$, rdzeń O40 typu P1101 (POLFER). Cewka powinna być dociskana do podłoża ze stałą siłą 10 N (rys.3).



Rys.3. Konstrukcja cewki przetwornika wiroprowadowego

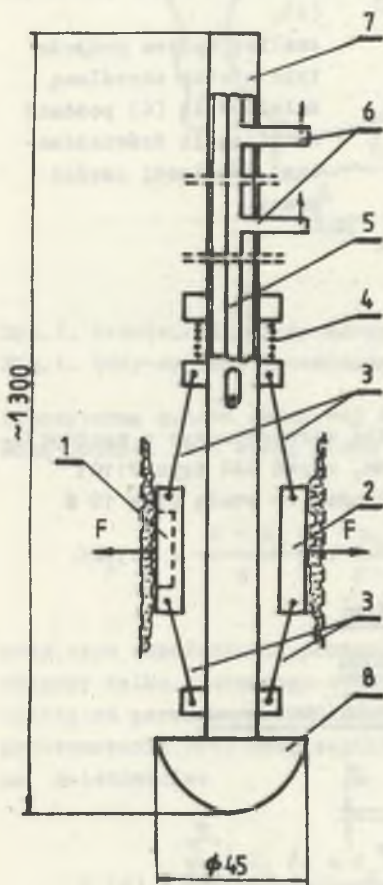
Fig.3. Design of eddy-current transducer coil

Ze względu na budowę elektrolosera i ograniczone możliwości dostępu do jego poszczególnych elektrod, konstrukcja mechaniczna sondy pomiarowej musi uwzględniać możliwość dokonywania pomiaru grubości przepony w wąskiej i głębokiej szczelinie, jaką jest kieszeń elektrolizera, w ściśle określonych punktach i na zadanej głębokości.

Mechaniczną konstrukcję sondy pomiarowej przedstawiono na rys.4.

Przetwornik wiroprądowy 1 umieszczony jest w dolnej części rury nośnej 7, stanowiącej jednocześnie uchwyt dla osoby przeprowadzającej pomiar.

Docięnięcie przetwornika wiroprądowego 1 i płytki 2 do przepony (w chwili pomiaru) realizowane jest za pomocą sprężyny 4 i sztywnych cięgien 3. Zwolnienie docisku następuje w wyniku przesunięcia uchwytów 6 ku górze, przez co następuje ściśnięcie sprężyny 4. Zwolnienie docisku umożliwia manewr sondą pomiarową w kieszeni elektrolizera.



Rys.4. Mechaniczna konstrukcja sondy pomiarowej do pomiaru grubości przepon w elektrolizerach (1-przetwornik wiroprądowy 2-płytki dociskująca, 3-cięgna, 4-sprężyna, 5-pręt, 6-uchwyty, 7-rura nośna, 8-głowica ochraniająca

Fig.4. Mechanical design of measuring probe for diaphragm thickness measurement in electrolyzers (1-eddy-current transducer, 2-pressure plate, 3-strings, 4-spring, 5-bar, 6-hand grips, 7-connecting pipe, 8-protector head)

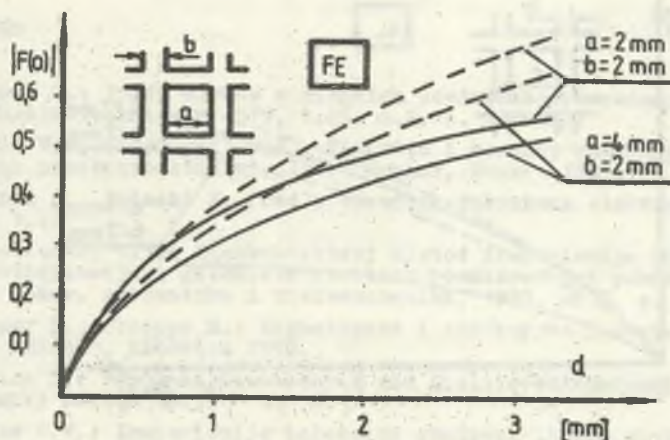
4. Wyniki badań

W badaniach cewkę przetwornika wiroprądowego (podanego na rys.3) umieszczano na siatkach wykonanych z drutu (Fe, Al) o grubości $b = 2$ mm, o kwadratowych oczkach o wymiarach od 2×2 do 4×4 mm.

Grubość przepony symulowano za pomocą nieprzewodzących folii wzorcowych $0,33$ mm w zakresie grubości $d = 0 - 3$ mm. Zmiany impedancji wyznaczono posługując się mostkiem RLC typu E - 314 przy częstotliwości 1000 Hz.

Celem dokonania doświadczalnej weryfikacji wyprowadzonych zależności przedstawiono charakterystyki zmian impedancji w postaci unormowanej $|P(d)|$ względem wartości impedancji cewki przetwornika dla $d=0$ (brak przepony).

Wyniki badań przedstawiono na rys. 5 i 6. Linią przerywaną zaznaczono charakterystyki obliczone na podstawie zależności (6), natomiast linia ciągłą przedstawiono charakterystyki doświadczalne.



Rys.5. Unormowane charakterystyki przetwarzania przetwornika wiropładowego dla podłoża z siatki Fe (linią przerywaną oznaczono charakterystyki obliczone z równania (6); a i b - wymiary siatki

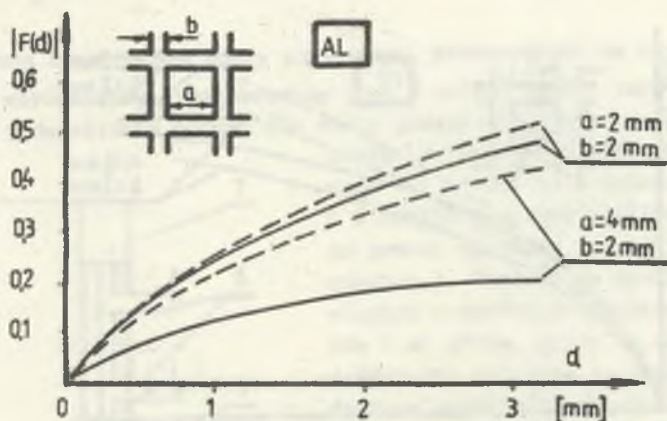
Fig.5. Plot of the normalised conversion characteristics of eddy-current transducer for Fe-type netlike base (the broken line denotes characteristics calculated from eqn.(6)); a and b-dimensions of the net

Dla danych $\gamma_{Al} = 38,2 \times 10^6 \text{ S/m}$, $\gamma_{Fe} = 10,3 \times 10^6 \text{ S/m}$, $d_0 = 1 \text{ mm}$, $r_\phi = 0,15 \text{ mm}$, $\mu_{wp} \approx 250$ (dla Fe), $\mu_{wp} \approx 1$ (dla Al) sprawdzono warunki doboru pulsacji (równ.(3)): $\omega/2\pi \gg 128 \text{ Hz}$ (dla Al) i $\omega/2\pi \gg 477 \text{ Hz}$ (dla Fe). Przy częstotliwości pomiarowej 1000 Hz oba warunki zostały spełnione. Również obliczono głębokości wnikania prądów wirowych dla Fe i Al, które są odpowiednio równe 0,15 i 0,19 mm [3].

5. Wnioski i uwagi końcowe

Porównując podane na rys. 5 i 6 charakterystyki doświadczalne z charakterystykami otrzymanymi z obliczeń można stwierdzić, że są one zbliżone pod względem jakościowym, natomiast pod względem ilościowym - występują pewne różnice. Przyczyną tych różnic są głównie niezgodności pomiędzy danymi przyjętymi do obliczeń a ich wartościami rzeczywistymi, wynikające m.in. z niespełnienia założeń izotropowości materiałów podłoża.

Otrzymane wyniki wskazują, że czułość rzeczywistego przetwornika jest na ogół mniejsza niż czułość przewidywana z obliczeń. Można to uwzględnić przy projektowaniu przetwornika lub przewidzieć odpowiednie obwody wzmacniające. W realizacjach praktycznych - należy również przewidzieć obwody linearyzujące [2,6].



Rys.6 Unormowane charakterystyki przetwarzania przetwornika wiroprowadowego dla podłoża z siatki Al (linią przerywaną oznaczono charakterystyki obliczone z równania (6)); a i b - wymiary siatki

Fig.6 Plot of the normalized conversion characteristics of eddy-current transducer for Al-type netlike base (the broken line denotes characteristics calculated from eqn.(6)); and b - dimensions of the net

Zakres zmian składowej urojonej impedancji cewki przetwornika wiroprowadowego w funkcji odległości od podłoża typu siatka ulega zmniejszeniu w miarę wzrostu siatki (parametr a - por. rys.5 i 6) niezależnie od rodzaju materiału (Fe, Al), z którego wykonana jest siatka.

Wzrost częstotliwości pomiarowej umożliwia uniezależnienie się od niejednorodności podłoża, gdyż pomiar obejmuje wówczas tylko warstwę przypowierzchniową. Z tego też względu, jak również na możliwość zwiększenia czułości przetwarzania należy stosować częstotliwość pomiarową większą niż 1000 Hz. Celem uniezależnienia wskazań układu pomiarowego od typu podłoża (paramagnetyk/ferromagnetyk) sprężonego z cewką przetwornika należy stosować układy detekcji fazoczułej. Spośród wielu możliwych do zastosowania metod pomiarowych [2,6] najkorzystniejsze są metody oparte na przetwarzaniu $\Delta X(d)/f$, umożliwiające realizację odczytu cyfrowego, a także współpracę z systemem mikroprocesorowym.

Opisana sonda (wraz z obwodami przetwarzania sygnału wyjściowego) została zastosowana do kontroli elektrolizerów w Zakładach Chemicznych "ZAMECH" w Bydgoszczy.

LITERATURA

- [1] Adamiak K.: Prądy wirowe w cienkich powłokach przewodzących, Rozprawy Elektrotechniczne 1979, t.25, z.2, s. 339-347.
- [2] Diakin W.W., Sandowskiy W.A.: Teorija i rasczot nakładnych wихretokowych preobrazowatelej, Izd. "Nauka", Moskwa 1981.
- [3] Domanus J., Podoski R. (red): Poradnik inżyniera elektryka, Warszawa 1954 t.4.
- [4] Grabowieckij I.I.: Bieżący kontaktowy metod izmierienija udielnogo soprotiwlieniija i gjeometriczeskich rozmiarow pri pomoszczi wихrewnych tokow, Automatika i Tielemechanika, 1959, nr 7, s. 946-954.
- [5] Heptner H., Stroppe H.: Magnetyczne i indykcyjne badania metali, Wyd. "Śląsk", Katowice 1972.
- [6] Hofmann D.: Handbuch Messtechnik und Qualitätssicherung. VEB Verlag Technik, Berlin 1979.
- [7] Klujew W.W.: Izmierienije toższcziny stalnych listow metodom wихrewnych tokow, Izmieritel'naja Tiejchnika, 1970, nr 11, s.33-35.
- [8] Łurie C.I.: Rasczot wихrewnych tokow w tonkoj płastinke dla opredieleniija dobawocznych potier w transformatorach i reaktorach, Elektrizestwo, 1968, nr 6, s. 80-82.
- [9] Romanowski K., Poltz J., Tarasiewicz E.: Metoda analizy prądów wirowych w ekranach o dowolnych kształtach, Materiały VI SPETO, Gliwice-Ustroń, 13-16 kwietnia 1983, s. 350-361.
- [10] Wąsowicz S.: Cewka z walcem przewodzącym w szczelinie obwodu magnetycznego, Materiały VI SPETO, Gliwice-Ustroń, 13-16 kwietnia 1983, s. 297-312.

Recenzent: doc. dr hab.inż. Zygmunt Kuśmierk

Wpłynęło do Redakcji 28 grudnia 1988 r.

ЗОНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТОЛЩИНЫ АЗБЕСТОВЫХ ДИАФРАГМ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРАХ

Р а з з м е

В работе представлена конструкция преобразователя (зонда) для измерения толщины асбестовой диафрагмы осажденной на металлической основе, использующего вихретоковый метод измерений. Учтены специфические условия измерений, в которых вихретоковый метод не был ещё использован. Главным образом это касается неоднородности основания изготовленного в виде металлической сетки. Для построенной модели преобразователя изучено влияние (Al, Fe) и параметров сетки (ячейка 2-4 мм) на изменение импеданса катушки преобразователя. Результаты расчётов сопоставлено с соответствующими экспериментальными данными. Представлены практические выводы, касающиеся условий и диапазона применений разработанного зонда. Указаны рекомендации относительно подбора оптимальной измерительной системы, взаимодействующей с зондом.

A PROBE FOR ASBESTOS DIAPHRAGM THICKNESS MEASUREMENT IN INDUSTRIAL ELECTROLYSERS

S u m m a r y

In the paper the desing of a converter (probe) for asbestos diaphragm thickness measurement fixed at metallic base, founded on eddy-current measurement principle, is described.

The specific character of the measurement conditions in which the eddy-current measurement method had not benn applied yet has been taken into account.

It mainly refers to heterogeneity of the base made as a metal net.

For the executed transducer model the influence of the type (Al,Fe) and parameters of the net (mesh of 2-4 mm) on the impedance changes of the transducer coil has been examined.

The calculation results have been compared with relevant experimental data.

Some practical conclusions relating to the conditions and field of application of the described probe have been presented.

Recommendations connected with selection of the most advantageous measuring circuit to co-operate with the probe have been indicated.