ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ Seria: ELEKTRONIKA z. 3

1994 Nr kol.1254

Zdzisław FILUS Instytut Elektroniki Politechniki Śląskiej

WYKORZYSTANIE PRĄDÓW WIROWYCH W TECHNICE ULTRADŹWIĘKOWEJ

Streszczenie. Praca stanowi krótki przegląd wyników badań nad elektromagnetyczno-akustyczną metodą wytwarzania i odbioru podłużnych i poprzecznych fal ultradźwiękowych, prowadzonych w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Omówiono również niektóre konstrukcje wykonanych przetworników i współpracujących z nimi układów elektronicznych wraz z krótkim przedstawieniem osiąganych przy ich użyciu wyników.

The application of eddy currents to ultrasonic techniques

Summary. The paper presents a brief summary of research into the electromagneto-acoustic (EMA) method of generation and reception of ultrasonic longitudinal and transverse waves, which has been carried out in the Institute of Electronics of the Silesian Technical University of Gliwice. Design of some transducers together with necessary electronic circuits as well as a short presentation of the achieved results are also included.

Über die anwendung von wirbelströmen in der ultraschalitechnik

Zusammenfassung. Im Aufsatz wurde die zusammenfassende Übersicht von Forschungsergebnissen im Bereich Erzeugung und Empfang von Ultraschallängs- und Ultraschallquerwellen vorgestellt, die im Institut für Elektronik an der Schlesischen Technischen Hochschule in Gleiwitz geführt werden. Der Verfasser beschreibt die ausgewählten Umformerbeispiele und die dazu gehörende Elektronik und stellt einen kurzen Überblick der erreichten Ergebnisse vor.

1.WPROWADZENIE

W latach siedemdziesiątych w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej prowadzone były prace badawczo-naukowe związane z opracowaniem układów do przetwarzania wyników badań nieniszczących oraz automatycznej klasyfikacji i oceny wadliwości wyrobów hutniczych. Doświadczenia nabyte podczas realizacji tych prac oraz nawiązane kontakty, zwłaszcza z Zakładem Badań Nieniszczących Instytutu Metalurgii Żelaza w Gliwicach, skłoniły kierującego tymi pracami Profesora Stanisława Malzachera do zainicjowania prac, mających na celu wykorzystanie prądów wirowych do bezstykowego wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych. Jednocześnie podjęte zostały prace nad wykorzystaniem prądów wirowych do pomiaru konduktywności metali poprzez pomiar impedancji cewki zbliżanej do powierzchni badanego ośrodka. Fale ultradźwiękowe o małej energii są szeroko wykorzystywane w mających duże znaczenie w przemyśle badaniach nieniszczących materiałów oraz w ultradźwiękowej technice pomiarowej. Do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych w tych zastosowaniach powszechnie stosowane są przetworniki piezoelektryczne, które cechują się dużą sprawnością przetwarzania i dobrymi własnościami kierunkowymi; wymagają one jednak stosowania ciekłego ośrodka sprzęgającego głowicę ultradźwiękową z badanym materiałem. Wymóg ten stwarza duże problemy techniczne, zwłaszcza podczas badania wyrobów na nowoczesnych automatycznych liniach technologicznych, na których badanie odbywa się z dużą szybkością, wyrobów o wysokiej temperaturze oraz obiektów znajdujących się poza zakładem produkcyjnym (rurociągi, zbiorniki, tory kolejowe).

Znanych jest kilka metod bezstykowego wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych, w których nie jest wymagany żaden ośrodek materialny sprzegający przetwornik ultradźwiękowy (głowice) z badanym materiałem; sprzężenie jest w nich realizowane za pośrednictwem pola elektromagnetycznego. Do najbardziej znanych metod bezstykowych należa metody: elektromagnetyczno-akustyczna (EMA), laserowa i pojemnościowa. W metodzie elektromagnetyczno--akustycznej wytwarzanie i odbiór fal ultradźwiękowych odbywa się na zasadzie wzajemnego oddziaływania zmiennego i stałego pola magnetycznego w powierzchniowej warstwie badanego materiału. W metodzie laserowej fale ultradźwiękowe generowane są dzięki naprężeniom powstającym na powierzchni badanego materiału po jej lokalnym ogrzaniu wiązką światła laserowego. Metoda ta zapewnia bardzo dużą skuteczność wytwarzania fal ultradźwiękowych i możliwość umieszczenia przetwornika nadawczego (lasera) w znacznej odległości (np. kilka metrów) od badanego wyrobu, jednak pełne wykorzystanie jej zalet jest utrudnione, gdyż zastosowanie komplementarnej - optycznej - metody odbioru fal ultradźwiękowych wiaże się z koniecznością użycia bardzo kosztownych i skomplikowanych rozwiązań technicznych (interferometry). Metoda pojemnościowa, w której drgania powierzchni ośrodka powodują zmianę pojemności kondensatora utworzonego przez tę powierzchnię i zbliżoną do niej elektrodę przetwornika, cechuje się granicznie małą skutecznością przetwarzania, w związku z czym znajduje ona zastosowanie wyłącznie w ultradźwiękowych pomiarowych przetwornikach odbiorczych.

Przetworniki elektromagnetyczno-akustyczne po uzupełnieniu ich dodatkowymi układami elektronicznymi w najpełniejszym stopniu umożliwiają wykorzystanie aparatury i metod tradycyjnie stosowanych w badaniach ultradźwiękowych, stanowiąc alternatywne w stosunku do przetworników piezoelektrycznych źródła lub odbiorniki fal ultradźwiękowych w tych zastosowaniach, w których użycie tych ostatnich jest utrudnione. Z tych właśnie powodów przetworniki EMA stały się przedmiotem prac prowadzonych w Instytucie Elektroniki, a niniejsze opracowanie stanowi skrótowe przedstawienie niektórych ich wyników.

nieniszczących oraz nutorastycznej ktaryfikacji i oceny wadiiwotci wyrobów hutalczych. Doświadczenia žabyte podczna tealizacji tych przo rozz rawiązane koniakty, zwiasetza z Zskładem Badań Nieniszczących Instytutu Metalurgji Żelaza w Gilwicsch, skłonily kternjączgo tyru praczani Profesora Stanisława Mażachera do zalnicjowania prze, trających na celu wykorzyntunie prądów wirowych do bezstykuwego wyrowazania i odbiora fal utradźwiękowych. Jadaócześnie podęte zostały pracz nad wykorzynaniem prądów wirowych do pomiaru konduktywności nactali poprzez pomiar impedancji cewici zbliżanej do powierzchni batanego ofrodka.

2. ZASADA DZIAŁANIA PRZETWORNIKÓW EMA

Podstawowymi elementami przetworników ultradźwiękowych pracujących na bazie metody EMA są:

- źródło stałego pola magnetycznego (magnes trwały lub elektromagnes),
- cewka nadawcza,
- cewka odbiorcza.

Źródło stałego pola magnetycznego służy do wytworzenia w powierzchniowej warstwie badanego metalu silnego pola magnetycznego (1 - 2 T) o kierunku równoległym lub prostopadłym do powierzchni metalu. Od kierunku linii sił pola magnetycznego w stosunku do powierzchni metalu w zasadniczym stopniu zależy rodzaj (np. podłużne, poprzeczne) oraz polaryzacja wytwarzanych fal ultradźwiękowych.

Płaska cewka nadawcza, zbliżona do powierzchni metalu, zasilana jest prądem wielkiej częstotliwości (zazwyczaj kilka MHz) w kształcie impulsu obejmującego kilka okresów przebiegu lub impulsu o obwiedni wykładniczej i o wartości szczytowej sięgającej kilkudziesięciu lub kilkuset amperów. Prądy wirowe indukowane na powierzchni metalu oddziałują ze stałym polem magnetycznym (siła Lorentza w metalach nieferromagnetycznych), wprawiając tę powierzchnię w drgania, które rozchodzą się w metalu w postaci fal ultradźwiękowych.

Podczas odbioru fal ultradźwiękowych drgania przewodzącej powierzchni metalu w stałym polu magnetycznym powodują przepływ po tej powierzchni prądów wirowych. Efektem działania tych prądów jest indukowanie w płaskiej cewce odbiorczej, zbliżonej do powierzchni metalu, siły elektromotorycznej, odzwierciedlającej przebieg czasowy drgań ultradźwiękowych dochodzących do powierzchni granicznej ośrodka. Rolę cewki odbiorczej może również spełniać cewka nadawcza, chociaż na ogół wymogi odnośnie do parametrów cewek nadawczej i odbiorczej są odmienne.

Na rys.1 pokazano podstawowe kształty cewek stosowanych w przetwornikach EMA.



Rys. 1. Podstawowe kształty cewek stosowanych w przetwornikach EMA: a) płaska spiralna cewka, b) cewka w kształcie płaskiej ramki, c) cewka typu "zygzag" Fig. 1. Basic shapes of coils used in EMA transducers: a) flat spiral coil, b) flat elongated spiral coil, c) meander line coil Płaska spiralna cewka jest wykorzystywana przede wszystkim w przetwornikach na fale podłużne, rozchodzące się prostopadle do powierzchni badanego metalu. Może być również wykorzystywana do wytwarzania radialnie spolaryzowanych fal poprzecznych, jednak w tym przypadku kierunek maksymalnego promieniowania przetwornika odchylony jest o kilka stopni od normalnej do powierzchni. Cewki w kształcie płaskiej ramki znajdują zastosowanie głównie w przetwornikach na fale poprzeczne, rozchodzące sie prostopadle do powierzchni badanego metalu. Cewki typu "zygzag" stosowane są w przetwornikach na fale podłużne lub poprzeczne, rozchodzące się pod pewnym kątem w stosunku do powierzchni granicznej badanego ośrodka, lub w przetwornikach służących do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych powierzchniowych i płytowych. Skośne w stosunku do normalnej do powierzchni rozchodzenie się podłużnych lub poprzecznych fal ultradźwiękowych uzyskuje się dzięki interferencji fal ultradźwiękowych generowanych przez różne sekcje cewki nadawczej.

Model matematyczny przetwornika EMA jest bardzo złożony. Wyznaczenie rozkładu prądów wirowych indukowanych w powierzchniowej warstwie badanego metalu przez cewkę nadawczą o określonym kształcie wymaga rozwiązania równań Maxwella dla dwóch półprzestrzeni: powietrza, w którym znajduje się cewka nadawcza, oraz metalu. Często zakłada się przy tym, że prądy wirowe ograniczone są wyłącznie do powierzchni metalu, gdyż dla większości

metali głębokość wnikania prądów wirowych nie przekracza na ogół kilkudziesięciu mikrometrów, gdy częstotliwość prądu w cewce nadawczej wynosi kilka MHz, czyli głębokość ta jest znacznie mniejsza od długości fali ultradźwiękowej o takiej samej częstotliwości.

Dla płaskiej spiralnej cewki (rys. 2) o n zwojach, średnicy wewnętrznej $2R_1$ i zewnętrznej $2R_2$, umieszczonej na wysokości h nad powierzchnią przewodzącej półprzestrzeni i zasilanej prądem sinusoidalnie zmiennym o amplitudzie I_m otrzymuje się rozkład gęstości prądów wirowych na powierzchni metalu $j(\rho)$ w postaci [4]:



Rys. 2. Płaska spiralna cewka nad powierzchnią metalu Fig. 2. Flat spiral coil over a metal surface

$$j(\rho) = -\frac{I_m}{R_0} \sum_{k=0}^{n-1} x_k \int_0^\infty J_1(x_k y) J_1 \rho y \, e^{-\alpha y} \, dy$$

gdzie R_0 oznacza średni promień cewki; x_k jest zdefiniowane jako

$$x_k = 1 - \frac{\delta}{2} + k \frac{\delta}{n-1},$$

δ oznacza względną szerokość uzwojenia:

$$b = \frac{R_2 - R_1}{R_0};$$

 ρ jest względną współrzędną walcową: $\rho = r/R_0$; J_1 jest funkcją Bessela pierwszego rzędu pierwszego rodzaju, a α oznacza względną odległość cewki od powierzchni przewodnika: $\alpha = h/R_0$.

Prądy wirowe płynące po powierzchni przewodnika oddziałują ze stałym polem magnetycznym o rozkładzie $B_0(\rho)$. Wynikiem tego oddziaływania jest siła Lorentza o rozkładzie powierzchniowym określonym wyrażeniem:

$$F(\rho) = j(\rho) \times B_0(\rho)$$

Wyznaczony w ten sposób rozkład sił działających na powierzchni przewodzącego ośrodka stanowi wymuszenie w równaniu falowym, opisującym rozchodzenie się fał sprężystych w ośrodku materialnym. Rozwiązanie tego równania określa rozkład pola akustycznego wytwarzanego w przewodzącym prąd ośrodku przez przetwornik nadawczy EMA.

Należy zaznaczyć, że mechanizm wiroprądowy (siła Lorentza) odgrywa zasadniczą rolę podczas wytwarzania fal ultradźwiękowych metodą EMA w metalach nieferromagnetycznych. W metalach ferromagnetycznych pojawiają się dodatkowe siły wynikające z własności magnetycznych ośrodka (magnetostrykcja, namagnesowanie ośrodka itp.), które ze względu na swój nieliniowy charakter jeszcze bardziej komplikują opis matematyczny przetwornika nadawczego.

Punktem wyjścia do stworzenia modelu matematycznego przetwornika odbiorczego jest rozkład drgań na powierzchni granicznej ośrodka poddanej działaniu stałego pola magnetycznego; drgania te powstają po dojściu do tej powierzchni fali ultradźwiękowej wytworzonej uprzednio przez przetwornik nadawczy EMA i odbitej od innych powierzchni granicznych lub wad wewnętrznych. Prądy wirowe, indukowane podczas drgań przewodzącej powierzchni w stałym polu magnetycznym, stanowią podstawę do wyznaczenia - za pomocą równań Maxwella - rozkładu pola elektryczego w przestrzeni nad przewodnikiem, w której znajduje się cewka odbiorcza. Scałkowanie natężenia tego pola elektrycznego wzdłuż konturu cewki odbiorczej daje ostatecznie wyrażenie, które określa napięcie na zaciskach cewki podczas odbioru fal ultradźwiękowych metodą EMA.

Szersze omówienie zagadnień związanych z modelem matematycznym przetwornika EMA przedstawione jest w pracach [1,4]. Dokładne rozwiązania tego modelu mogą być przedstawione tylko w postaci całkowej i ich analiza możliwa jest przede wszystkim przy wykorzystaniu metod numerycznych; z literatury światowej znane są jednak próby przybliżonego rozwiązania równań opisujących model przetwornika EMA [1,4]. W stosunkowo prosty sposób można przedstawić przybliżoną charakterystykę kierunkową przetwornika nadawczego złożonego z płaskiej spiralnej cewki (rys. 1a) o szerokości uzwojenia znacznie mniejszej od promienia cewki. W pracy [4] wykazano, że dla celów praktycznych charakterystykę tę dostatecznie dokładnie opisuje wyrażenie:

$$Q(\theta) = J_0(k_L R_0 \sin \theta)$$

gdzie J_0 jest funkcją Bessela zerowego rzędu, k_L oznacza liczbę falową fali ultradźwiękowej, a Θ jest kątem pomiędzy rozpatrywanym kierunkiem promieniowania w ośrodku i kierunkiem maksymalnego promieniowania (prostopadłym w tym przypadku do powierzchni ośrodka).

Ze względu na znaczną złożoność modelu matematycznego przetwornika EMA analizę i badania jego własności przeprowadzono przede wszystkim na drodze eksperymentalnej. Szczegółowe omówienie tych badań przedstawiono w pracach [1, 2, 3, 4, 5], gdzie zamieszczono również obszerny przegląd literatury światowej na ten temat.

3. PODSTAWOWE WŁASNOŚCI PRZETWORNIKÓW EMA

W celu zbadania podstawowych własności przetworników EMA wykonano szereg modeli laboratoryjnych przetworników nadawczych, odbiorczych i nadawczo-odbiorczych na fale podłużne i poprzeczne [1, 2, 4]. Uproszczoną konstrukcję tych przetworników przedstawia rys. 3. Do wytwarzania w badanych próbkach stałego pola magnetycznego o indukcji 1 - 1.5 T wykorzystywano zarówno elektromagnesy, jak i magnesy trwałe. Niektóre przetworniki były wyposażone w wymienne cewki nadawcze lub odbiorcze o różnych wymiarach geometrycznych i o różnej liczbie zwojów.



Rys. 3. Konstrukcja przetworników EMA na fale podłużne (a) i poprzeczne (b) Fig. 3. Design of EMA transducer for longitudinal (a) and transverse (b) waves

Przeprowadzone badania potwierdzają wynikającą z modelu matematycznego liniową zależność amplitudy wytwarzanej fali ultradźwiękowej od indukcji stałego pola magnetycznego oraz od amplitudy prądu płynącego przez cewkę nadawczą, a także liniową zależność sygnału odbieranego przez cewkę odbiorczą od indukcji stałego pola magnetycznego. Zarówno amplituda wytwarzanej fali ultradźwiękowej, jak i sygnał elektryczny na zaciskach cewki odbiorczej są o kilkadziesiąt decybeli niższe niż w przypadku przetworników piezoelektrycznych, a odstęp napięciowy sygnału od szumu dla zrealizowanych przetworników zawiera się w granicach 40 - 60 dB. Wyniki takie uzyskano zasilając cewki nadawcze przetworników EMA impulsami napięcia o wartości szczytowej sięgającej 1.5 - 2 kV, czyli znacznie wyższej od stosowanej w przypadku przetworników piezoelektrycznych.

Oprócz bardzo małej skuteczności przetworników EMA ich niekorzystną cechą jest również silna zależność amplitudy sygnału od odległości przetwornika od powierzchni badanego metalu. Współczynnik określający tę zależność zawiera się w granicach od kilku do kilkunastu dB/mm i zależy przede wszystkim od wymiarów geometrycznych cewki oraz konstrukcji obwodu magnetycznego przetwornika; nie zależy natomiast w istotnym stopniu od rodzaju badanego metalu i częstotliwości fali ultradźwiękowej, przynajmniej w zakresie 1 - 10 MHz. Zjawisko to w połączeniu z małą skutecznością przetworników EMA powoduje, że w praktyce odległość przetwornika od powierzchni badanego wyrobu nie powinna przekraczać kilku dziesiątych mm, a jedynie w skrajnych warunkach (wysoka temperatura wyrobu, badanie z dużą szybkością wyrobów o nierównej powierzchni) przyjmuje się ją na poziomie 1 - 2 mm.

Zagadnienie wpływu geometrii przetwornika na zależność amplitudy odbieranego sygnału od odległości przetwornika od powierzchni metalu analizowane było w wielu publikacjach, których przegląd zawarto w pracach [1, 4]. Przybliżone rozwiązanie równań opisujących model nadawczo-odbiorczego przetwornika EMA prowadzi do wniosku, że zależność ta ma charakter wykładniczy:

$$U_{odb} \sim \exp\left(-\beta \frac{h}{R}\right)$$

gdzie U_{odb} oznacza amplitudę odbieranego sygnału, R - promień cewki przetwornika, h jest odległością przetwornika od powierzchni badanego wyrobu, a β jest stałym współczynnikiem.

Podawane w literaturze wartości współczynnika β dla przetworników nadawczych lub odbiorczych zawierają się w granicach 1.5 - 6; natomiast podczas badań przetworników odbiorczych przeprowadzonych w ramach pracy [4] uzyskano wartość β wynoszącą w przybliżeniu 2 (współczynnik ten nie uwzględnia zmiany amplitudy sygnału wywołanej zmianą indukcji stałego pola magnetycznego, którą należy określać indywidualnie dla konkretnego rozwiązania obwodu magnetycznego przetwornika).

Przeprowadzone badania wykazały również, że istnieje możliwość - przynajmniej dla przetworników odbiorczych EMA - zmniejszenia wpływu odległości przetwornika od powierz-

chni próbki na amplitudę odbieranego sygnału poprzez odpowiedni dobór pojemności kondensatora dołączonego do cewki odbiorczej [6]. Przykładowe zależności dla jednego ze zbadanych przetworników pokazano na rys. 4 (C_0 oznacza pojemność kondensatora dostrajającego cewkę odbiorczą do częstotliwości odbieranej fali ultradźwiękowej, gdy przetwornik jest znacznie oddalony od badanego metalu, tzn. gdy cewka odbiorcza nie jest tłumiona przez ten metal).

Zmiana odległości przetwornika nadawczego EMA od powierzchni badanego metalu powoduje pewne zmiany częstotliwości wytwarzanej fali ultradźwiękowej (gdy impuls nadawczy jest wytwarzany na drodze rozładowania kondensatora





 $C = 0,7C_0, 3 - C = C_0, 4 - C = 1,4C_0, 5 - C = 2,1C_0$ Fig. 4. Relative amplitude of the signal received by an EMA transducer as a function of the transducer-to-sample separation h for various tuning capacitors: $1 - C = 0,2 - C = 0,7C_0, 3 - C = C_0,$ $4 - C = 1,4C_0, 5 - C = 2,1C_0$ przez cewkę) oraz długości impulsu; szczegółowe omówienie tych zjawisk zawarto w pracach [1,4].

4. UKŁADY ELEKTRONICZNE WSPÓŁPRACUJĄCE Z PRZETWORNIKAMI EMA

Jedną z zalet przetworników EMA jest możliwość współpracy z konwencjonalnymi defektoskopami ultradźwiękowymi - po uzupełnieniu ich pewnymi dodatkowymi układami - oraz możliwość wykorzystania podobnych jak w przypadku głowic piezoelektrycznych metod badania.

Przetworniki nadawcze EMA pobudzane są podobnie jak przetworniki piezoelektryczne; naładowany do wysokiego napięcia kondensator zostaje załączony poprzez klucz elektroniczny na cewkę nadawczą przetwornika, w wyniku czego rozładowuje się przez nią w postaci drgań gasnących. Mała skuteczność przetworników EMA oraz mała impedancja cewki nadawczej wymagają jednak ładowania kondensatora do znacznie wyższego napięcia (co najmniej 1.5 -2 kV) niż w przypadku przetworników piezoelektrycznych oraz stosowania kluczy elektronicznych o dużym szczytowym prądzie dopuszczalnym.

W ramach prac prowadzonych w Instytucie Elektroniki wykonano szereg nadajników współpracujących z przetwornikami nadawczymi EMA. W pierwszych rozwiązaniach do wytworzenia wysokiego napięcia wykorzystywano konwencjonalne zasilacze sieciowe z transformatorem podwyższającym, ewentualnie uzupełnione powielaczami [1]. Rozwiązanie takie cechuje się jednak znacznymi rozmiarami i stosunkowo małą dopuszczalną częstotliwością

powtarzania impulsów. W dalszej kolejności wykonano klasyczny stabilizowany zasilacz impulsowy zasilany bezpośrednio wyprostowanym napięciem sieciowym [8]. Zasilacz ten zapewniał zadowalającą stabilizację wysokiego napięcia oraz możliwość pracy ze stosunkowo dużą częstotliwością powtarzania impulsów nadawczych, jednak został on ostatecznie odrzucony, gdyż generował zakłócenia impulsowe objawiające się na ekranie defektoskopu w postaci "fałszywych" ech. W rezultacie za optymalny układ nadajnika dla przetworników EMA przyjęto zmodyfikowany układ dwutaktowej przetwornicy impulsowej [7]. Uproszczony schemat zrealizowanego układu przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Uproszczony schemat nadajnika EMA z impulsową przetwornicą dwutaktową Fig. 5. Simplified circuit diagram of an EMA transmitter with a switch-mode flyback converter

Wykorzystanie prądów wirowych ...

W odróżnieniu od konwencjonalnej przetwornicy dwutaktowej układ ten pracuje ze znacznie mniejszą częstotliwością, równą częstotliwości powtarzania impulsów nadawczych (kilkadziesiąt - kilkaset Hz). Wszelkie procesy przełączania związane z wytworzeniem wysokiego napięcia na kondensatorze C odbywają się przed załączeniem klucza tyrystorowego, za pośrednictwem którego kondensator rozładowuje się przez cewkę nadawczą przetwornika L. W ten sposób wyeliminowane zostały wszelkie zakłócenia impulsowe, przenikające do obwodu odbiorczego przetwornika podczas odbioru fal ultradźwiękowych. Nadajnik zasilany jest ze źródła napięcia stałego o wartości 12 - 24 V, co czyni go szczególnie przydatnym do wykorzystania w przenośnej aparaturze do badań ultradźwiękowych.

W charakterze klucza elektronicznego o dużym napięciu dopuszczalnym w stanie blokowania i dużym prądzie w stanie włączenia we wszystkich zrealizowanych układach nadajników wykorzystano szeregowo połączone tyrystory o dużej szybkości przełączania typu BTP 129.

Impulsy odbierane przez część odbiorczą przetwornika EMA podawane były na wejście toru odbiorczego konwencjonalnego defektoskopu ultradźwiękowego za pośrednictwem dodatkowego przedwzmacniacza. Wzmacniacze te były realizowane jako klasyczne wzmacniacze wielkiej częstotliwości z dodatkowym układem ograniczającym na wejściu, zabezpieczającym układ wzmacniacza przed zniszczeniem przez pojawiający się na jego wejściu impuls nadawczy. Najlepsze rezultaty uzyskano stosując proste ograniczniki diodowe równoległe. W celu zwiększenia odstępu napięciowego sygnału od szumu w niektórych rozwiązaniach wzmacniaczy stosowano dodatkowo filtry selektywne, zawężające pasmo toru odbiorczego do ok. 1 MHz [2,4].

5. KONSTRUKCJE PRZETWORNIKÓW EMA I ICH ZASTOSOWANIE

Jednym z wyników badań prowadzonych w ramach prac [1,2,4] było skonstruowanie małogabarytowego przetwornika nadawczo-odbiorczego podłużnych fal ultradźwiękowych, opartego na konstrukcji pokazanej na rys. 3a i o wymiarach $\phi 60 \ge 60 \text{ mm}$ (średnica×wysokość). Do wytwarzania stałego pola magnetycznego wykorzystano magnes trwały odlany ze stopu Alnico 400B. Przetwornik zawiera dwie odrębne cewki: nadawczą i odbiorczą, umieszczone koncentrycznie pomiędzy jego nabiegunnikami. W celu wytwarzania i odbioru podłużnych fal ultradźwiękowych linie sił stałego pola magnetycznego muszą być równoległe do powierzchni badanego metalu; konstrukcja obwodu magnetycznego tego przetwornika zapewnia uzyskanie takiego kierunku linii sił pola magnetycznego w metalach nieferromagnetycznych i do badania takich metali przetwornik ten jest zasadniczo przeznaczony. Widok ogólny przetwornika przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Małogabarytowy przetwornik nadawczo- odbiorczy EMA na fale podłużne Fig. 6. Small-size EMA transmitting/ receiving transducer for longitudinal waves

Na rys. 7 pokazano impulsy odebrane przez ten przetwornik po kolejnych odbiciach wytworzonej przez niego fali ultradźwiękowej (o częstotliwości 2 MHz) od dna aluminiowej próbki o grubości 25 mm. Uzyskane wyniki w pełni potwierdzają możliwość wykorzystania tego przetwornika np. do bezstykowego pomiaru grubości wyrobów wykonanych z metali kolorowych. Główną wadą przetwornika EMA w takim zastosowaniu jest jego stosunkowo duża strefa martwa (kilkanaście mm), wynikająca z silnego przesterowania i zablokowania wzmacniacza odbiorczego impulsem nadawczym. Problem ten można rozwiązać wykorzystując do uruchomienia układu pomiaru przejścia fali ultradźwiękowej przez ośrodek nie impulsu nadawczego, lecz kolejnych impulsów odbitych od dna tego ośrodka. Przetwornik ten może również służyć do wykrywania wad w metalach nieferromagnetycznych. Na rys. 7 pokazano oscylogram impulsów odebranych z próbki aluminiowej o grubości 50 mm, w której wykonano otwór płaskodenny o średnicy 4 mm, którego dno znajduje się w odległości 45 mm od powierzchni, do której przyłożony jest przetwornik.



Rys. 7. Impulsy odebrane przez przetwornik EMA z aluminiowej próbki o grubości 25 mm (zakres obserwacji: 0 - 250 mm) Fig. 7. Pulses received by the EMA transducer from a 25 mm thick aluminium sample (Range: 0 - 250 mm)

Rys. 8. Impulsy odebrane przez przetwornik EMA z aluminiowej próbki, w której wykonano płaskodenny otwór o średnicy 4 mm (zakres obserwacji: 0 - 100 mm) Fig. 8. Pulses received by the EMA transducer from an aluminium sample with a flat bottom hole of 4 mm diameter (Range: 0 - 100 mm)

W celu sprawdzenia, czy połączenie nadajnika impulsów z przetwornikiem za pośrednictwem kabla koncentrycznego o długości rzędu 1 m nie wpływa na obniżenie skuteczności wytwarzania fali ultradźwiękowej, wykonano również wersję tego przetwornika, w której ładowany do wysokiego napięcia kondensator oraz układ klucza elektronicznego umieszczono wewnątrz obudowy przetwornika (w specjalnej nasadce) [8]. Nie stwierdzono jednak istotnej poprawy własności przetwornika o takim rozwiązaniu.

Przetworniki EMA mogą spełniać rolę pomiarowych przetworników odbiorczych fal ultradźwiękowych, np. podczas badania charakterystyk kierunkowych nadawczych głowic ultradźwiękowych. Na rys. 9 pokazano odbiorczy przetwornik EMA zintegrowany ze wzmacniaczem odbiorczym [1, 4]. W przetworniku tym czynna strefa odbioru została ograniczona do



Rys. 9. Odbiorczy przetwornik EMA do badania charakterystyk kierunkowych nadawczych głowic • ultradźwiękowych Fig. 9. EMA receiving transducer for measuring directivity patterns of ultrasonic transmitting probes

Rys. 10. Stanowisko pomiarowe do badania charakterystyk kierunkowych głowic ultradźwiękowych Fig. 10. Stand for measuring directivity patterns of ultrasonic probes

około 2 mm² poprzez osłonięcie cewki odbiorczej ekranem z wykonanym w nim małym otworem.

Przetwornik ten współpracuje ze stanowiskiem pomiarowym do badania charakterystyk kierunkowych [1, 4], pokazanym na rys. 10. Uzupełnieniem tego zestawu pomiarowego jest układ cyfrowego pomiaru amplitudy impulsów odbieranych przez przetwornik EMA [10]. Zaletą pomiaru charakterystyk kierunkowych głowic ultradźwiękowych przy użyciu metody EMA jest możliwość wyznaczenia charakterystyki kierunkowej badanej głowicy bezpośrednio w interesującym nas materiale (tradycyjnie pomiary te prowadzone są w wodzie lub oleju) oraz możliwość badania głowic na fale poprzeczne (które nie rozchodzą się w cieczach).

Do badania metali ferromagnetycznych stosowane są przede wszystkim nadawczo-odbiorcze przetworniki EMA na fale poprzeczne o konstrukcji pokazanej na rys. 3b. Rys. 11 przedstawia wykonany w ramach pracy [2] przetwornik przeznaczony do badania szyn kolejowych. Przetwornik ten wytwarza fale poprzeczne rozchodzące się prostopadle do powierzchni badanego metalu. Stałe pole magnetyczne w badanym materiale wytwarzane jest za pomocą elektromagnesu. W warunkach laboratoryjnych przetwornik ten wykrywa otwór przelotowy o średnicy 2 mm wykonany w połowie wysokości szyny. Badania przeprowadzone w warunkach przemysłowych wykazały zmniejszenie zdolności przetwornika do wykrywania wad - głównie wskutek zakłóceń elektromagnetycznych, indukowanych w jego cewce odbiorczej.



Rys. 11. Nadawczo-odbiorczy przetwornik EMA na fale poprzeczne Fig. 11. EMA transmitting/receiving transducer for transverse waves

Przetworniki EMA mogą służyć nie tylko do wykrywania wad wewnętrznych w metalach, ale także do oceny ich wielkości. Na rys. 12 pokazano wykres OWR (Odległość-Wzmocnienie-Rozmiar) otrzymany dla wyżej wspomnianego przetwornika. Nie odbiega on zasadniczo charakterem od podobnych wykresów uzyskiwanych dla konwencjonalnych głowic piezoelektrycznych.

Przetwornik nadawczo-odbiorczy na fale poprzeczne, lecz o pokazanej na rys. 3a konstrukcji osiowo-symetrycznej, w którym cewka nadawczo-odbiorcza przylega do powierzchni czołowej środkowego nabiegunnika, wykorzystano również w grubościomierzu ultradźwiękowym, wykonanym w ramach pracy [9]. Przyrząd ten pozwala na pomiar grubości wyrobów wykonanych z metali ferromagnetycznych w zakresie od 3 do kilkudziesięciu mm.





6. PODSUMOWANIE

Główną przeszkodą na drodze szerszego upowszechnienia przetworników EMA w badaniach ultradźwiękowych jest ich mała skuteczność. Z dostępnych w literaturze światowej opisów rozwiązań konstrukcyjnych wynika, że czułość badania wystarczającą w warunkach przemysłowych uzyskuje się dopiero przy zasilaniu cewki nadawczej przetworników na fale podłużne lub poprzeczne impulsami napięcia o wartości szczytowej sięgającej 5 kV i więcej; w każdym przypadku jednak opisy te dotyczą pojedynczych konkretnych zastosowań, do których przetworniki EMA zostały indywidualnie zaprojektowane. W przypadku przetworników EMA nie jest zatem na ogół możliwa szeroka uniwersalność zastosowań, charakterystyczna dla głowic ultradźwiękowych. Stanowią one jednak cenną alternatywę dla przetworników piezoelektrycznych w tych zastosowaniach, w których zastosowanie ciekłego ośrodka sprzęgającego jest niemożliwe lub bardzo trudne, czy też powoduje pewne błędy pomiarowe związane z przejściem fali ultradźwiękowej przez warstwę sprzęgającą. Do zastosowań tych należą przede wszystkim:

- badania w wysokiej temperaturze (800 1000°C),
- badania wyrobów o skorodowanej lub zanieczyszczonej powierzchni,
- precyzyjne pomiary prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych w metalach.

Dalszej poprawy własności przetworników EMA, a zwłaszcza odstępu napięciowego sygnału od szumu, należy oczekiwać na drodze wykorzystania cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz nowych materiałów; w szczególności w ostatnich latach stało się możliwe znaczne zmniejszenie rozmiarów tych przetworników dzięki wykorzystaniu silnych magnesów trwałych wykonanych z ziem rzadkich.

LITERATURA

- Praca zbiorowa pod redakcją S. Malzachera: Opracowanie podstaw techniki wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych metodą elektromagnetyczną. Praca węzłowa 02.1/P2-05-00. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1981-1985.
- [2] Praca zbiorowa pod redakcją S. Malzachera: Opracowanie prototypowych głowic elektrodynamicznych do ultradźwiękowego defektoskopowego badania dużych elementów stalowych. Praca CPBR 2.1/A-9-02. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1986-1989.
- [3] Praca zbiorowa pod redakcją S. Malzachera: Metody oceny jakości badanego obiektu na podstawie wieloparametrowej analizy sygnałów w wiroprądowych badaniach nieniszczących. Projekt badawczy KBN Nr 3 1300 91 01. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1991-1993.
- [4] Filus Z.: Wprowadzenie do analizy i syntezy układów do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych metodą zmiennego pola magnetycznego dla celów defektoskopii. Praca doktorska. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1985.
- [5] Filus Z.: S. Malzacher, Non-contact transducer for generation and reception of ultrasonic longitudinal waves. The 11th Triennial World Congress of IMEKO. Houston, USA, 1988.
- [6] Filus Z.: The effect of tuning of bulk wave EMATs on their lift-off. Nondestructive Testing and Evaluation. 1994, Vol. 11, pp.1-8.
- [7] Filus Z.:, An efficient driver for electromagnetic transducers with a switch-mode high voltage supply. Ultrasonics (przyjęty do druku).
- [8] Cholewa A.: Generator mikrosekundowych impulsów mocy do pobudzania bezstykowych głowic nadawczych fal ultradźwiękowych. Praca dyplomowa magisterska. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1985.
- [9] Duda D., Wolny Z.: Ultradźwiękowy przyrząd do bezstykowego pomiaru grubości. Praca dyplomowa magisterska. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1990.
- [10] Słomski P.: Przyrząd do badania charakterystyk kierunkowych głowic ultradźwiękowych. Praca dyplomowa magisterska. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1992.

Wpłynęło do Redakcji w czerwcu 1994 r.

Abstract

The paper presents an overview of research into the electromagneto-acoustic (EMA) method of generation and reception of ultrasonic waves which has been carried out in the Institute of Electronics of the Silesian Technical University of Gliwice. In this method ultrasonic waves are generated and received in a noncontact way by the use of eddy currents induced in the surface layer of conducting media.

The first part of this overview includes general remarks concerning mathematical modelling of electromagneto-acoustic transducers. Then some basic features of this method such as efficiency and its dependance on the transducer-to-sample separation are discussed on the basis of experiments in which various transducers for longitudinal and transverse waves were used. Some electronic circuits necessary for EMA transducers, especially high voltage exciters for EMA transmitters, are introduced in the next part of the paper.

The final part of the article presents some applications of electromagneto-acoustic transducers including a small-size transducer for longitudinal waves (for testing nonferromagnetic metals), a transducer for transverse waves (for testing ferromagnetic metals), a device for noncontact measurement of directivity patterns of ultrasonic probes and a noncontact thickness gauge. The ability to detect and size flaws by the use of EMA transducers is illustrated by some photographs of received signals and by a Distance-Gain-Size diagram.

 [4] Films Z.: Wprowadtania do analyzy i syntesy utiadów do wyrwarzana i odbiotu fat ultratzwiękowych ractodą rationnego pola magnatycznego dla culów defentoskopii, Przez doluonska, instytul Elektronici Politechniki Śl., Gilwice 1925,
[5] Films Z.: S. Malzacher, Non-crenter transducer for generation and reception of ultrateolic longitudinal waves. The 11th Triennial World Congress of IMIEO. Houston, USA, 1988.

and (a) intra-2001 the entrop of the analysis for any monthly a suprementative reservative of a suprementative and a suprementative of the supremetative of the suprementativ

- Badania w w mokiej tamperatura: (800 1000°C);
- Wolwaito do Badalali wyodowa wajędzieja zbał jena wstorodko o wódorali wyodzawa za stara -
- procycyjne prosisty poplicalici i thumienia (a) withedrowinkowych w metafach.