

**ZESZYTY  
NAUKOWE  
POLITECHNIKI  
ŚLĄSKIEJ**

P.4474/97

**ZDZISŁAW FILUS**

**PRZETWORNIKI  
ELEKTROMAGNETYCZNO - AKUSTYCZNE  
TEORIA I ZASTOSOWANIA**

**ELEKTRONIKA**

**z. 8**

**GLIWICE  
1997**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
ZESZYTY NAUKOWE  
Nr 1364



P 4474/97

ZDZISŁAW FILUS

**PRZETWORNIKI  
ELEKTROMAGNETYCZNO - AKUSTYCZNE  
TEORIA I ZASTOSOWANIA**

**OPINIODAWCY**

Prof. dr hab. Sławomir Kończak  
Prof. dr hab. Zdzisław Pawłowski

**KOLEGIUM REDAKCYJNE**

REDAKTOR NACZELNY - Prof. dr hab. inż. Jan Bandrowski  
REDAKTOR DZIAŁU - Doc. dr inż. Zdzisław Pogoda  
SEKRETARZ REDAKCJI - Mgr Elżbieta Leško

**REDAKCJA**

Mgr Roma Łoś

**REDAKCJA TECHNICZNA**

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 1231 - 1596

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej  
ul. Kujawska 3, 44 - 100 Gliwice

Nakł. 110 + 83 Ark. wyd. 13 Ark. druk. 9 Papier offset. kl. III 70 x 100, 80 g  
Oddano do druku 18.06.1997 Podpis. do druku 18.06.1997 Druk ukończ. w lipcu 1997

Fotokopie, druk i oprawę wykonał „ROLEK”, Gliwice, ul. Kazimierza Wielkiego 4

P172/97

SPIS TREŚCI

WSTĘP	1
WYKAZ WYDZIAŁÓW I KATEDR	2
WYKAZ REDAKTORÓW	3
1.1. Wstęp	4
1.2. Wykaz wydziałów i katedr	5
1.3. Wykaz redaktorów	6
2. WYKAZ TYTUŁÓW PRACY WYDARZAJĄCYCH SIĘ W 1997 ROKU	7
2.1. Tytuły	8
2.2. Wykaz tytułów prac	9
2.3. Wykaz autorów	10
2.4. Wykaz recenzentów	11
2.5. Wykaz wydawców	12
2.6. Wykaz tytułów prac	13
2.7. Wykaz autorów	14
2.8. Wykaz recenzentów	15
2.9. Wykaz wydawców	16
2.10. Wykaz tytułów prac	17
2.11. Wykaz autorów	18
2.12. Wykaz recenzentów	19
2.13. Wykaz wydawców	20
2.14. Wykaz tytułów prac	21
2.15. Wykaz autorów	22
2.16. Wykaz recenzentów	23
2.17. Wykaz wydawców	24
2.18. Wykaz tytułów prac	25
2.19. Wykaz autorów	26
2.20. Wykaz recenzentów	27
2.21. Wykaz wydawców	28
2.22. Wykaz tytułów prac	29
2.23. Wykaz autorów	30
2.24. Wykaz recenzentów	31
2.25. Wykaz wydawców	32
2.26. Wykaz tytułów prac	33
2.27. Wykaz autorów	34
2.28. Wykaz recenzentów	35
2.29. Wykaz wydawców	36
2.30. Wykaz tytułów prac	37
2.31. Wykaz autorów	38
2.32. Wykaz recenzentów	39
2.33. Wykaz wydawców	40
2.34. Wykaz tytułów prac	41
2.35. Wykaz autorów	42
2.36. Wykaz recenzentów	43
2.37. Wykaz wydawców	44
2.38. Wykaz tytułów prac	45
2.39. Wykaz autorów	46
2.40. Wykaz recenzentów	47
2.41. Wykaz wydawców	48
2.42. Wykaz tytułów prac	49
2.43. Wykaz autorów	50
2.44. Wykaz recenzentów	51
2.45. Wykaz wydawców	52
2.46. Wykaz tytułów prac	53
2.47. Wykaz autorów	54
2.48. Wykaz recenzentów	55
2.49. Wykaz wydawców	56
2.50. Wykaz tytułów prac	57
2.51. Wykaz autorów	58
2.52. Wykaz recenzentów	59
2.53. Wykaz wydawców	60
2.54. Wykaz tytułów prac	61
2.55. Wykaz autorów	62
2.56. Wykaz recenzentów	63
2.57. Wykaz wydawców	64
2.58. Wykaz tytułów prac	65
2.59. Wykaz autorów	66
2.60. Wykaz recenzentów	67
2.61. Wykaz wydawców	68
2.62. Wykaz tytułów prac	69
2.63. Wykaz autorów	70
2.64. Wykaz recenzentów	71
2.65. Wykaz wydawców	72
2.66. Wykaz tytułów prac	73
2.67. Wykaz autorów	74
2.68. Wykaz recenzentów	75
2.69. Wykaz wydawców	76
2.70. Wykaz tytułów prac	77
2.71. Wykaz autorów	78
2.72. Wykaz recenzentów	79
2.73. Wykaz wydawców	80
2.74. Wykaz tytułów prac	81
2.75. Wykaz autorów	82
2.76. Wykaz recenzentów	83
2.77. Wykaz wydawców	84
2.78. Wykaz tytułów prac	85
2.79. Wykaz autorów	86
2.80. Wykaz recenzentów	87
2.81. Wykaz wydawców	88
2.82. Wykaz tytułów prac	89
2.83. Wykaz autorów	90
2.84. Wykaz recenzentów	91
2.85. Wykaz wydawców	92
2.86. Wykaz tytułów prac	93
2.87. Wykaz autorów	94
2.88. Wykaz recenzentów	95
2.89. Wykaz wydawców	96
2.90. Wykaz tytułów prac	97
2.91. Wykaz autorów	98
2.92. Wykaz recenzentów	99
2.93. Wykaz wydawców	100

Pamięci  
Pana Profesora  
Stanisława Malzachera  
poświęcam

## SPIS TREŚCI

OD AUTORA.....	9
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	11
1 WPROWADZENIE.....	13
1.1 Wstęp.....	13
1.2 Bezstykowe metody wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych.....	16
1.3 Podstawowe konfiguracje przetworników EMA.....	18
2 PODSTAWY TEORETYCZNE PRZETWARZANIA ELEKTROMAGNETYCZNO-AKUSTYCZNEGO.....	22
2.1 Wstęp.....	22
2.2 Wytwarzanie fal ultradźwiękowych za pomocą płaskiej fali elektromagnetycznej.....	23
2.2.1 Mechanizm przetwarzania oparty na wykorzystaniu prądów wirowych.....	23
2.2.2 Inne mechanizmy przetwarzania.....	30
2.3 Odbiór płaskiej fali ultradźwiękowej.....	33
3 MODELE MATEMATYCZNE I WŁASNOŚCI PRZETWORNIKÓW EMA.....	39
3.1 Wprowadzenie.....	39
3.2 Prostoliniowy przewód.....	41
3.3 Pojedynczy kołowy zwój.....	44
3.4 Spiralna cewka.....	47
3.4.1 Uwagi ogólne.....	47
3.4.2 Fale podłużne.....	48
3.4.3 Fale poprzeczne.....	50
3.4.4 Zjawisko unoszenia.....	52
3.5 Uzwojenia złożone z równoległych prostoliniowych sekcji.....	55
3.5.1 Taśma.....	55
3.5.2 Ramka.....	58
3.5.3 Szereg równoległych taśm.....	63
3.5.4 Przetworniki na fale poprzeczne o polaryzacji SH.....	67
3.5.5 Podsumowanie własności przetworników na fale ultradźwiękowe rozchodzące się skośnie do powierzchni materiału.....	70
3.6 Różne aspekty przetwarzania.....	72
3.7 Podsumowanie.....	74

4	ELEMENTY PRZETWORNIKÓW I WSPÓŁPRACUJĄCE Z NIMI UKŁADY ELEKTRONICZNE.....	76
4.1	Cewki nadawcze i odbiorcze.....	76
4.2	Obwód magnetyczny przetwornika.....	80
4.3	Nadajniki impulsów.....	83
4.4	Wzmacniacze odbiorcze.....	88
4.5	Kompensacja zjawiska unoszenia.....	89
5	ZASTOSOWANIA PRZETWORNIKÓW EMA.....	94
5.1	Pomiary grubości.....	94
5.2	Badanie wyrobów o wysokiej temperaturze.....	99
5.3	Transport kolejowy.....	102
5.4	Badanie połączeń spawanych.....	105
5.5	Pomiary naprężeń.....	107
5.6	Badanie głowic ultradźwiękowych.....	108
6	PRZEGLĄD PRAC WŁASNYCH AUTORA.....	110
7	PERSPEKTYWY ROZWOJU PRZETWORNIKÓW EMA.....	120
7.1	Wykorzystanie laserów do wytwarzania fal ultradźwiękowych.....	120
8	PODSUMOWANIE.....	124
8.1	Uwagi końcowe.....	124
8.2	Zakończenie.....	125
	LITERATURA.....	128
	STRESZCZENIE.....	140

## CONTENTS

ACKNOWLEDGMENTS.....	9
LIST OF SYMBOLS.....	11
1 INTRODUCTION.....	13
1.1 General.....	13
1.2 Noncontact methods of the generation and reception of ultrasonic waves.....	16
1.3 Basic configurations of EMA transducers.....	18
2 THEORETICAL PRINCIPLES OF ELECTROMAGNETO-ACOUSTIC TRANSDUCTION.....	22
2.1 Introduction.....	22
2.2 Generation of ultrasonic waves by a plane electromagnetic wave.....	23
2.2.1 Eddy current mechanism.....	23
2.2.2 Other mechanisms of transduction.....	30
2.3 Reception of a plane ultrasonic wave.....	33
3 MATHEMATICAL MODELS AND PROPERTIES OF EMA TRANSDUCERS.....	39
3.1 Introduction.....	39
3.2 Straight wire.....	41
3.3 Single circular coil.....	44
3.4 Spiral coil.....	47
3.4.1 General.....	47
3.4.2 Longitudinal waves.....	48
3.4.3 Transverse waves.....	50
3.4.4 Lift-off effect.....	52
3.5 Windings made of parallel straight sections.....	55
3.5.1 Strip.....	55
3.5.2 Frame.....	58
3.5.3 Series of parallel strips.....	63
3.5.4 SH-wave transducers.....	67
3.5.5 Summary of properties of angle transducers.....	70
3.6 Various aspects of transduction.....	72
3.7 Summary.....	74
4 COMPONENTS OF TRANSDUCERS AND ASSOCIATED ELECTRONIC SYSTEMS.....	76
4.1 Transmitter and receiver coils.....	76
4.2 Magnetic circuit of the transducer.....	80
4.3 Pulse transmitters.....	83

4.4	Receiver amplifiers.....	88
4.5	Lift-off compensation.....	89
5	APPLICATION OF EMA TRANSDUCERS.....	94
5.1	Thickness measurement.....	94
5.2	Testing of objects at a high temperature.....	99
5.3	Railway transport.....	102
5.4	Testing of welds.....	105
5.5	Stress measurement.....	107
5.6	Testing of ultrasonic probes.....	108
6	OVERVIEW OF AUTHOR'S OWN WORK.....	110
7	PROSPECTIVE DEVELOPMENT OF EMA TRANSDUCERS.....	120
7.1	Application of lasers to the generation of ultrasonic waves.....	120
8	SUMMARY.....	124
8.1	Final remarks.....	124
8.2	Summary.....	125
	BIBLIOGRAPHY.....	128
	ABSTRACT.....	142

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- 1. ...
- 2. ...
- 3. ...
- 4. ...
- 5. ...
- 6. ...
- 7. ...
- 8. ...
- 9. ...
- 10. ...

## OD AUTORA

Niniejsza monografia jest wynikiem studiów literaturowych i prac badawczych nad przetwornikami przeznaczonymi do bezstykowego wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych metodą elektromagnetyczno-akustyczną, prowadzonych przez autora od początku lat osiemdziesiątych w ramach programów badawczych 02.1/P2-05-00, CPBR 2.1/A-9-02 i projektu badawczego KBN Nr 3 1300 91 01.

Do podjęcia prac nad tą tematyką autora zainspirował nieżyjący już Profesor Stanisław Malzacher, którego jednym z głównych zainteresowań od początku jego działalności naukowej było wykorzystanie układów elektronicznych w nieniszczących badaniach materiałów. Profesor żywo interesował się postęпами autora w opracowywaniu tej monografii, często służąc mu cennymi radami. Ciężka choroba nie pozwoliła jednak Profesorowi doczekać ukończenia tej pracy, do powstania której przyczynił się w tak znacznym stopniu.

Autor składa również szczególne podziękowania fundacji Leverhulme Trust, dzięki której przebywając na stypendium naukowym w University of West London w Wlk. Brytanii mógł rozwijać swoje zainteresowania naukowe, zwłaszcza poprzez uzyskanie dostępu do licznych materiałów źródłowych oraz możliwość bezpośredniego zapoznania się z nowoczesnymi metodami nieniszczącego badania materiałów i programami badawczymi z tego zakresu w wielu brytyjskich ośrodkach badawczych.

- 1. ...
- 2. ...
- 3. ...
- 4. ...
- 5. ...
- 6. ...
- 7. ...
- 8. ...
- 9. ...
- 10. ...

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- $A$  - potencjał wektorowy pola elektromagnetycznego
- $B$  - indukcja pola magnetycznego
- $B_0$  - indukcja stałego pola magnetycznego
- $c$  - prędkość fali elektromagnetycznej w próżni
- $c_L, c_T$  - prędkość fali ultradźwiękowej podłużnej i poprzecznej
- $D$  - indukcja pola elektrycznego
- $E$  - natężenie pola elektrycznego
- $f$  - gęstość objętościowa sił Lorentza, sił wynikających ze zjawiska magnetostrykcji lub sił magnetycznych; częstotliwość
- $F$  - gęstość powierzchniowa sił Lorentza, sił wynikających ze zjawiska magnetostrykcji lub sił magnetycznych
- $i$  - jednostka urojona
- $I_m$  - amplituda prądu w nadawczym uzwojeniu przetwornika
- $j$  - gęstość prądu
- $h$  - odległość cewki (przetwornika) od powierzchni metalu
- $H$  - natężenie pola magnetycznego
- $L$  - podłużna fala ultradźwiękowa
- $M$  - magnetyzacja
- $n$  - liczba zwojów cewki na jednostkę długości
- $N$  - liczba zwojów cewki
- $r, \Theta, z$  - współrzędne walcowe
- $R$  - promień zwoju
- $t$  - czas
- $T$  - poprzeczna fala ultradźwiękowa
- $u$  - amplituda wychYLENIA cząsteczek ośrodka od położenia równowagi
- $U$  - napięcie elektryczne
- $v$  - prędkość akustyczna
- $x, y, z$  - współrzędne prostokątne
- $\delta$  - głębokość wnikania prądów wirowych
- $\epsilon$  - przenikalność elektryczna

- $\epsilon_0$  - przenikalność elektryczna próżni
- $\phi$  - potencjał skalarny pola akustycznego
- $\lambda$  - długość fali ultradźwiękowej lub elektromagnetycznej
- $\mu$  - względna przenikalność magnetyczna
- $\mu_0$  - przenikalność magnetyczna próżni
- $\rho$  - gęstość materiału
- $\sigma$  - konduktywność
- $\omega$  - częstotliwość kołowa
- $\psi$  - potencjał wektorowy pola akustycznego.

Wielkości wektorowe oznaczono drukiem prostym wytłuszczonym.

## 1. WPROWADZENIE

### 1.1. Wstęp

Badania nieniszczące materiałów stanowią podstawowy sposób kontroli jakości wyrobów w wielu gałęziach przemysłu, a zwłaszcza w przemyśle metalurgicznym oraz w tych przemysłach, w których podstawowym tworzywem konstrukcyjnym są metale. Nieniszczące metody badań materiałów są również powszechnie wykorzystywane do okresowego badania stanu konstrukcji lub elementów konstrukcji o krytycznym - ze względu na bezpieczeństwo użytkowania - znaczeniu; wyniki tych badań stanowią często jedyne kryterium, na podstawie którego podejmuje się decyzje o możliwości dalszej, bezpiecznej eksploatacji badanych obiektów, takich jak np. duże zbiorniki lub zbiorniki wysokociśnieniowe, rurociągi, mosty, samoloty, tory kolejowe, elementy jezdne pociągów itp.

Jedną z podstawowych metod wykorzystywanych w badaniach nieniszczących materiałów jest metoda ultradźwiękowa [41, 56, 156, 161]. Oprócz badań mających na celu wykrycie wad struktury (pęknięcia, pęcherze gazowe, wtrącenia innego materiału itp.) badanych obiektów fale ultradźwiękowe powszechnie wykorzystuje się w ultradźwiękowej technice pomiarowej, np. do pomiaru odległości (grubości) lub do pomiaru prędkości propagacji fal ultradźwiękowych, który może dostarczyć wielu informacji dotyczących stanu lub własności fizycznych badanego materiału.

Do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych wykorzystywanych w badaniach nieniszczących materiałów i w ultradźwiękowej technice pomiarowej powszechnie stosuje się głowice zawierające przetworniki piezoelektryczne [41, 56, 156, 161]. Przetworniki te, zwłaszcza wykonane z ceramicznych materiałów piezoelektrycznych, charakteryzują się dużą skutecznością przetwarzania energii elektrycznej na akustyczną i odwrotnie. Do zalet głowic piezoelektrycznych należą również dobre własności kierunkowe i małe wymiary. Głowice z przetwornikami piezoelektrycznymi wymagają jednak stosowania materialnego ośrodka sprzęgającego akustycznie głowicę z badanym wyrobem; najczęściej wykorzystuje się w tym charakterze wodę lub olej. Stosowanie ciekłego ośrodka sprzęgającego znacznie ogranicza możliwości wytwarzania różnego rodzaju fal ultradźwiękowych, gdyż w cieczach mogą rozchodzić się tylko fale podłużne. Dlatego też, przykładowo, ultradźwiękowe fale poprzeczne wytwarza się zazwyczaj dzięki wykorzystaniu zjawiska transformacji fal padających ukośnie na granicę dwóch ośrodków, a sam przetwornik nadawczy jest przetwornikiem na fale podłużne.



W defektoskopii ultradźwiękowej lokalizacja wad w badanym obiekcie wymaga, aby wskazania defektoskopu lub innego urządzenia kontrolno-pomiarowego były obserwowane podczas przemieszczania głowicy ultradźwiękowej po powierzchni obiektu. Sprężenie akustyczne musi przy tym pozostawać stałe, gdyż amplituda odbieranych impulsów - zależna od jakości sprężenia - jest miarą wielkości wady. Współczynnik przepuszczania fali ultradźwiękowej przez warstwę cieczy zasadniczo zależy od grubości tej warstwy; jeżeli np. grubość warstwy wynosi nieparzystą wielokrotność  $1/4$  długości fali, to fala ultradźwiękowa w ogóle nie przechodzi przez tę warstwę. Tak więc podczas badań ręcznych grubość warstwy cieczy sprzęgającej musi być utrzymywana na stałym i jak najmniejszym poziomie. Pewnym rozwiązaniem może być zanurzenie całego badanego obiektu w wodzie, ale wtedy - oprócz niedogodności takiego sposobu badania - pojawiają się problemy związane z echemi pośrednimi, odbitymi od powierzchni granicznej pomiędzy wodą i tym obiektem. W instalacjach automatycznych dla zapewnienia sprężenia akustycznego często stosowany jest strumień wody; w tym przypadku podstawową trudnością - zwłaszcza przy dużej szybkości badania - jest utrzymanie stałego, pozbawionego pęcherzyków powietrza, strumienia wody.

Problemy związane z koniecznością stosowania ciekłego ośrodka sprzęgającego potęgują się podczas badania wyrobów o znacznie podwyższonej temperaturze. Zastosowanie w takich przypadkach głowic piezoelektrycznych wymaga np. użycia zamiast wody roztopionych soli lub zapewnienia bardzo silnego docisku, przy którym uzyskuje się dostateczne sprężenie głowicy - lub raczej sprężonego z nią akustycznie na chłodnym końcu (w klasyczny sposób) elementu pośredniczącego - z powierzchnią badanego wyrobu [201].

Jakość badania ultradźwiękowego przy użyciu głowic piezoelektrycznych w bardzo dużym stopniu zależy również od stanu powierzchni wyrobu; często konieczne jest uprzednie, wymagające niekiedy dużych nakładów, odpowiednie przygotowanie tej powierzchni, np. gdy jest ona pokryta produktami korozji lub silnie zanieczyszczona.

Z wymienionych wyżej powodów od wielu lat prowadzone są prace badawcze nad bezstykowymi metodami wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych, przy czym nie tyle istotna jest praca przetwornika w pewnym oddaleniu od powierzchni wyrobu, co możliwość pracy bez jakiegokolwiek materialnego ośrodka sprzęgającego, a sam przetwornik może stykać się z powierzchnią wyrobu.

Jedną z takich metod jest tzw. metoda elektromagnetyczno-akustyczna, nazywana w skrócie metodą EMA (z ang. ElectroMagneto-Acoustic), nad którą prace zapoczątkowane zostały pod koniec lat sześćdziesiątych. Spośród wszystkich znanych sposobów bezstykowego wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych metoda EMA w najwyższym stopniu pozwala na wykorzystanie metod badań i środków technicznych stosowanych w połączeniu z głowicami piezoelektrycznymi. Lista opublikowanych na świecie prac, dotyczących zarówno teorii, jak i praktyki stosowania przetworników EMA, sięga co najmniej kilkuset pozycji. Są wśród nich również prace przeglądowe, takie jak np. [1, 2, 18, 31, 45, 46, 48, 73, 128, 149, 151, 174, 179, 196], lecz tylko kilka spośród tych prac [46, 73, 149, 196] przedstawia problematykę przetwarzania EMA w szerszym ujęciu. Fakt, że metoda EMA uwzględniana jest także w licznych monografiach dotyczących techniki ultradźwiękowej, spośród których wymienić można np. prace [2, 128, 174, 179], świadczy o tym, iż w niektórych zastosowaniach przetworniki EMA (powszechnie określane w literaturze anglosaskiej skrótem EMAT, tj. ElectroMagneto-

Acoustic Transducer) są już uważane za przetworniki ultradźwiękowe alternatywne w stosunku do głowic piezoelektrycznych.

Metoda EMA nie jest jednak do tej pory szerzej znana w kraju i poza pracami autora [57 - 72], poruszającymi wybrane aspekty tej metody, nie były zasadniczo publikowane inne poświęcone jej opracowania. Dlatego też podstawowym celem autora było stworzenie monografii ujmującej w możliwie szerokim zakresie najważniejsze zagadnienia dotyczące teorii i zastosowań metody EMA. Z kilku powodów autor zdecydował jednak ograniczyć zakres pracy do przetworników na fale podłużne i poprzeczne; po pierwsze, fale ultradźwiękowe tych dwóch rodzajów mają podstawowe znaczenie w technice ultradźwiękowej; po drugie, zainteresowania badawcze i studialne autora skupiały się przede wszystkim na przetwornikach na fale podłużne i poprzeczne; po trzecie, literatura na temat wykorzystania metody EMA do wytwarzania i odbioru fal powierzchniowych i płytowych jest bardzo bogata i uwzględnienie jej w niniejszej monografii wymagałoby znacznego zwiększenia jej objętości. Wśród prac przeglądowych lub poruszających problematykę wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych powierzchniowych i płytowych w szerszym zakresie wymienić można takie pozycje, jak [18, 35, 73, 79, 108, 109, 151, 183, 187 - 190, 196]. Dodatkowo, rozważania dotyczące przetworników EMA na fale podłużne i poprzeczne ograniczone są do przetworników zawierających tzw. cewki stykowe, tzn. cewki płaskie zbliżone do powierzchni badanego obiektu. Do badania rur i prętów metodą EMA można również stosować cewki przelotowe, tzn. cewki nasuwane na badany obiekt. Przetworniki tego rodzaju są jednak rozpatrywane w literaturze dotyczącej metody EMA stosunkowo rzadko [9, 13, 50, 115, 121, 124, 131, 132, 191 - 195].

Praca zawiera 8 rozdziałów oraz obejmujący ponad 200 pozycji wykaz literatury. W rozdziale 1 oprócz powyższych uwag wstępnych przedstawiono w dużym skrócie podstawowe metody bezstykowego wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych, a następnie opisano zasadę działania przetworników EMA i ich podstawowe konfiguracje. Rozdziały 2 i 3 poświęcone są omówieniu modeli teoretycznych i podstawowych własności przetworników EMA. Poczynając od przedstawionego w rozdziale 2 modelu najprostszego, w którym zakłada się, że fale ultradźwiękowe wytwarzane są za pomocą płaskiej fali elektromagnetycznej, przechodzi się w rozdziale 3 do modeli matematycznych elementarnych przetworników w postaci prostoliniowego przewodu lub pojedynczego kołowego zwoju, a następnie przetworników bardziej złożonych. Zagadnieniom związanym z konstrukcją podstawowych elementów przetworników EMA i współpracujących z nimi układów elektronicznych poświęcony jest rozdział 4. Rozdział 5 zawiera przegląd podstawowych zastosowań przetworników EMA. W rozdziale 6 przedstawione są wyniki prac nad przetwornikami EMA prowadzonych w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej w Gliwicach przez autora [57 - 72, 144 - 146] lub też prac przez niego konsultowanych [36, 49, 176, 206]. Prace te wyróżniono w odnośnikach literaturowych drukiem wytłuszczonym. Podsumowanie pracy wraz z przedstawieniem perspektyw dalszego rozwoju i zastosowań metody EMA zawarte jest w rozdziałach 7 i 8.

## 1.2. Bezstykowe metody wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych

Ultradźwiękowe przetworniki piezoelektryczne działają w oparciu o zasadę, że zamiana energii elektrycznej na mechaniczną (podczas wytwarzania fal ultradźwiękowych) i odwrotnie (podczas odbioru) odbywa się w samym przetworniku. Konieczne jest zatem sprzężenie akustyczne przetwornika z badanym materiałem za pośrednictwem odpowiedniego materialnego ośrodka sprzęgającego (najczęściej cieczy), którego akustyczna impedancja falowa powinna być zbliżona do akustycznej impedancji falowej materiału, z którego wykonany jest przetwornik, oraz materiału badanego. Ma to na celu uzyskanie odpowiednio dużych wartości współczynników przejścia fali ultradźwiękowej przez powierzchnie graniczne pomiędzy przetwornikiem, warstwą sprzęgającą i badanym ośrodkiem.

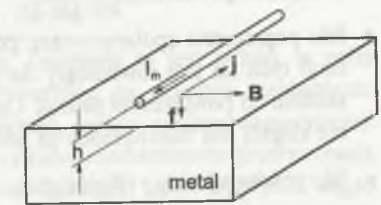
Eliminacja warstwy sprzęgającej wymaga całkowicie odmiennego podejścia do problemu wytwarzania i odbioru fali ultradźwiękowej, tzn. przetwarzanie powinno odbywać się w powierzchniowej warstwie badanego materiału, a energia powinna być doprowadzana do tej powierzchni (z przetwornika nadawczego) lub z niej odprowadzana (do przetwornika odbiorczego) za pośrednictwem np. fal elektromagnetycznych. Najważniejsze metody wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych, które dzięki wykorzystaniu tej koncepcji nie wymagają stosowania materialnego ośrodka sprzęgającego, to [18, 127, 128, 134, 179]:

- metoda optyczna,
- metoda elektrostatyczna (pojemnościowa),
- metoda elektromagnetyczna (metoda prądów wirowych),
- metoda magnetyczna.

W **metodzie optycznej** do wytwarzania fal ultradźwiękowych wykorzystuje się wiązkę światła lasera, która padając na powierzchnię badanego materiału powoduje - w zależności od gęstości energii - jej lokalne nagrzanie (tzw. zakres termoelastyczny) lub odparowanie (tzw. zakres ablacji). Laser może znajdować się w odległości wielu metrów od badanego obiektu; tak więc metoda ta w szczególności doskonale nadaje się do badania wyrobów o wysokiej temperaturze. Dodatkową zaletą tej metody wytwarzania fal ultradźwiękowych jest brak istotnych wymagań odnośnie do rodzaju badanego materiału i stanu jego powierzchni, o ile materiał ten nie jest przezroczysty. Odbiór fal ultradźwiękowych metodą optyczną realizowany jest przy użyciu interferometrów. Wiązka światła laserowego padając na powierzchnię badanego obiektu, drgającą pod wpływem dochodzącej do niej z głębi ośrodka fali ultradźwiękowej, ulega modulacji. Po doprowadzeniu do interferencji z wiązką odniesienia wypadkowy sygnał poddawany jest detekcji, a uzyskany w ten sposób sygnał odzwierciedla drgania powierzchni ośrodka. Zaletami tej metody odbioru fal ultradźwiękowych są: możliwość umieszczenia systemu odbiorczego w dużej odległości od badanego obiektu, wysoka czułość oraz szerokie pasmo. Na przeszkodzie w szerokim zastosowaniu interferometrów optycznych do odbioru fal ultradźwiękowych stoi jednak przede wszystkim wysoki koszt systemu i konieczność odpowiedniego, zapewniającego wystarczające odbicie światła, przygotowania powierzchni badanego wyrobu. Wykorzystanie laserów do wytwarzania fal ultradźwiękowych stanowi obecnie jeden z ważniejszych kierunków rozwoju techniki ultradźwiękowej i do zagadnienia tego powrócimy w końcowej części niniejszej pracy.

W **metodzie elektrostatycznej** przetwornik nadawczy lub odbiorczy przyjmuje postać kondensatora, którego jedną okładkę stanowi zbliżona do powierzchni badanego wyrobu elektroda, a rolę drugiej okładki spełnia sama powierzchnia wyrobu. Metoda ta nadaje się zatem wyłącznie do badania metali lub materiałów pokrytych warstwą przewodzącą prąd elektryczny. Przyłożenie napięcia zmiennego pomiędzy elektrody tak utworzonego kondensatora powoduje przyciąganie się jego okładek z częstotliwością dwukrotnie większą od częstotliwości przyłożonego napięcia (uzyskanie tej samej częstotliwości wymaga wstępnej polaryzacji kondensatora); wzbudzone w ten sposób drgania powierzchni ośrodka rozchodzą się w nim w postaci fali ultradźwiękowej. Amplituda wytwarzanych takim sposobem fal ultradźwiękowych jest bardzo mała; rośnie ona ze wzrostem przyłożonego napięcia, jednak przy dużych napięciach istnieje ryzyko przebicia elektrycznego, zwłaszcza że odległość elektrody przetwornika od powierzchni metalu musi być bardzo mała (typowo wynosi ona kilkadziesiąt mikrometrów). Z tego powodu zastosowanie przetworników nadawczych tego typu jest znikome i ogranicza się praktycznie do metody rezonansowej, w której dzięki wytwarzaniu w ośrodku fal stojących ich amplituda ulega znacznemu powiększeniu. Odbiór fal ultradźwiękowych metodą elektrostatyczną realizowany jest w podobny sposób. Drgania powierzchni ośrodka przewodzącego prąd powodują zmianę pojemności kondensatora utworzonego przez tę powierzchnię i elektrodę przetwornika. Wskutek zmian pojemności takiego kondensatora, który naładowany zostaje uprzednio ze źródła wysokiego napięcia, na jego zaciskach pojawia się napięcie zmienne o amplitudzie proporcjonalnej do amplitudy fali ultradźwiękowej i o takiej samej jak dla fali ultradźwiękowej częstotliwości [169]. Dzięki dużej liniowości, szerokiemu pasmu przenoszonych częstotliwości oraz wystarczającej, choć małej, skuteczności odbiorcze przetworniki pojemnościowe są stosunkowo często wykorzystywane jako precyzyjne przetworniki pomiarowe [18, 42, 96]. Zarówno nadawcze, jak i odbiorcze przetworniki elektrostatyczne nie są wykorzystywane w defektoskopii ultradźwiękowej, co wynika przede wszystkim z ich małej skuteczności i dużych wymagań odnośnie do gładkości powierzchni badanego wyrobu.

Zasadniczym elementem systemu do wytwarzania lub odbioru fal ultradźwiękowych **metodą elektromagnetyczną** jest cewka zbliżona do powierzchni badanego, przewodzącego prąd elektryczny, materiału. Cewka ta zasilana jest prądem wielkiej częstotliwości, pod wpływem którego w powierzchniowej warstwie metalu indukowane są prądy wirowe. Jednocześnie w tym obszarze powierzchni, w którym płyną prądy wirowe, wytwarzane jest silne stałe pole magnetyczne. Wynikiem oddziaływania tego pola na prądy wirowe jest siła Lorentza, powodująca drgania powierzchni ośrodka zgodnie z częstotliwością prądu wzbudzającego. Zasadę wytwarzania fal ultradźwiękowych metodą elektromagnetyczną ilustruje rys. 1.1. W czasie odbioru drgania powierzchni metalu, również poddanej działaniu stałego pola magnetycznego, powodują indukowanie na tej powierzchni prądów wirowych. Związana z tymi prądami fala elektromagnetyczna



Rys. 1.1. Zasada wytwarzania fal ultradźwiękowych metodą EMA

Fig. 1.1. Principle of electromagnetic acoustic (EMA) generation of ultrasonic waves

rozchodzi się w ośrodku nad metalem, w wyniku czego w zbliżonej do powierzchni metalu cewce indukowane jest napięcie.

Tego typu mechanizm wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych występuje głównie w metalach nieferromagnetycznych. W metalach ferromagnetycznych występują dodatkowo zjawiska charakterystyczne dla metody magnetycznej. Przy tej samej jak uprzednio konfiguracji przetwornika prąd zmienny przepływający przez cewkę nadawczą wytwarza w badanym ferromagnetyku zmienne pole magnetyczne, które jest źródłem sił wynikających ze zjawiska magnetostrykcji, namagnesowania ośrodka lub gradientu jego przenikalności magnetycznej i do ich powstania nie jest konieczny przepływ prądów wirowych.

Ze względu na jednakową dla obu powyższych metod konfigurację przetwornika oraz fakt, że w obu tych metodach sprzężenie przetwornika z badanym obiektem realizowane jest za pośrednictwem pola elektromagnetycznego, powszechnie używa się nazwy: "Metoda elektromagnetyczno-akustyczna" (lub metoda EMA) dla określenia sposobu wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych, w którym wykorzystuje się zarówno mechanizm związany z przepływem prądów wirowych (siła Lorentza), jak i siły wynikające z magnetycznych własności materii. Omówieniu własności tej właśnie metody poświęcona jest niniejsza praca.

### 1.3. Podstawowe konfiguracje przetworników EMA

Jedną z podstawowych zalet przetworników elektromagnetyczno-akustycznych - oprócz wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych w sposób bezstykowy - jest możliwość łatwego wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych różnego rodzaju i o różnej polaryzacji. Przetworniki EMA pozwalają na wytwarzanie następujących podstawowych rodzajów fal ultradźwiękowych:

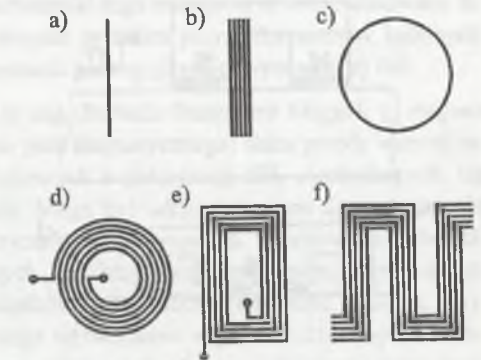
- fale podłużne rozchodzące się prostopadle lub skośnie do powierzchni próbki,
- fale poprzeczne spolaryzowane pionowo (SV, z ang. Shear Vertical; płaszczyzna polaryzacji tych fal jest prostopadła do powierzchni materiału), rozchodzące się normalnie lub skośnie do powierzchni próbki,
- fale poprzeczne spolaryzowane poziomo (SH, z ang. Shear Horizontal, kierunek polaryzacji tych fal jest równoległy do powierzchni materiału), rozchodzące się normalnie lub skośnie do powierzchni próbki. Cenną zaletą tego rodzaju fal ultradźwiękowych jest to, że nie ulegają one transformacji na fale podłużne podczas odbicia od granicy dwóch ośrodków,
- fale powierzchniowe (Rayleigha),
- fale płytowe (Lamba).

Rodzaj wytwarzanej (odbieranej) metodą EMA fali ultradźwiękowej zależy przede wszystkim od kształtu cewki nadawczej (który determinuje rozkład prądów wirowych indukowanych na powierzchni badanego materiału), konstrukcji magnesu wytwarzającego stałe silne pole magnetyczne w powierzchniowej warstwie badanego materiału i sposobu umieszczenia cewki w stosunku do nabiegunków magnesu (co określa wzajemne położenie wektorów gęstości prądów wirowych i indukcji stałego pola magnetycznego na powierzchni materiału).

W pewnych przypadkach zależy on od sposobu zasilania cewki nadawczej i przebiegu czasowego pobudzenia, a podczas badania materiałów ferromagnetycznych - również od własności samego materiału i stanu jego namagnesowania [104, 201, 202].

Na rys. 1.2 pokazano podstawowe kształty uzwojeń stosowanych w przetwornikach EMA. Uzwojenia te są najczęściej cewkami płaskimi, tzn. ich grubość jest równa średnicy zastosowanego przewodu.

Przetworniki z elementarnymi uzwojeniami z rys. 1.2a i 1.2c mają znaczenie przede wszystkim teoretyczne, gdyż dla nich tworzy się podstawowe modele matematyczne, na podstawie których buduje się modele przetworników stosowanych w praktyce (rys. 1.2d, e, f). Również uzwojenie typu taśma (rys. 1.2b) ma znaczenie głównie teoretyczne (w praktyce niezbędna jest co najmniej jeszcze jedna sekcja takiego uzwojenia - z przeciwnie płynącym prądem, która „zamyka” w pożądanym obszarze obwód przepływu prądów wirowych); jest ono traktowane jako podstawowy element, z którego tworzone są cewki typu ramka lub meander. W cewkach typu ramka lub meander wykorzystywane są na ogół tylko dłuższe boki uzwojeń; krótsze boki są ekranowane lub umieszczane poza zasięgiem stałego pola magnetycznego.

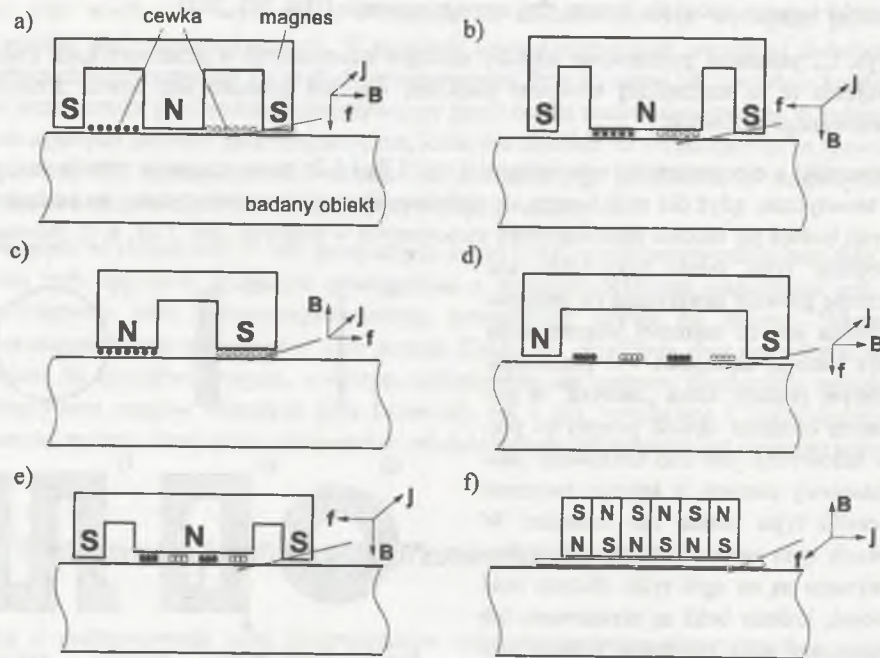


Rys. 1.2. Podstawowe kształty uzwojeń stosowanych w przetwornikach EMA: a) prostoliniowy przewód, b) taśma, c) pojedynczy kołowy zwój, d) spiralna cewka, e) ramka, f) cewka typu meander (lub zyg-zag)

Fig. 1.2. Basic shapes of windings used in EMA transducers: a) straight wire, b) strip, c) single coil, d) spiral coil (pancake coil), e) frame, f) meander or zig-zag coil

Wymagane dla uzyskania fali ultradźwiękowej określonego rodzaju usytuowanie cewki nadawczej względem nabiegunków magnesu określa się zazwyczaj zgodnie z założeniem, że drgania cząstek ośrodka odbywają się w kierunku prostopadłym zarówno do wektora gęstości prądów wirowych, jak i wektora indukcji stałego pola magnetycznego na powierzchni materiału. Założenie to jest jednak w pełni słuszne tylko wtedy, gdy fale ultradźwiękowe są wytwarzane na zasadzie mechanizmu związanego z przepływem prądów wirowych (siła Lorentza, metale nieferromagnetyczne). W ferromagnetykach mechanizm ten stanowi tylko jeden z kilku mechanizmów przetwarzania i nie zawsze jego udział w procesie przetwarzania jest znaczący, gdyż amplituda drgań wynikających na przykład ze zjawiska magnetostrykcji lub sił magnetycznych może być znacznie większa. Podczas badania próbek ferromagnetycznych możliwe są zatem na przykład sytuacje, gdy przetwornik EMA o konfiguracji właściwej dla fal poprzecznych generuje dominującą falę podłużną [201, 202].

Na rys. 1.3 przedstawiono podstawowe konfiguracje przetworników EMA.



Rys. 1.3. Podstawowe konfiguracje przetworników EMA: a) przetwornik normalny z cewką spiralną lub typu ramka na fale podłużne, b) przetwornik normalny z cewką spiralną na fale poprzeczne, c) przetwornik normalny z cewką typu ramka na fale poprzeczne, d), e) przetwornik kątowy na fale podłużne lub poprzeczne o polaryzacji SV, przetwornik na fale powierzchniowe lub płytowe, f) przetwornik z cewką typu ramka w konfiguracji PPM (ang. Periodic Permanent Magnet) na fale poprzeczne o polaryzacji SH

Fig. 1.3. Basic configurations of EMA transducers: a) normal entry transducer with a spiral coil or a frame for longitudinal waves, b) normal entry transducer with a spiral coil for transverse waves, c) normal entry transducer with a frame for transverse waves, d), e) oblique entry transducer for longitudinal or SV (Shear Vertical) waves, transducer for surface (Rayleigh) or plate (Lamb) waves, f) PPM (Periodic Permanent Magnet) transducer with a frame for SH (Shear Horizontal) waves

Przetwornik ze spiralną cewką (lub cewką typu ramka) umieszczoną pomiędzy koncentrycznymi nabiegownikami magnesu (rys. 1.3a) wytwarza fale podłużne rozchodzące się normalnie do powierzchni badanego wyrobu; pole akustyczne takiego przetwornika jest podobne do pola ultradźwiękowego konwencjonalnej głowicy normalnej z przetwornikiem piezoelektrycznym na fale podłużne. Jeżeli spiralna cewka zostanie umieszczona przy powierzchni czołowej środkowego nabiegownika (rys. 1.3b), tj. w obszarze składowej normalnej stałego pola magnetycznego, to przetwornik tego typu będzie generować ultradźwiękowe fale poprzeczne spolaryzowane radialnie, tzn. drgania cząsteczek ośrodka będą zachodzić wzdłuż promieni okręgów, stanowiących linie przepływu prądów wirowych. Przetwornik ten zaliczany jest do przetworników normalnych, chociaż w rzeczywistości kierunek maksymalnego promienio-

wania tworzy z normalną do powierzchni kąt wynoszący kilka stopni, gdyż przy drganiach radialnych amplituda drgań wzdłuż osi przetwornika musi być z oczywistych względów równa zero. Przetwornik o konfiguracji pokazanej na rys. 1.3c wytwarza ultradźwiękowe fale poprzeczne o polaryzacji liniowej typu SV i rozchodzące się normalnie do powierzchni materiału.

Przetworniki z cewką typu meander umieszczoną w obszarze składowej stycznej (rys. 1.3d) lub normalnej (rys. 1.3e) stałego pola magnetycznego są stosowane do wytwarzania fal podłużnych lub poprzecznych o polaryzacji pionowej (SV), rozchodzących się w głąb materiału pod kątem w stosunku do normalnej do powierzchni. Skośne rozchodzenie się fali ultradźwiękowej uzyskuje się na zasadzie interferencji fal ultradźwiękowych wytwarzanych przez poszczególne sekcje cewki typu meander. Przetworniki tego rodzaju są również stosowane do wytwarzania fal powierzchniowych lub płytowych; w takim przypadku rozstaw kolejnych sekcji cewki musi stanowić całkowitą wielokrotność połowy długości wytwarzanej fali.

Przetworniki pracujące w konfiguracji PPM (z ang. Periodic Permanent Magnet, tj. magnes trwały z okresowym rozkładem przestrzennym pola magnetycznego) służą przede wszystkim do wytwarzania poprzecznych fal ultradźwiękowych o polaryzacji SH, rozchodzących się skośnie w stosunku do powierzchni materiału. Mogą być także stosowane do wytwarzania pewnych postaci (symetrycznych i antysymetrycznych) fal płytowych. W przetwornikach tych stosuje się szereg naprzemiennie ułożonych miniaturowych magnesów, wykonanych z materiałów zawierających domieszki pierwiastków ziem rzadkich (np. samar, neodym, ren). Wzajemne ustawienie tych magnesów powoduje wytworzenie w powierzchniowej warstwie badanego ośrodka silnego stałego pola magnetycznego o dominującej składowej normalnej; przestrzenny rozkład indukcji tego pola wzdłuż uzwojenia cewki typu ramka jest funkcją okresową, co wyjaśnia powszechnie stosowaną nazwę tego rodzaju przetworników.

Modele matematyczne przetworników EMA pracujących w wymienionych wyżej konfiguracjach oraz własności realnych przetworników przedstawiono w rozdziale 3.

## 2. PODSTAWY TEORETYCZNE PRZETWARZANIA ELEKTROMAGNETYCZNO-AKUSTYCZNEGO

### 2.1. Wstęp

Pierwsze wyniki prac nad przetwarzaniem elektromagnetyczno-akustycznym opublikowane zostały w drugiej połowie lat sześćdziesiątych [28, 29, 74, 90, 133, 152]. Już początkowe badania wykazały, że głównym ograniczeniem przetworników EMA jest znacznie mniejsza niż dla przetworników piezoelektrycznych skuteczność przetwarzania energii elektrycznej na energię fal ultradźwiękowych (podczas wytwarzania fal) i odwrotnie (podczas odbioru), a także silna zależność tej skuteczności od odległości przetwornika od powierzchni próbki (tzw. efekt unoszenia, z ang. lift-off). Dlatego też pierwsze eksperymenty koncentrowały się na badaniu skuteczności przetworników EMA w zależności od takich czynników, jak częstotliwość wytwarzanej fali ultradźwiękowej, temperatura próbki (poczynając od temperatur bliskich zera bezwzględnego), struktura krystaliczna materiału (monokryształy i materiały polikrystaliczne) oraz konduktywność, gęstość i własności magnetyczne badanego metalu [44, 47, 74, 90, 133, 152]. Jednocześnie przy użyciu pierwszych skonstruowanych przetworników EMA wykazano możliwość wykorzystania tej metody w defektoskopii ultradźwiękowej, uzyskując wyraźnie rozróżnialne sygnały wynikłe z odbicia fal ultradźwiękowych od sztucznych wad wewnętrznych w badanych próbkach [28, 135].

Równoległe z pracami doświadczalnymi prowadzone były prace teoretyczne mające na celu stworzenie opisu matematycznego przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego, który pozwoliłby na określanie optymalnych konstrukcji i warunków pracy konkretnych przetworników. Zagadnienia te mają dla realnych przetworników bardzo złożony charakter, jednak już wykorzystanie elementarnych równań elektrodynamiki i teorii sprężystości pozwala na stwierdzenie, że w przypadku, gdy fale ultradźwiękowe wytwarzane są i odbierane na zasadzie oddziaływania prądów wirowych ze stałym polem magnetycznym (metale nieferromagnetyczne), amplituda napięcia odbieranego przez nadawczo-odbiorczy przetwornik EMA jest wprost proporcjonalna do amplitudy prądu w jego cewce nadawczej i kwadratu indukcji stałego pola magnetycznego w powierzchniowej warstwie badanego metalu oraz odwrotnie proporcjonalna do akustycznej impedancji falowej tego metalu [29].

O innych podstawowych własnościach metody EMA, takich jak skuteczność przetwarzania i jej zależność od częstotliwości wytwarzanej fali ultradźwiękowej, temperatury oraz właściwości badanego materiału można wnioskować na podstawie modelu, w którym zakłada się, że źródłem fali ultradźwiękowej jest płaska fala elektromagnetyczna padająca na powierzchnię metalu. Przegląd zagadnień dotyczących modelu matematycznego przetwarzania EMA roz-

poczniemy od takiego właśnie modelu. Model ten nie pozwala jednak uzyskać żadnych informacji np. na temat rozkładu pola akustycznego wytwarzanego przez konkretny przetwornik nadawczy, czy też bardzo istotnego w metodzie EMA efektu unoszenia, tj. zależności amplitudy sygnału od odległości przetwornika od powierzchni badanego materiału. Modele matematyczne realnych przetworników EMA, pracujących w podanych wcześniej podstawowych konfiguracjach, przedstawiono w następnym rozdziale. Omówiono tam również liczne prace, których celem było zbadanie własności przetworników EMA na drodze doświadczalnej oraz weryfikacja praktyczna modeli teoretycznych.

### 2.2. Wytwarzanie fal ultradźwiękowych za pomocą płaskiej fali elektromagnetycznej

#### 2.2.1. Mechanizm przetwarzania oparty na wykorzystaniu prądów wirowych

W większości prac teoretycznych z początkowego okresu rozwoju metody EMA wyprowadza się podstawowe zależności opisujące przetwarzanie elektromagnetyczno-akustyczne, przy założeniu że źródłem fali ultradźwiękowej jest płaska fala elektromagnetyczna padająca na powierzchnię metalu [45, 46, 47, 74, 80, 152]. Powszechnie przyjmuje się zarówno w tym przypadku, jak i podczas analizy teoretycznej konkretnych przetworników założenie o słabym sprzężeniu pól elektromagnetycznego i akustycznego. Inaczej mówiąc, zakłada się, że natężenie fali elektromagnetycznej generowanej wskutek drgań przewodzącego ośrodka w stałym polu magnetycznym jest znacznie mniejsze od natężenia padającej fali elektromagnetycznej - wywołującej te drgania. Oznacza to, że całe zadanie można rozbić na dwa odrębne zagadnienia: elektromagnetyczne, w którym należy wyznaczyć rozkład pola elektromagnetycznego w rozpatrywanym ośrodku materialnym, oraz akustyczne, w którym na podstawie wyznaczonego wcześniej rozkładu sił określa się rozkład pola akustycznego w tym ośrodku.

Punktem wyjścia do stworzenia modelu matematycznego dowolnego przetwornika nadawczego EMA są równania Maxwella:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.1)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.2)$$

gdzie  $\mathbf{H}$  i  $\mathbf{E}$  oznaczają natężenie odpowiednio pola magnetycznego i elektrycznego,  $\mathbf{D}$  i  $\mathbf{B}$  - indukcję pola elektrycznego i magnetycznego, a  $\mathbf{j}$  oznacza gęstość prądu przewodzenia, która w ośrodku o konduktywności  $\sigma$  dana jest zależnością:

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}. \quad (2.3)$$

Założmy, że na powierzchnię półprzestrzeni wypełnionej jednorodnym, izotropowym materiałem przewodzącym o konduktywności  $\sigma$  i liniowej zależności indukcji magnetycznej od natężenia pola magnetycznego ( $\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m - przenikalność magnetyczna próżni,  $\mu$  - przenikalność względna ośrodka) pada płaska harmoniczna fala elektromagnetycz-

na, dla której zależność natężenia pola elektrycznego i magnetycznego od czasu określona jest czynnikiem  $\exp(i\omega t)$ , przy czym  $i$  oznacza jednostkę urojoną, a  $\omega$  jest częstotliwością kołową fali elektromagnetycznej.

Korzystając z tożsamości różniczkowej:

$$\text{rot rot } \mathbf{A} = \text{grad div } \mathbf{A} - \nabla^2 \mathbf{A}, \quad (2.4)$$

gdzie  $\mathbf{A}$  oznacza dowolną wielkość wektorową, oraz z zależności wyrażającej bezźródłowość pola magnetycznego:

$$\text{div } \mathbf{B} = 0, \quad (2.5)$$

możemy na podstawie równań Maxwella napisać równanie opisujące natężenie pola magnetycznego w przewodzącym ośrodku (dla którego pominięto gęstość prądu przesunięcia  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ ):

$$\nabla^2 \mathbf{H} - q^2 \mathbf{H} = 0, \quad (2.6)$$

gdzie

$$q = \sqrt{i\omega\sigma\mu\mu_0} = \frac{1+i}{\delta}, \quad (2.7)$$

natomiast

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu\mu_0}} \quad (2.8)$$

oznacza klasyczną głębokość wnikania prądów wirowych do ośrodka przewodzącego prąd elektryczny.

Do dalszych rozważań przyjmiemy układ współrzędnych jak na rys. 2.1 i założymy, że natężenie pola magnetycznego  $\mathbf{H}$  skierowane jest wzdłuż osi X. Ośrodek przewodzący zajmuje półprzestrzeń  $z < 0$ .

Dla przyjętej składowej  $H_x$  natężenia pola magnetycznego równanie (2.6) przyjmuje postać skalarną:

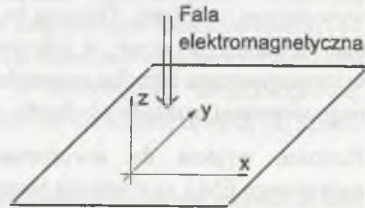
$$\frac{\partial^2 H_x}{\partial z^2} - q^2 H_x = 0, \quad (2.9)$$

którego rozwiązaniem, opisującym rozkład pola magnetycznego w przewodzącym ośrodku, jest funkcja:

$$H_x(z) = H_m e^{qz} = H_m e^{\frac{(1+i)z}{\delta}}, \quad (2.10)$$

w której  $H_m$  oznacza amplitudę natężenia pola magnetycznego na powierzchni metalu ( $z = 0$ ).

Gęstość prądów wirowych indukowanych w rozpatrywanym ośrodku przez padającą falę elektromagnetyczną wynika z równania Maxwella (2.1) i równania (2.3):



Rys. 2.1. Układ współrzędnych do analizy wytwarzania fal ultradźwiękowych przez płaską falę elektromagnetyczną

Fig. 2.1. Coordinate system for the analysis of the generation of ultrasonic waves by a plane electromagnetic wave

$$\mathbf{j}(z) = \text{rot } \mathbf{H} = \frac{\partial H_x}{\partial z} \mathbf{a}_y = H_m \frac{1+i}{\delta} e^{\frac{(1+i)z}{\delta}} \mathbf{a}_y, \quad (2.11)$$

przy czym  $\mathbf{a}_y$  oznacza wektor jednostkowy w kierunku osi Y.

Założmy teraz, że ośrodek przewodzący poddany jest działaniu stałego pola magnetycznego  $\mathbf{B}_0$  o składowych  $B_{0x}$  i  $B_{0z}$ . Wynikiem oddziaływania tego pola na płynące w ośrodku prądy wirowe jest siła Lorentza, której rozkład przestrzenny w ośrodku dany jest wyrażeniem:

$$\mathbf{f} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}_0 = H_m \frac{1+i}{\delta} (B_{0z} \mathbf{a}_x - B_{0x} \mathbf{a}_z) e^{\frac{(1+i)z}{\delta}} = f_x \mathbf{a}_x + f_z \mathbf{a}_z, \quad (2.12)$$

w którym  $\mathbf{a}_x$  i  $\mathbf{a}_z$  są wektorami jednostkowymi w kierunku odpowiednich osi, a  $f_x$  i  $f_z$  są odpowiednimi rozkładami składowych gęstości objętościowej rozpatrywanej siły.

Składowa  $f_z$  siły Lorentza powoduje drgania cząsteczek ośrodka w kierunku prostopadłym do jego powierzchni; drgania te rozchodzą się w głąb ośrodka w postaci podłużnej fali ultradźwiękowej. Amplitudę tych drgań w stosunku do położenia równowagi oznaczmy  $u_z$ .

Składowa  $f_x$  siły Lorentza wywołuje drgania cząsteczek ośrodka w kierunku równoległym do jego powierzchni; drgania te rozchodzą się w głąb ośrodka w postaci poprzecznej fali ultradźwiękowej. Amplitudę tych drgań oznaczmy  $u_x$ .

Wyznaczenie wielkości  $u_x$  i  $u_z$  wymaga rozwiązania niejednorodnych równań różniczkowych, opisujących drgania sprężyste ośrodka:

dla płaskich fal podłużnych

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} - c_l^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = \frac{f_z}{\rho} \quad (2.13)$$

i dla płaskich fal poprzecznych spolaryzowanych w kierunku osi X

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} - c_t^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} = \frac{f_x}{\rho}. \quad (2.14)$$

W powyższych równaniach  $\rho$  oznacza gęstość materiału, a  $c_l$  i  $c_t$  oznaczają prędkości rozchodzenia się odpowiednio podłużnych i poprzecznych fal ultradźwiękowych w tym materiale.

Przy założeniu braku naprężeń na powierzchni ośrodka (powierzchnia swobodna) rozwiązania równań (2.13) i (2.14) przyjmują postać [46, 80, 196]:

dla fal podłużnych

$$u_z = \frac{iH_m B_{0z}}{c_l^2 \rho (1+i\beta)} \left( \frac{-e^{k_l z}}{k_l} + \frac{(1+i)\delta}{z} e^{\frac{(1+i)z}{\delta}} \right), \quad (2.15)$$

dla fal poprzecznych

$$u_x = -\frac{iH_m B_{0x}}{c_t^2 \rho (1+i\beta)} \left( \frac{-e^{k_t z}}{k_t} + \frac{(1+i)\delta}{z} e^{\frac{(1+i)z}{\delta}} \right), \quad (2.16)$$

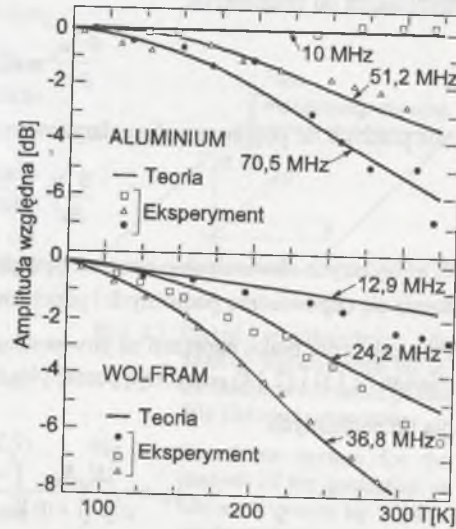
gdzie  $\beta = \frac{\delta^2 k_{L,T}^2}{2}$ ,  $k_{L,T} = \frac{2\pi}{\lambda_{L,T}} = \frac{\omega}{c_{L,T}}$  oznacza liczbę falową fali podłużnej ( $k_L$ ) lub poprzecznej ( $k_T$ ), a  $\lambda_L$  i  $\lambda_T$  to długości odpowiednich fal ultradźwiękowych.

Drugi składnik w obu powyższych wyrażeniach stanowi rozwiązanie szczególne równań falowych (2.13) i (2.14), wynikające z wymuszenia w postaci siły Lorentza o rozkładzie objętościowym określonym przez  $f_x$  lub  $f_z$ . Reprezentuje on odkształcenia sprężyste ośrodka, które zanikają ze wzrostem odległości  $z$  od jego powierzchni ( $z < 0$ ) z taką samą szybkością jak prądy wirowe i dla odległości  $|z| \gg \delta$  może być pominięty. Pierwszy składnik w obu rozwiązaniach stanowi rozwiązanie jednorodne; reprezentuje on płaską falę ultradźwiękową rozchodzącą się w głąb ośrodka bez zmiany amplitudy (przy pominięciu tłumienia fal ultradźwiękowych w ośrodku).

Moduł amplitudy fal ultradźwiękowych reprezentowanych przez pierwsze składniki rozwiązań (2.15) i (2.16) możemy przedstawić w postaci:

$$|u_{z,s}| = \frac{H_m B_{0x,z}}{\omega \rho c_{L,T} (1 + \beta^2)^{1/2}}, \quad (2.17)$$

która obowiązuje dla fal podłużnych przy uwzględnieniu  $B_{0x}$  i  $c_L$  oraz dla fal poprzecznych po podstawieniu  $B_{0z}$  i  $c_T$ . Podobne wyniki podano w pracy [14] dla fal poprzecznych, jak również w pracy [181], w której do rozwiązania równań różniczkowych opisujących drgania sprężyste w ośrodku wykorzystano często stosowaną podczas analizy przetworników EMA metodę potencjałów. Jest to podstawowy wzór dotyczący teorii wytwarzania podłużnych lub poprzecznych fal ultradźwiękowych metodą elektromagnetyczno-akustyczną, który w szczególności pozwala na określenie zależności amplitudy generowanej fali ultradźwiękowej od jej częstotliwości (równej częstotliwości fali elektromagnetycznej) oraz rodzaju badanego materiału (metal) i jego temperatury. Na rys. 2.2 przedstawiono przykładowe zależności tego typu, podane w pracy [74] i cytowane często w innych pracach, np. [45, 46, 196]. Z przeprowadzonych obliczeń i eksperymentów wynika między innymi, że w istotnym dla defektoskopii ultradźwiękowej zakresie częstotliwości (1 - 10 MHz) amplituda fal ultradźwiękowych wytwarzanych metodą EMA nie zależy w istotnym stopniu od temperatury materiału, w którym fale te są generowane (przynajmniej w zakresie do ok. 300 K).



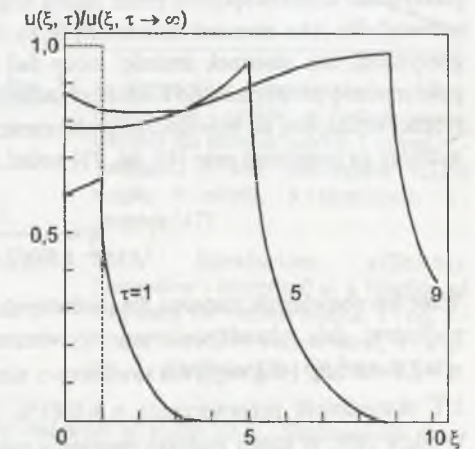
Rys. 2.2. Zależność względnej amplitudy wytwarzanych metodą EMA fal ultradźwiękowych od temperatury i częstotliwości [74]

Fig. 2.2. Relative amplitude of EMA generated ultrasonic waves as a function of temperature and frequency [74]

Ze wzoru (2.17) wynika mający duże znaczenie dla modelowania matematycznego przetworników EMA fakt, że gdy głębokość wnikania prądów wirowych jest znacznie mniejsza od długości fali ultradźwiękowej ( $k\delta \ll 1$ ), to praktycznie nie wpływa ona na amplitudę wytwarzanej fali ultradźwiękowej. Warunek ten jest spełniony dla wielu metali badanych metodami ultradźwiękowymi w typowym zakresie częstotliwości 1 - 10 MHz. Przykładowo, dla podłużnych fal ultradźwiękowych o częstotliwości 10 MHz wytwarzanych w aluminium w temperaturze 300 K  $\delta \approx 25 \mu\text{m}$  i  $\lambda \approx 300 \mu\text{m}$ , czyli  $\beta^2 \approx 0,02 \ll 1$  [46, 73]. Pominięcie składnika  $\beta^2$  w mianowniku wzoru (2.17) jest równoważne założeniu, że fale ultradźwiękowe wytwarzane są w idealnym przewodniku, w którym siły Lorentza występują wyłącznie na jego powierzchni. Założenie to stanowi punkt wyjścia wielu omówionych dalej prac teoretycznych, pozwalając na znaczne uproszczenie modelu matematycznego konkretnych przetworników, zwłaszcza w odniesieniu do jego charakterystyk kierunkowych.

Warto jednak w tym miejscu wspomnieć o konsekwencjach, jakie powoduje to uproszczenie, gdy przyjęte zostanie wymuszenie o innym charakterze niż ciągły przebieg sinusoidalny. Realne przetworniki EMA pracują najczęściej z wykorzystaniem impulsowej metody echa, gdy przetwornik nadawczy pobudzany jest krótkim impulsem (np. w postaci przebiegu sinusoidalnego o wykładniczo tłumionej obwiedni), natomiast w większości prac teoretycznych dotyczących metody EMA zakłada się pobudzenie harmoniczne. Impulsowy charakter wymuszenia stosunkowo łatwo można uwzględnić, gdy wymuszeniem tym jest płaska fala elektromagnetyczna. W pracy [33] założono, że na powierzchnię metalu w układzie współrzędnych jak na rys. 2.1 pada płaska fala elektromagnetyczna w postaci impulsu prostokątnego o krótkim, dążącym do zera, czasie trwania. Następnie rozwiązano równania (2.9), (2.11) - (2.14) metodą przekształcenia Laplace'a dla dwóch różnych przypadków: gdy siły Lorentza mają rozkład objętościowy oraz po zastąpieniu ich siłami skupionymi na powierzchni metalu. Na rys. 2.3 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń amplitudy wytwarzanej fali ultradźwiękowej w funkcji uogólnionych, bezwymiarowych parametrów  $\tau$  i  $\xi$ , reprezentujących odpowiednio czas i odległość mierzoną w głąb metalu:  $\tau = c_{L,T}^2 \mu_0 \sigma t$  i  $\xi = c_{L,T} \mu_0 \sigma z$ .

W przypadku idealnym (zaznaczonym linią przerywaną dla  $\tau = 1$ ), gdy siły są skupione na powierzchni, czoło fali pojawia się w danym punkcie ośrodka w chwili wynikającej z czasu, jaki fala ultradźwiękowa potrzebuje na dojście do tego punktu od powierzchni metalu (tzn.  $\tau = \xi$ ). Przy założeniu objętościowego rozkładu sił (linia ciągła) stwierdza się, że wskutek wnikania fali elektromagnetycznej w głąb ośrodka czoło fali ultradźwiękowej pojawia się



Rys. 2.3. Rozchodzenie się czoła fali ultradźwiękowej przy pobudzeniu impulsowym [31, 33]

Fig. 2.3. Propagation of the ultrasonic wave front for pulse excitation [31, 33]

w danym punkcie ośrodka wcześniej niż w przypadku idealnym. Należy przy tym zauważyć, że wykorzystanie do oceny ilościowej tego zjawiska głębokości wnikania prądów wirowych nie jest możliwe dla założonego przebiegu czasowego pobudzenia, gdyż wielkość ta w rozumieniu wzoru (2.8), który obowiązuje dla harmonicznej fali elektromagnetycznej, traci sens dla impulsów o szerokim widmie. Podane w pracach [31, 33] wyniki obliczeń czasu potrzebnego na dojsie np. fali poprzecznej na zadaną głębokość (gdy odkształcenie w tym punkcie osiąga 50% amplitudy) różnią się od wartości dla przypadku idealnego (siły skupione na powierzchni) w granicach od 4,5% dla miedzi do 250% dla tytanu, gdy głębokość ta wynosi 1 mm, lub w przedziale odpowiednio od 0,44% do 28% dla głębokości równej 10 mm. Błędy tego rodzaju należy uwzględniać przy wykorzystaniu przetworników EMA do pomiarów grubości lub precyzyjnych pomiarów prędkości fal ultradźwiękowych.

Wracając do analizy wzoru (2.17), można również stwierdzić, że w danym metalu amplituda wytwarzanych metodą EMA poprzecznych fal ultradźwiękowych jest zazwyczaj około dwukrotnie większa od amplitudy wytwarzanych w tych samych warunkach fal podłużnych, gdyż dla większości metali prędkość fal poprzecznych jest w przybliżeniu dwukrotnie mniejsza od prędkości fal podłużnych. Fakt ten nie ma jednak większego znaczenia praktycznego, gdyż o wyborze rodzaju fali ultradźwiękowej w każdym konkretnym przypadku decydują zazwyczaj inne względy, np. łatwość wytworzenia w badanym obiekcie stałego pola magnetycznego o składowej normalnej lub stycznej. Oceniając wpływ gęstości materiału na skuteczność przetwarzania, można stwierdzić, że amplituda wytwarzanych fal ultradźwiękowych jest największa w metalach o małej gęstości (np. aluminium).

Przedstawiony wyżej opis matematyczny pozwala na wyznaczenie skuteczności wytwarzania fal ultradźwiękowych metodą elektromagnetyczną. Definiując skuteczność wytwarzania  $\eta$  płaskiej fali ultradźwiękowej przez płaską falę elektromagnetyczną padającą na powierzchnię przewodnika jako stosunek uśrednionych za okres natężeń fali ultradźwiękowej i elektromagnetycznej, tzn. stosunek średniej mocy fali akustycznej przechodzącej przez jednostkową powierzchnię prostopadłą do kierunku rozchodzenia się fali i średniej mocy fali elektromagnetycznej wnikającej do przewodzącej półprzestrzeni przez jednostkowy obszar jej powierzchni, możemy na podstawie prac [45, 46, 73] podać, że:

$$\eta = \frac{2B_{0x,t}^2}{\omega \rho c_{L,T} \delta (1 + \beta^2)} \quad (2.18)$$

Wzór ten obowiązuje zarówno dla podłużnych, jak i poprzecznych fal ultradźwiękowych. Dla podłużnej fali ultradźwiękowej wytwarzanej w aluminium w temperaturze 300 K  $\eta = 5,7 \cdot 10^{-5} B_0^2$  [46], czyli dla stosunkowo silnego stałego pola magnetycznego o indukcji np. 1 T skuteczność przetwarzania  $\eta < 0,01\%$ . Zbliżone wartości skuteczności  $\eta$  uzyskano w pracy [80], w której podczas tworzenia modelu matematycznego przetwarzania EMA dodatkowo uwzględniono tłumienie fal ultradźwiękowych w rozpatrywanym ośrodku.

Model matematyczny wytwarzania fal ultradźwiękowych przez płaską falę elektromagnetyczną pozwala również na porównanie skuteczności nadawczo-odbiorczych przetworników EMA dla różnych badanych metali. Jeżeli w konkretnym przetworniku ta sama cewka będzie wykorzystana zarówno do wytwarzania, jak i odbioru fal ultradźwiękowych, to zgodnie z pracami [46, 47, 74] moc elektryczna generowana w przetworniku podczas odbioru będzie określona wyrażeniem:

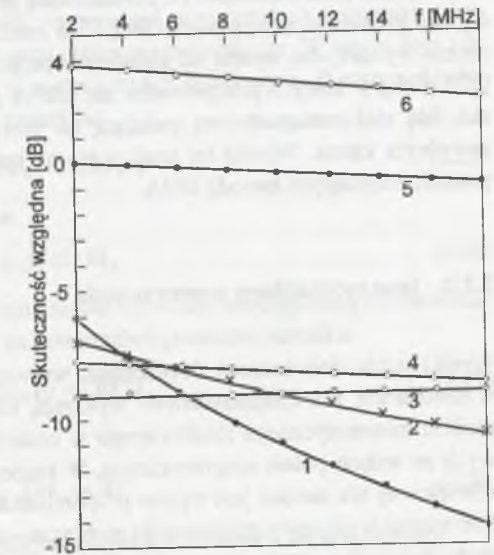
$$P_{\text{odb}} = K \frac{B_0^4}{\rho^2 c_{L,T}^2 (1 + \beta^2)^2} \quad (2.19)$$

gdzie  $K$  oznacza stałą zależną od parametrów konkretnego przetwornika i proporcjonalną do amplitudy prądu wzbudzającego. Zależność tej mocy od częstotliwości wynika z zależności od częstotliwości głębokości wnikania prądów wirowych  $\delta$ , która wchodzi w skład parametru  $\beta$ . Na rys. 2.4 przedstawiono wyznaczone teoretycznie na podstawie powyższego wzoru zależności względnej skuteczności nadawczo-odbiorczego przetwornika EMA na fale poprzeczne od częstotliwości dla różnych badanych metali [47]. Jako punkt odniesienia przyjęto skuteczność przetwornika dla aluminium przy częstotliwości 2 MHz.

Rysunek ten potwierdza sformułowany wcześniej wniosek, że przetworniki EMA będą najbardziej efektywne podczas badania lekkich metali (aluminium, magnez), gdy metale te są nieferromagnetyczne. Wykres dla stali należy traktować jedynie orientacyjnie, gdyż w metalach ferromagnetycznych mechanizm wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych metodą EMA jest o wiele bardziej złożony niż w metalach nieferromagnetycznych.

Z przedstawionych dotychczas rozważań wynika, że skuteczność przetworników EMA przeznaczonych do badania metali niemagnetycznych, tj. przetworników działających w oparciu o siłę Lorentza, przede wszystkim zależy od indukcji stałego pola magnetycznego. W pracach [47, 152] pokazano jednak, że pod względem amplitudy odbieranego sygnału przetworniki EMA mogą być porównywalne z konwencjonalnymi przetwornikami piezoelektrycznymi dopiero wtedy, gdy indukcja ta sięga 10 T. Skuteczność przetworników EMA może być jednak stosunkowo duża już przy słabszych indukcjach, gdy fale ultradźwiękowe wytwarzane są w metalach ferromagnetycznych, w których oprócz siły Lorentza dużą rolę odgrywają również inne mechanizmy przetwarzania, w których wykorzystuje się zjawisko magnetostrykcji lub siły magnetyczne.

Wyniki uzyskane podczas analizy wytwarzania fal ultradźwiękowych przez płaską falę elektromagnetyczną padającą normalnie na powierzchnię przewodzącej półprzestrzeni można wykorzystać do przybliżonej analizy konkretnych przetworników nadawczych, zwłaszcza gdy



Rys. 2.4. Skuteczność przetwarzania EMA (nadawanie - odbiór) w funkcji częstotliwości dla różnych metali: 1 - cyna, 2 - mosiądz, 3 - stal zawierająca 0,13% węgla, 4 - miedź, 5 - aluminium, 6 - magnez [47]

Fig. 2.4. EMA transduction efficiency (generation - reception) as a function of frequency for various metals: 1 - tin, 2 - brass, 3 - 0.13% carbon steel, 4 - copper, 5 - aluminium, 6 - magnesium [47]



szerokość uzwojenia cewki nadawczej jest duża (np. cewka spiralna o dużym w stosunku do promienia wewnętrznego promieniu zewnętrznym). W takim przypadku w pierwszym przybliżeniu przyjmuje się, że siły działające na powierzchnię ośrodka są skupione na obszarze stanowiącym rzut cewki nadawczej przetwornika na tę powierzchnię i wytworzona przez przetwornik fala elektromagnetyczna jest w tym obszarze płaska i rozchodzi się normalnie do powierzchni. Do zagadnienia tego powrócimy jeszcze w rozdziale 3. Powyższego założenia nie można jednak przyjąć w odniesieniu do cewek nadawczych o wąskim uzwojeniu, np. gdy fala ultradźwiękowa jest wytwarzana przez prostoliniowy przewód, gdyż wtedy fala elektromagnetyczna pada normalnie na powierzchnię przewodnika wyłącznie wzdłuż linii stanowiącej rzut przewodu na tę powierzchnię. Do analizy tego rodzaju przetworników nadawczych można wykorzystać opartą na zasadzie superpozycji metodykę zaproponowaną w pracach [122, 123], w których przeprowadza się analizę pola akustycznego wytwarzanego przez płaską falę elektromagnetyczną padającą na powierzchnię przewodzącej półprzestrzeni pod dowolnym kątem. Wyniki tej analizy nie są jednak zasadniczo wykorzystywane w innych pracach dotyczących metody EMA.

### 2.2.2. Inne mechanizmy przetwarzania

Wyniki wielu doświadczeń dotyczących wytwarzania fal ultradźwiękowych metodą EMA w materiałach ferromagnetycznych wykazują często znaczną rozbieżność w stosunku do modelu matematycznego zbudowanego w oparciu o zjawisko oddziaływania prądów wirowych ze stałym polem magnetycznym. W szczególności amplituda wytwarzanej fali ultradźwiękowej nie zawsze jest wprost proporcjonalna do indukcji stałego pola magnetycznego (lub sygnał wyjściowy przetwornika nadawczo-odbiorczego nie jest proporcjonalny do kwadratu indukcji) i często występuje maksimum tej amplitudy dla pewnej wartości indukcji. Poza tym w wielu przypadkach amplituda ta jest znacznie większa niż wynikałoby to z modelu opartego na sile Lorentza. Czasem także rodzaj wytwarzanej fali ultradźwiękowej jest inny niż oczekiwany dla danej konfiguracji przetwornika. Dowodzi to faktu, że w materiałach ferromagnetycznych istnieją również inne, niż wynikające z siły Lorentza, mechanizmy przetwarzania energii fali elektromagnetycznej na energię pola ultradźwiękowego.

Powszechnie przyjmuje się, że pod wpływem pola elektromagnetycznego w ferromagnetykach działają siły objętościowe trzech rodzajów:

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_L + \mathbf{f}_M + \mathbf{f}_{MS}, \quad (2.20)$$

gdzie  $\mathbf{f}_L$  oznacza siłę Lorentza,  $\mathbf{f}_M$  - siłę wynikającą z własności magnetycznych materiału (siłę magnetyczną), a  $\mathbf{f}_{MS}$  jest składową sumarycznej siły  $\mathbf{f}$  wynikającą ze zjawiska magnetostrykcji (tzn. zjawiska odkształcenia ciała w wyniku jego namagnesowania).

W najbardziej ogólnej postaci siły te mogą być wyrażone w następujący sposób [137, 196, 204]:

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{j} \times \mathbf{B}_0, \quad (2.21)$$

$$\mathbf{f}_M = (\nabla \mathbf{B}) \cdot \mathbf{M}_0, \quad (2.22)$$

$$\mathbf{f}_{MS} = \nabla \cdot \mathbf{T}_{MS} = \nabla \cdot (\mathbf{e} \cdot \mathbf{H}) \quad (2.23)$$

W powyższych wyrażeniach  $\mathbf{B}_0$  oznacza indukcję stałego, a  $\mathbf{B}$  indukcję zmiennego pola magnetycznego w metalu;  $\mathbf{M}_0$  jest wektorem magnetyzacji;  $\mathbf{T}_{MS}$  oznacza tensor naprężeń wynikających ze zjawiska magnetostrykcji, a  $\mathbf{e}$  jest tensorem współczynników magnetostrykcyjnych materiału.

Siły magnetyczne mają dodatkową składową o rozkładzie powierzchniowym [196]:

$$\mathbf{F}_M = -\mathbf{n}(\mathbf{B} - \mathbf{M}_0), \quad (2.24)$$

przy czym  $\mathbf{n}$  jest wektorem jednostkowym normalnym do powierzchni materiału.

W pracach [180, 182] wyrażenia opisujące siły występujące w materiałach ferromagnetycznych opiera się na klasycznym podejściu do pola elektromagnetycznego. W ujęciu tym siły magnetyczne objętościowe przedstawiane są w postaci dwóch składowych. Pierwsza składowa wynika z niejednorodności magnetycznej materiału:

$$\mathbf{f}_{M1} = -0,5\mu_0 H^2 \text{ grad } \mu, \quad (2.25)$$

a druga jest związana z magnetyzacją ośrodka:

$$\mathbf{f}_{M2} = -\mu_0 \mathbf{H} \text{ div } \mathbf{M}_0. \quad (2.26)$$

Siłom tym towarzyszą dwie składowe powierzchniowe wywołane nieciągłością odpowiednio przenikalności magnetycznej i magnetyzacji na powierzchni granicznej ośrodka:

$$\mathbf{F}_{M1} = 0,5\mu_0 (\mu - 1) H^2 \mathbf{n} \quad (2.27)$$

oraz

$$\mathbf{F}_{M2} = \mu_0 (\mathbf{M}_0 \cdot \mathbf{n}) \mathbf{H}. \quad (2.28)$$

Objętościową i powierzchniową gęstość sił magnetostrykcji przedstawia się w postaci:

$$\mathbf{f}_{MS} = 0,5\mu_0 \text{ grad} \left( H^2 \rho \frac{\partial \mu}{\partial \rho} \right) \quad (2.29)$$

lub

$$\mathbf{f}_{MS} = \text{grad}(aB) \quad (2.30)$$

i

$$\mathbf{F}_{MS} = -0,5\mu_0 H^2 \left( \rho \frac{\partial \mu}{\partial \rho} \right) \mathbf{n}, \quad (2.31)$$

gdzie  $\rho$  jest gęstością materiału, zaś  $a$  oznacza stałą magnetostrykcji materiału.

Niezależnie od sposobu analitycznego przedstawienia sił występujących w materiałach ferromagnetycznych analiza teoretyczna wytwarzania fal ultradźwiękowych metodą EMA przy uwzględnieniu wymienionych wyżej dodatkowych mechanizmów przetwarzania jest bardzo trudna - nawet w najprostszym przypadku, gdy wymuszeniem jest płaska fala elektromagnetyczna - i praktycznie możliwa tylko przy wykorzystaniu metod numerycznych. Ze względu na nieliniową charakterystykę magnesowania ferromagnetyków funkcje wyrażające odpowiednie siły są nieliniowe, a współczynniki magnetostrykcji konkretnego materiału zmieniają

się w szerokich granicach w zależności od natężenia pola magnetycznego. Oprócz tego warunkiem powstania w materiale fal ultradźwiękowych jest wytworzenie w nim sił magnetycznych lub sił wynikających ze zjawiska magnetostrykcji o nierównomiernym rozkładzie przestrzennym, gdyż w przeciwnym razie następowalby ruch ciała jako całości (siły magnetyczne) lub jednocześnie jego odkształcenie w całej objętości (siły magnetostrykcji). Powyższe trudności powodują, że próby analizy teoretycznej przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego w materiałach ferromagnetycznych są podejmowane po przyjęciu wielu założeń upraszczających.

Wprawdzie w pracy [137] przedstawia się pełny model matematyczny, który przy użyciu metody elementów skończonych pozwala na numeryczną analizę wytwarzania fal ultradźwiękowych w ferromagnetykach przez konkretne przetworniki, jednak ze względu na brak wystarczających danych dotyczących magnetyzacji i współczynników magnetostrykcyjnych rozpatrywanego ośrodka opis wyników praktycznej realizacji opracowanego algorytmu ogranicza się do analizy przetwornika typu meander z uwzględnieniem tylko sił wynikających z oddziaływania prądów wirowych ze stałym polem magnetycznym [138].

Siły charakterystyczne dla materiałów ferromagnetycznych uwzględniono np. w pracy [182], w której rozpatrzono płaską falę elektromagnetyczną padającą na powierzchnię ferromagnetyka, dla którego założono liniową zależność indukcji pola magnetycznego od jego natężenia. W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono między innymi, że w ferromagnetykach o względnie dużej konduktywności i nie wykazujących własności magnetostrykcyjnych efektywność wytwarzania fal poprzecznych jest wielokrotnie większa niż fal podłużnych, a efektywne wytwarzanie fal podłużnych może odbywać się dla częstotliwości dopiero powyżej 10 MHz, czyli poza zakresem częstotliwości normalnie wykorzystywanym w defektoskopii ultradźwiękowej. Dzięki zjawisku magnetostrykcji fale podłużne mogą natomiast być skutecznie wytwarzane w magnetodielektrykach.

Z kolei w pracach [196, 204] podaje się, że przy wytwarzaniu fal poprzecznych rozchodzących się skośnie do powierzchni próbki udział zjawiska magnetostrykcji jest pomijalnie mały, gdy wektor indukcji stałego pola magnetycznego jest prostopadły do powierzchni badanego ferromagnetyka. Gdy stałe pole magnetyczne jest skierowane równoległe do powierzchni ferromagnetyka i równoległe do uzwojenia cewki nadawczej (np. typu meander), to siła Lorentza znika, ale wtedy magnetostrykcja może mieć znaczący udział w procesie przetwarzania, co pokazano również w pracy [120].

Jednym z głównych powodów podjęcia prac nad przetwornikami EMA była przewidywana możliwość ich wykorzystania do badania gorących wyrobów o temperaturze sięgającej 1000°C, gdy bezstykowe wytwarzanie i odbiór fal ultradźwiękowych nabiera podstawowego znaczenia wobec niemożności zastosowania w tych warunkach ciekłego ośrodka sprzęgającego. Zastosowaniom takim dodatkowo sprzyja potwierdzone w wielu pracach eksperymentalnych [24, 25, 83, 106, 148, 160, 201, 202, 208] zjawisko polegające na znacznym zwiększeniu amplitudy generowanych metodą EMA fal podłużnych, gdy temperatura badanej próbki, wykonanej z materiału ferromagnetycznego (najczęściej żelazo, stale węglowe i stopowe, inwar (stop żelaza i niklu z domieszką węgla), nikiel), jest bliska temperatury punktu Curie, która dla żelaza i stali o niskiej zawartości węgla wynosi 768°C. Przykładową zależność amplitudy wytwarzanych metodą EMA fal ultradźwiękowych od temperatury pokazano na rys. 2.5.

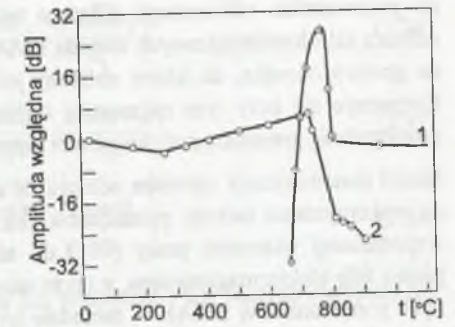
Maksymalna amplituda sygnału odbieranego przez przetwornik nadawczo-odbiorczy na fale podłużne może w pobliżu temperatury Curie sięgać kilkudziesięciu miliwoltów (np. [148], w stali chromowej); dla zwykłych stali o niskiej zawartości węgla wynosi ona zazwyczaj od kilku do kilkunastu miliwoltów i maleje ze wzrostem zawartości węgla w stali, spadając do kilkuset mikrowoltów dla stali o dużej zawartości węgla (0,8 - 2%) [83].

Zjawisko znacznego wzrostu amplitudy fal podłużnych wytwarzanych w próbkach ferromagnetycznych o temperaturze bliskiej temperatury punktu Curie powszechnie tłumaczy się znacznie zwiększoną magnetostrycją objętościową materiału, gdy staje się on w tej temperaturze paramagnetykiem. W kilku pracach podejmuje się próby teoretycznej analizy tego zjawiska, rozwiązując równanie falowe drgań sprężystych z uwzględnieniem wymienionych wcześniej trzech rodzajów sił występujących w ferromagnetykach [26, 81, 105, 106, 198]. Prace te mają na celu przede wszystkim uzasadnienie tezy, że w temperaturze Curie dominującym mechanizmem przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego jest mechanizm oparty na magnetostrykcji objętościowej materiału i amplituda fali podłużnej wytwarzanej w tej temperaturze osiąga wartość maksymalną. Ze względu jednak na trudność uwzględnienia nieliniowości ferromagnetyka i uzyskania dokładnych i pełnych wartości eksperymentalnych, charakteryzujących własności magnetyczne i magnetostrykcyjne materiału, wyniki tych rozważań są interesujące przede wszystkim z poznawczego punktu widzenia, a możliwość ich wykorzystania do analizy konkretnych przetworników EMA, zwłaszcza do optymalizacji warunków ich pracy, jest problematyczna.

Do analizy wpływu wymienionych w tym rozdziale trzech mechanizmów na ogólny proces przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego powrócimy jeszcze podczas omawiania konkretnych przetworników.

### 2.3. Odbiór płaskiej fali ultradźwiękowej

Analiza teoretyczna odbioru fal ultradźwiękowych metodą elektromagnetyczno-akustyczną znajduje w literaturze znacznie słabsze odzwierciedlenie, niż ma to miejsce w odniesieniu do wytwarzania fal tą metodą. Podobnie jest jednak w przypadku klasycznej teorii wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych przy użyciu przetworników piezoelektrycznych - w większości prac poświęconych tej tematyce omawia się głównie przetworniki nadawcze (np. w pracy [142]). Wynika to przede wszystkim z trudności dostatecznie dokładnego, a przy tym stosunkowo prostego, opisu pola akustycznego w obrębie wiązki fali ultradźwiękowej dochodzącej



Rys. 2.5. Przykładowa zależność amplitudy fal ultradźwiękowych wytwarzanych metodą EMA w miękkiej stali od temperatury: 1 - fala podłużna, 2 - fala poprzeczna [202]

Fig. 2.5. Example dependence of the EMA generated ultrasonic wave amplitude in mild steel on temperature: 1 - longitudinal wave, 2 - transverse wave [202]

do przetwornika odbiorczego. Dlatego też w większości prac teoretycznych dotyczących odbioru fal ultradźwiękowych metodą EMA zakłada się, że fala ultradźwiękowa dochodząca do granicy ośrodka, do której zbliżony jest przetwornik odbiorczy EMA, jest falą płaską. Rozpatruje się przy tym najczęściej ogólny przypadek fali ultradźwiękowej padającej na powierzchnię graniczną pod dowolnym kątem (np. [16, 17, 119, 147]).

Model matematyczny zjawiska odbioru fal ultradźwiękowych metodą EMA opiera się często na wykorzystaniu metody potencjałów [16, 17, 147] (metodę tę wykorzystano również we wspomnianej wcześniej pracy [181] do analizy wytwarzania fal ultradźwiękowych przez płaską falę elektromagnetyczną, a także stosuje się ją do analizy omawianych dalej konkretnych przetworników EMA). W metodzie tej wektor drgań cząsteczek ośrodka wokół położenia równowagi przedstawia się w postaci:

$$\mathbf{u} = \text{grad } \varphi + \text{rot } \psi, \quad (2.32)$$

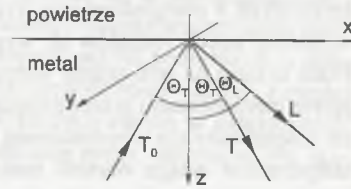
gdzie  $\varphi$  jest potencjałem skalarnym, a  $\psi$  - potencjałem wektorowym pola akustycznego. Pierwszy i drugi składnik tego równania reprezentują odpowiednio fale podłużne i poprzeczne. Ze względu na zjawisko transformacji fal ultradźwiękowych padających ukośnie na granicę dwóch ośrodków w modelu matematycznym odbioru fal ultradźwiękowych metodą EMA drgania obu rodzajów należy uwzględnić jednocześnie - niezależnie od rodzaju fali padającej.

Podstawowy model matematyczny odbioru płaskich fal ultradźwiękowych rozpatrzmy na przykładzie harmonicznej, spolaryzowanej pionowo (SV) poprzecznej fali ultradźwiękowej rozchodzącej się w jednorodnej, nieferromagnetycznej i przewodzącej prąd półprzewodniku. Analizę tego przypadku przedstawiono szczegółowo w pracy [16]. Załóżmy, że rozpatrywana fala pada pod kątem  $\Theta_T$  na powierzchnię graniczną ośrodka, nad którą znajduje się powietrze (rys. 2.6). Przy skierowanym normalnie do powierzchni granicznej stałym polu magnetycznym zbliżony do tej powierzchni przetwornik odbiorczy będzie reagować na składową styczną drgań sprężystych ośrodka, której amplituda  $u_x$  wynika ze wzoru (2.32):

$$u_x = \frac{\partial \varphi_L}{\partial x} - \frac{\partial (\psi_{T0} + \psi_T)}{\partial z}. \quad (2.33)$$

W wyrażeniu tym pominięto występującą w funkcji rot pochodną względem współrzędnej  $y$ , gdyż przy założeniu płaskiej fali analiza sprowadza się do zagadnienia dwuwymiarowego i wszystkie wielkości są niezależne od tej współrzędnej. Potencjały  $\varphi_L$ ,  $\psi_{T0}$  i  $\psi_T$  oznaczają odpowiednio potencjał odbitej (transformowanej) fali podłużnej oraz potencjały padającej i odbitej fali poprzecznej, przy czym ze względu na przyjęty kierunek drgań w fali padającej (w płaszczyźnie XZ) tylko składowa  $y$  potencjału wektorowego  $\psi$  jest różna od zera.

W przyjętym układzie współrzędnych (rys. 2.6) potencjały te są określone następującymi wyrażeniami [16]:



Rys. 2.6. Płaska fala poprzeczna o polaryzacji SV padająca na granicę metal - powietrze

Fig. 2.6. Plane SV wave incident onto a metal - air boundary

$$\varphi_L = \Phi \exp i\omega \left( t - \frac{z \cos \Theta_L}{c_L} - \frac{x \sin \Theta_L}{c_L} \right), \quad (2.34)$$

$$\psi_{T0} = \Psi_0 \exp i\omega \left( t + \frac{z \cos \Theta_T}{c_T} - \frac{x \sin \Theta_T}{c_T} \right), \quad (2.35)$$

$$\psi_T = \Psi \exp i\omega \left( t - \frac{z \cos \Theta_T}{c_T} - \frac{x \sin \Theta_T}{c_T} \right), \quad (2.36)$$

gdzie  $\Theta_L$  i  $\Theta_T$  oznaczają odpowiednio kąt odbicia fali podłużnej i kąt padania (odbicia) fali poprzecznej i są one związane ze sobą prawem Snelliusa:

$$\frac{\sin \Theta_L}{c_L} = \frac{\sin \Theta_T}{c_T}. \quad (2.37)$$

Amplitudy potencjałów odbitej fali podłużnej  $\Phi$  i poprzecznej  $\Psi$  są uzależnione od amplitudy potencjału padającej fali poprzecznej  $\Psi_0$  w następujący sposób:

$$\Phi = -R_{TL} \Psi_0 \quad \Psi = R_{TT} \Psi_0, \quad (2.38)$$

przy czym  $R_{TL}$  oznacza współczynnik odbicia fali podłużnej (współczynnik transformacji fali poprzecznej na podłużną), a  $R_{TT}$  jest współczynnikiem odbicia fali poprzecznej.

Z kolei amplitudę potencjału padającej fali poprzecznej można wyznaczyć bezpośrednio na podstawie zależności (2.32):

$$u_{T0} = -i\omega \frac{\Psi_0}{c_T}. \quad (2.39)$$

Podstawienie zależności (2.34) - (2.39) do wzoru (2.33) pozwala na wyznaczenie amplitudy składowej  $u_x$  drgań ośrodka w funkcji amplitudy padającej fali poprzecznej i kąta padania.

W wyniku drgań przewodzącego ośrodka w stałym polu magnetycznym o indukcji  $B_0$  w ośrodku tym indukowane są prądy wirowe, których rozkład przestrzenny dany jest wyrażeniem:

$$\mathbf{j} = \sigma (\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0), \quad (2.40)$$

które w rozpatrywanym przypadku sprowadza się do równania skalarnego:

$$j = j_y = -\sigma v_x B_0, \quad (2.41)$$

w którym  $\sigma$  oznacza konduktywność metalu, a  $v_x$  jest odpowiednią składową prędkości akustycznej  $\mathbf{v}$ ;  $v_x = \frac{du_x}{dt}$ .

Po wyznaczeniu rozkładu gęstości prądów wirowych dalsza analiza odbioru fal ultradźwiękowych metodą EMA sprowadza się do zagadnienia elektromagnetycznego, tj. do rozwiązania równań Maxwella. Równania te można rozwiązać np. popularną w teorii elektromagnetyzmu metodą polegającą na wprowadzeniu potencjału wektorowego pola elektromagnetycznego  $\mathbf{A}$  według zależności:

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (2.42)$$

z dodatkowym warunkiem:

$$\text{div } \mathbf{A} = 0. \quad (2.43)$$

Powyższe wyrażenia podstawiamy do równań Maxwella (2.1), (2.2) w postaci obowiązującej dla pola harmonicznego oraz wykorzystujemy zależność (2.3), w której po prawej stronie oprócz gęstości prądu przewodzenia wystąpi dodatkowo gęstość prądu wynikającego z drgań ośrodka w stałym polu magnetycznym (zależność (2.40)). Po uwzględnieniu tożsamości wektorowej (2.4) dochodzimy ostatecznie do tzw. równania Helmholtza, które opisuje pole elektromagnetyczne w przewodzącym ośrodku:

$$\nabla^2 \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} = -\mu\mu_0 \mathbf{j}, \quad (2.44)$$

gdzie

$$k^2 = \omega^2 \mu\mu_0 \varepsilon \varepsilon_0 - i\omega\mu\mu_0 \sigma; \quad (2.45)$$

$\varepsilon_0$  oznacza przenikalność elektryczną próżni, a  $\varepsilon$  - przenikalność elektryczną względną rozpatrywanego ośrodka.

Ponieważ w rozpatrywanym przypadku zmienne pole magnetyczne wytwarzane przez prądy wirowe (2.40) ma składowe leżące tylko w płaszczyźnie XZ, to zgodnie z definicją (2.42) jedyną niezerową składową potencjału  $\mathbf{A}$  jest składowa  $A_y = A$  i równanie (2.44) sprowadza się do równania skalarnego:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + k^2 A = -\mu\mu_0 j. \quad (2.46)$$

Dla powietrza nad metalem można przyjąć  $\sigma \cong 0$  i  $\mu = \varepsilon = 1$ , w związku z czym

$$k^2 = k_1^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 = \frac{\omega^2}{c^2}, \quad \text{gdzie } c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \text{ oznacza prędkość fali elektromagnetycznej}$$

w powietrzu (próżni). Oprócz tego w powietrzu  $j = 0$  (nie wynika to jednoznacznie z warunku  $\sigma = 0$ , gdyż prąd może być narzucony przez czynniki zewnętrzne, jak to ma miejsce w przypadku przetworników nadawczych) i równanie (2.46) można dla powietrza napisać w postaci:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + k_1^2 A = 0. \quad (2.47)$$

Z kolei w metalu można pominąć prąd przesunięcia i wtedy  $k^2 = k_2^2 = -i\omega\mu\mu_0\sigma = -\frac{2i}{\delta^2}$ ,

gdzie  $\delta$  oznacza głębokość wnikania prądów wirowych, i równanie Helmholtza dla metalu można ostatecznie napisać w postaci:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} + k_2^2 A = -\mu\mu_0 j. \quad (2.48)$$

Rozwiązania obu powyższych równań opisujące rozkład potencjału  $\mathbf{A}$  (tj. w rozpatrywanym przypadku składowej  $A_y = A$ ) w powietrzu i w metalu muszą spełniać na granicy ośrodków ( $z = 0$ ) warunki graniczne:

$$A_{\text{pow}} = A_{\text{metal}}, \quad (2.49)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_{\text{pow}} = \left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)_{\text{metal}}, \quad (2.50)$$

$$\left(\frac{\partial A}{\partial z}\right)_{\text{pow}} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A}{\partial z}\right)_{\text{metal}}, \quad (2.51)$$

które wynikają bezpośrednio z warunków ciągłości odpowiednio składowych stycznych natężenia pola elektrycznego oraz składowych normalnych indukcji i stycznych natężenia pola magnetycznego.

Po wyznaczeniu rozkładu potencjału  $A_{\text{pow}}$  w powietrzu nad metalem, w którym rozchodzi się płaska fala ultradźwiękowa, na podstawie równania Maxwella (2.2) i zależności (2.42) można określić rozkład natężenia pola elektrycznego w powietrzu (w rozpatrywanym przypadku pole to ma tylko składową styczną skierowaną w kierunku osi Y):

$$E = E_y = -i\omega A_{\text{pow}}, \quad (2.52)$$

a następnie obliczyć napięcie indukowane w cewce odbiorczej przetwornika EMA jako całkę liniową po konturze tej cewki:

$$U_{\text{odb}} = \int_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}. \quad (2.53)$$

W pracy [16] podaje się rozwiązanie równania Helmholtza dla powietrza, tzn. zespoloną amplitudę potencjału  $A$  w powietrzu na wysokości  $h$  nad powierzchnią metalu, w postaci:

$$A_{\text{pow}} = B_0 u_{T_0} q_T(\eta) \exp(-\lambda h) \exp i(\omega t - bx), \quad (2.54)$$

gdzie  $q_T(\eta)$  oznacza zespolony współczynnik przetwarzania (złożona funkcja trygonometryczna kąta padania  $\Theta_T$ );  $\lambda^2 = b^2 - k_1^2$ ;  $b^2 = k_T^2 \sin^2 \Theta_T$ ;  $k_T = \frac{\omega}{c_T}$ . Zgodnie z tą zależnością

amplituda potencjału  $A_{\text{pow}}$ , a tym samym natężenie pola elektrycznego w powietrzu, maleje wykładniczo ze wzrostem odległości od powierzchni metalu i szybkość tych zmian w zasadniczym stopniu zależy od liczby falowej padającej fali ultradźwiękowej i kąta padania, gdy kąt ten wynosi przynajmniej kilka stopni.

W podobny do wyżej opisanego sposób w pracy [147] przeprowadzono analizę odbioru metodą EMA płaskiej podłużnej fali ultradźwiękowej padającej ukośnie na powierzchnię graniczną metal-powietrze. W pracy tej dodatkowo uwzględniono mechanizmy przetwarzania charakterystyczne dla materiałów ferromagnetycznych (lokalna zmiana namagnesowania pod wpływem drgań sprężystych, zjawisko magnetostrykcji). Zjawiska te uwzględnia się powiększając gęstość prądów wirowych indukowanych w materiale (obliczoną ze wzoru (2.40)) o składową  $\mathbf{j}_{\text{mag}}$ , określoną na podstawie zależności:

$$\mathbf{j}_{\text{mag}} = \text{rot } \mathbf{M}, \quad (2.55)$$

przy czym zakłada się liniową zależność wektora magnetyzacji  $\mathbf{M}$  od naprężeń powstających w materiale pod wpływem fali ultradźwiękowej. W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono w szczególności, że dla niektórych ferromagnetyków, np. dla inwaru, amplituda sygna-

łu odbieranego dzięki występowaniu zjawisk magnetosprężystych może nawet o trzy rzędy przewyższać sygnał wynikający z indukowania prądów wirowych wskutek drgań powierzchni metalu w stałym polu magnetycznym.

Analizę odbioru płaskich podłużnych i poprzecznych fal ultradźwiękowych padających pod dowolnym kątem na granicę ferromagnetyka przy dowolnie skierowanym stałym polu magnetycznym przeprowadzono także w pracy [119], dochodząc do wyrażen opisujących natężenie składowej stycznej pola elektrycznego w powietrzu nad metalem. W pracy tej do opisu zmian pola magnetycznego w metalu pod wpływem drgań sprężystych wykorzystano tensory przenikalności magnetycznych i współczynników magnetostrykcji.

Bezpośrednie wykorzystanie przedstawionego w tym rozdziale modelu matematycznego odbioru fal ultradźwiękowych metodą EMA do ogólnej oceny własności przetworników odbiorczych jest trudne, zwłaszcza dla materiałów ferromagnetycznych, dla których uzyskane rozwiązania w bardzo dużym stopniu zależą od punktu pracy na krzywej magnesowania, kąta padania i częstotliwości fali ultradźwiękowej oraz rodzaju badanego materiału. Rozwiązania te wykorzystywane są do oceny charakterystyk konkretnych przetworników odbiorczych i do zagadnienia tego powrócimy w dalszej części pracy (rozdział 3).

### 3. MODELE MATEMATYCZNE I WŁASNOŚCI PRZETWORNIKÓW EMA

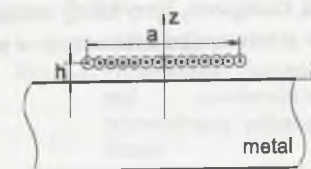
#### 3.1. Wprowadzenie

Przedstawione w poprzednim rozdziale modele matematyczne przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego stworzone zostały, przy założeniu że źródłem fali ultradźwiękowej jest płaska fala elektromagnetyczna, tzn. modele te oderwane były od jakichkolwiek realnych przetworników. Podejście takie pozwala na zbadanie wpływu na proces przetwarzania takich czynników, jak własności ośrodka, w którym wytwarzana jest fala ultradźwiękowa, częstotliwość fali elektromagnetycznej (ultradźwiękowej), indukcja stałego pola magnetycznego i temperatura. Określenie na drodze teoretycznej własności realnych przetworników wymaga rozwiązania równań różniczkowych tworzących model matematyczny przetwarzania z uwzględnieniem warunków narzucanych przez konfigurację konkretnego przetwornika. Zagadnieniom tym poświęcona jest duża część tego rozdziału.

Dla pewnej klasy przetworników EMA możliwe jest jednak wyprowadzenie elementarnych zależności, przy założeniu że wytwarzana przez ten przetwornik fala ultradźwiękowa jest w ograniczonym przez kontury przetwornika obszarze falą płaską [14, 149, 151, 196]. Uzwojenie takiego przetwornika może mieć postać pokazaną na rys. 3.1. Składa się ono z szeregu równoległych prostoliniowych przewodów rozmieszczonych z gęstością  $n$  zwojów na jednostkę długości na wysokości  $h$  nad powierzchnią przewodnika (metal).

Jeżeli szerokość uzwojenia  $a$  jest znacznie większa od odległości  $h$ , to można założyć, że fala elektromagnetyczna bezpośrednio pod tym uzwojeniem jest falą płaską. Przyjmując dodatkowo, że głębokość wnikania prądów wirowych jest znacznie mniejsza od długości wytwarzanej fali ultradźwiękowej, możemy dalej założyć, że prądy wirowe indukowane są na powierzchni przewodnika i ich rozkład bezpośrednio pod cewką jest równomierny i określony wyrażeniem:

$$j = j_y = nI_m, \quad (3.1)$$



Rys. 3.1. Przetwornik EMA złożony z równoległych przewodów

Fig. 3.1. EMA transducer made of parallel wires

przy czym  $I_m$  oznacza amplitudę prądu sinusoidalnie zmiennego płynącego przez każdy przewód uzwojenia.

Po wytworzeniu na powierzchni metalu stałego stycznego pola magnetycznego o indukcji  $B_{0x}$  na powierzchnię tę będzie działać siła o rozkładzie powierzchniowym (jest to w istocie ciśnienie wywierane na tę powierzchnię):

$$F_z = nI_m B_{0x}. \quad (3.2)$$

Zgodnie z jedną z podstawowych zależności akustyki amplituda prędkości akustycznej cząsteczek ośrodka jest określona wyrażeniem:

$$v_z = \frac{F_z}{\rho c_L} = \frac{nI_m B_{0x}}{\rho c_L}. \quad (3.3)$$

Powstała fala ultradźwiękowa rozchodzi się w głąb ośrodka i może być odebrana przez przetwornik odbiorczy umieszczony przy przeciwległej powierzchni ośrodka lub po odbiciu od tej powierzchni może być odebrana np. przez ten sam przetwornik, który wykorzystano do wytworzenia fali. Jeżeli pominiemy tłumienie fali ultradźwiękowej w ośrodku i rozbieżność jej wiązki, to po dojściu tej fali do powierzchni granicznej ośrodka (poddanej działaniu stałego stycznego pola magnetycznego) na powierzchni tej wyindukowane zostaną prądy wirowe, a związane z nimi pole elektryczne opisane jest zależnością:

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}_0, \quad (3.4)$$

czyli w rozpatrywanym przypadku:

$$E_y = 2v_z B_{0x}, \quad (3.5)$$

przy czym czynnik 2 wynika z faktu, że przy odbiciu normalnie padającej fali ultradźwiękowej od granicy ciało stałe - powietrze amplituda prędkości akustycznej na tej powierzchni granicznej jest dwukrotnie większa (w istocie jest tak dla granicy ciało stałe - próżnia; dla powietrza współczynnik ten jest nieznacznie mniejszy) od prędkości akustycznej fali padającej.

Całkując to natężenie pola elektrycznego wzdłuż długości  $b$  każdego przewodu tworzącego uzwojenie przetwornika odbiorczego (o szerokości  $a$ ) i zakładając, że przewody te połączone są szeregowo, otrzymamy ostatecznie wyrażenie opisujące amplitudę napięcia indukowanego w przetworniku odbiorczym w postaci:

$$U_{odh} = 2 \frac{n^2 B_{0x}^2}{\rho c_L} I_m a b, \quad (3.6)$$

gdy do odbioru wykorzystana się przetwornik taki sam jak nadawczy.

Wyrażenie to można uogólnić na przetworniki o dowolnym kształcie cewki, które wytwarzają fale podłużne lub poprzeczne rozchodzące się normalnie do powierzchni metalu, pod warunkiem że szerokość uzwojenia jest znacznie większa od jego odległości od powierzchni metalu [149, 151, 196]:

$$U_{odh} = 2 \frac{n^2 B_{0x,z}^2}{\rho c_{L,T}} I_m S \quad (3.7)$$

dla przetwornika z jedną cewką nadawczo-odbiorczą lub:

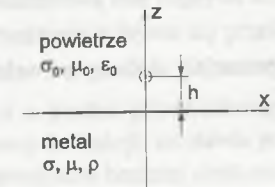
$$U_{odh} = 2 \frac{n_1 n_2 B_{01x,z} B_{02x,z}}{\rho c_{L,T}} I_m S_1 S_2, \quad (3.8)$$

gdy do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych wykorzystuje się odrębne cewki (kontur cewki odbiorczej musi mieścić się w obrębie wiązki fali ultradźwiękowej). W powyższych wyrażeniach  $S$  oznacza powierzchnię cewki, a indeksy 1 i 2 odnoszą się odpowiednio do cewki nadawczej i odbiorczej.

Wzory (3.7) i (3.8) można wykorzystać do szacunkowej oceny maksymalnej wartości sygnału odbieranego przez normalne przetworniki EMA na fale podłużne lub poprzeczne podczas badania próbek nieferromagnetycznych. W praktyce należy oczekiwać, że sygnał ten będzie miał mniejszą amplitudę wskutek takich - nie uwzględnionych w powyższym prostym modelu - zjawisk, jak zmniejszanie się gęstości prądów wirowych podczas oddalania przetwornika od powierzchni badanego obiektu (efekt unoszenia), rozbieżność wiązki ultradźwiękowej, a także tłumienie fali ultradźwiękowej w ośrodku. Zjawiska te uwzględniane są w dokładniejszych modelach realnych przetworników, zebranych na podstawie literatury i przedstawionych w kolejnych częściach niniejszego rozdziału.

### 3.2. Prostoliniowy przewód

Prostoliniowy przewód o dążącej do zera średnicy i nieskończonej długości jest najbardziej elementarnym modelem realnych uzwojeń przetworników EMA. Załóżmy, że przewód ten umieszczony jest na wysokości  $h$  nad powierzchnią metalicznej półprzestrzeni (rys. 3.2), równoległy do osi  $Y$ , i zasilany jest prądem sinusoidalnie zmiennym o amplitudzie  $I_m$ . Wypełnioną metalem półprzestrzeń będziemy uważać za ośrodek izotropowy i jednorodny o konduktywności  $\sigma$ , względnej przenikalności magnetycznej  $\mu$  i gęstości  $\rho$ . Założymy ponadto, że powietrze nad metalem charakteryzuje się konduktywnością  $\sigma_0 \equiv 0$ , przenikalnością magnetyczną  $\mu_0$  i przenikalnością dielektryczną  $\epsilon_0$ .



Rys. 3.2. Prostoliniowy przewód nad powierzchnią przewodzącej półprzestrzeni

Fig. 3.2. Straight wire over the surface of a conducting half-space

Jedną z pierwszych publikacji poświęconych analizie takiego przetwornika nadawczego jest praca [169], w której rozwiązuje się równania Maxwella wprowadzając potencjał wektorowy pola magnetycznego  $\mathbf{A}$  (2.42). W rozpatrywanym przypadku potencjał ten ma tylko składową  $A_y = A$ , która stanowi rozwiązanie odpowiednio uproszczonego do postaci skalarnej równania Helmholtza (2.44).

Po przyjęciu szeregu założeń upraszczających i założeniu, że w powierzchniowej warstwie metalu wytwarzane jest stałe styczne pole magnetyczne o indukcji  $B_{0x}$ , wyprowadza się ostatecznie wyrażenie określające rozkład ciśnienia akustycznego  $p$  (wynikającego z siły Lorentza) działającego na powierzchnię metalu w postaci [169]:

$$p = \mu_0 \mu \frac{I_m^2 h^2}{4\pi(h^2 + y^2)} (1 + \cos 2\omega t) + \frac{I_m h B_{0x}}{\pi(h^2 + y^2)} \cos \omega t. \quad (3.9)$$

Powyższe wyrażenie wskazuje na interesującą właściwość metody EMA polegającą na możliwości wytwarzania fal ultradźwiękowych bez udziału stałego pola magnetycznego. W tym przypadku siła Lorentza wynika z oddziaływania prądów wirowych ze zmiennym polem magnetycznym wytwarzanym przez uzwojenie przetwornika, a częstotliwość wytwarzanej w ten sposób fali ultradźwiękowej jest dwukrotnie wyższa od częstotliwości prądu płynącego przez to uzwojenie (pierwszy składnik wzoru (3.9)). Proste obliczenia wskazują jednak, że aby amplitudy obu składowych drgań ultradźwiękowych we wzorze (3.9) były porównywalne, amplituda prądu w przewodzie musi przy np.  $B_{0x} = 0,3 \text{ T}$  i  $h = 1,0 \text{ mm}$  wynosić około  $1000 \text{ A}$  [73].

Próbę dokładnego wyznaczenia rozkładu pola akustycznego wytwarzanego przez prostoliniowy przewód podjęto w pracy [185]. Założono tam, że stałe pole magnetyczne ma dwie składowe  $B_{0x}$  i  $B_{0z}$ , a powietrze nad metalem charakteryzuje się niewielką konduktywnością  $\sigma_0$  (aby zapewnić analityczność rozwiązań). Rozwiązując równania Maxwella dla pojedynczego przewodu, otrzymuje się rozkład gęstości prądów wirowych w metalu w postaci [185]:

$$j = j_y = \frac{i\omega\mu\mu_0\sigma I_m}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-q_1 h + ikx + qz)}{\mu q_1 + q} dk, \quad (3.10)$$

w której  $q^2 = k^2 - i\omega\mu\mu_0\sigma$ ,  $q_1^2 = k^2 - i\omega\mu_0\sigma_0$ , a  $k$  jest zmienną całkowania.

Rozkład gęstości objętościowej siły Lorentza opisany jest dwiema składowymi:

$$f_x = j_y B_{0z}, \quad f_z = -j_y B_{0x}. \quad (3.11)$$

Poszukiwany rozkład pola akustycznego wytwarzanego przez przewód przedstawia się w postaci:

$$\mathbf{u} = \text{grad } \varphi + \text{rot } \psi, \quad (3.12)$$

a potencjały skalarny  $\varphi$  i wektorowy  $\psi$  spełniają odpowiednie równania ruchu falowego:

$$\rho \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \rho c_t^2 \nabla^2 \varphi = \Phi, \quad (3.13)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - \rho c_t^2 \nabla^2 \psi = \Psi, \quad (3.14)$$

w których  $\Phi$  i  $\Psi$  oznaczają potencjały skalarny i wektorowy pola sił  $\mathbf{f}$ :

$$\mathbf{f} = \text{grad } \Phi + \text{rot } \Psi. \quad (3.15)$$

Równania falowe (3.13) i (3.14) rozwiązuje się metodą przekształcenia całkowego Fouriera dochodząc do wyrażen opisujących w postaci całkowitej amplitudy składowych drgań  $u_x$  i  $u_z$  w dowolnym punkcie przewodzącego ośrodka [185]:

$$u_{x,z}^{(x,z)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{U}_{x,z}^{(x,z)}(k, z) e^{ikx} dk, \quad (3.16)$$

przy czym górne indeksy oznaczają odpowiednią składową pola magnetycznego wytwarzającą składową drgań określoną dolnym indeksem (w sumie 4 składowe drgań), a złożone funk-

cje zespolone  $\bar{U}_{x,z}^{(x,z)}$  - podane w pracy [185] - są transformatami Fouriera odpowiednich składowych drgań, proporcjonalnymi do  $B_{0xz}$  i  $I_m$ . W dążeniu do uproszczenia uzyskanych rozwiązań w pracy [186] założono, że przewód jest idealny ( $\sigma \rightarrow \infty$ ), a następnie wyznaczono charakterystyki kierunkowe rozpatrywanego przetwornika elementarnego w polu dalekim. Mimo przyjętych uproszczeń otrzymane wyrażenia są bardzo złożonymi funkcjami trygonometrycznymi.

Bardziej ogólny model przetwornika nadawczego w postaci prostoliniowego przewodu przedstawiono w pracy [107], w której rozpatrzono wytwarzanie fal ultradźwiękowych w materiałach ferromagnetycznych, uwzględniając wymienione w punkcie 2.2.2 mechanizmy przetwarzania związane z siłami Lorentza, magnetycznymi i magnetostrykcyjnymi. Ze względu na wspomniane już wcześniej znacznie potęgujące się w przypadku ferromagnetyków trudności analitycznego opisu zachodzących w nich zjawisk wyniki tej pracy pozwalają jedynie na wyciągnięcie bardzo ogólnych wniosków, mówiących, że:

- w ferromagnetykach fale poprzeczne wytwarzane są efektywniej niż fale podłużne,
- podczas pracy poniżej nasycenia magnetycznego korzystniejsze jest przyłożenie normalnego stałego pola magnetycznego, a styczne pole magnetyczne jest zalecane, gdy materiał jest nasycony magnetycznie,
- efektywność poszczególnych mechanizmów przetwarzania w znacznym stopniu zależy od kierunku propagacji fali w stosunku do normalnej do powierzchni ośrodka.

W charakterze przykładu przeprowadzono szczegółową analizę otrzymanych wyników dla żelaza przy częstotliwości 2 MHz, stwierdzając, że przy normalnym polu magnetycznym fale poprzeczne rozchodzące się pod małym kątem w stosunku do normalnej (mniejszym niż  $10^\circ$ ) wytwarzane są przede wszystkim dzięki mechanizmowi oddziaływania prądów wirowych ze stałym polem magnetycznym, a dla kątów większych niż  $45^\circ$  podstawową rolę odgrywa mechanizm magnetyczny. W stycznym polu magnetycznym przetwarzanie odbywa się przede wszystkim dzięki zjawisku magnetostrykcji.

Przedstawione w literaturze modele matematyczne przetwornika w postaci prostoliniowego przewodu prowadzą do rozwiązań w postaci bardzo skomplikowanych funkcji, co stawia pod znakiem zapytania celowość ich wykorzystania do analizy przetworników bardziej złożonych przy użyciu metody superpozycji. Dodatkowo, nie są znane z literatury próby weryfikacji doświadczalnej tych modeli, gdyż realne przetworniki wykorzystują uzwojenia złożone z wielu przewodów, w związku z czym przetwornik z pojedynczym prostoliniowym przewodem ma znaczenie przede wszystkim teoretyczne. Jak pokazano jednak w dalszej części tego rozdziału, dla przetworników bardziej złożonych możliwe jest zbudowanie ich uproszczonych modeli matematycznych, które prowadzą do stosunkowo prostych zależności opisujących własności przetwornika. Okazuje się, że najbardziej złożony jest opis matematyczny pola akustycznego wytwarzanego przez elementarne przetworniki (prostoliniowy przewód, kołowy zwój), gdyż pole takie charakteryzuje się największą niejednorodnością.

### 3.3. Pojedynczy kołowy zwoj

Pojedynczy kołowy zwoj stanowi drugi obok prostoliniowego przewodu elementarny przetwornik EMA. Pełna analiza pola akustycznego wytwarzanego przez ten przetwornik (na zasadzie oddziaływania prądów wirowych ze stałym polem magnetycznym) zawarta jest w tych samych pracach Szubajewa, w których wyznaczono pole akustyczne wytwarzane przez prostoliniowy przewód [185, 186].

Założmy, że kołowy zwoj o średnicy  $2R$ , wykonany z przewodu o dążącej do zera średnicy, umieszczony jest na wysokości  $h$  nad powierzchnią przewodzącej półprzestrzeni (metal) (rys. 3.3) i zasilany jest prądem sinusoidalnie zmiennym o amplitudzie  $I_m$ . Podobnie jak w poprzednim rozdziale założymy, że wypełniona metalom półprzestrzeń pod zwojem charakteryzuje się parametrami  $\sigma$ ,  $\mu$  i  $\rho$ , a powietrze nad metalem - parametrami  $\sigma_0$ ,  $\mu_0$  i  $\epsilon_0$ . Ze względu na osiową symetrię układu przyjęty został układ współrzędnych cylindrycznych.

Wektor gęstości prądów wirowych indukowanych w powierzchniowej warstwie metalu ma wyłącznie składową  $j_\varphi$ , która dana jest wyrażeniem [185]:

$$j = j_\varphi = i\omega\mu\mu_0\sigma I_m R \int_0^\infty \frac{-J_1(kR)J_1(kr)\exp(-q_1h+qz)}{\mu q_1 + q} k dk, \quad (3.17)$$

w którym  $q^2 = k^2 - i\omega\mu\mu_0\sigma$ ,  $q_1^2 = k^2 - i\omega\mu_0\sigma_0$ ,  $J_1$  oznacza funkcję Bessela pierwszego rzędu, a  $k$  jest zmienną całkowania.

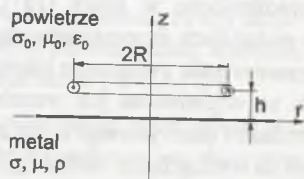
Jeżeli metal poddany jest działaniu stałego normalnego pola magnetycznego o indukcji  $B_{0z}$ , to działające w ośrodku siły Lorentza mają wyłącznie radialną składową, której rozkład objętościowy ma postać:

$$f_r = j_\varphi B_{0z}. \quad (3.18)$$

Ze względu na nierównomierny rozkład tych sił i charakterystykę promieniowania źródła elementarnego w ośrodku będą się rozchodzić zarówno fale ultradźwiękowe poprzeczne, jak i podłużne. Podobnie jak w przypadku prostoliniowego przewodu rozkład pola akustycznego wytwarzanego przez kołowy zwoj wyznacza się metodą potencjałów (wzór (3.12)), a do rozwiązania odpowiednich równań falowych wykorzystuje się przekształcenie całkowe Fouriera-Bessela.

Rozwiązania końcowe, przedstawiające amplitudy składowych drgań  $u_r$  i  $u_z$  w dowolnym punkcie ośrodka, przedstawia się ostatecznie w postaci całkowej [185]:

$$u_r = \int_0^\infty \tilde{U}_r(k, z) J_1(kr) k dk, \quad u_z = \int_0^\infty \tilde{U}_z(k, z) J_0(kr) k dk, \quad (3.19)$$



Rys. 3.3. Pojedynczy kołowy zwoj nad powierzchnią przewodzącej półprzestrzeni

Fig. 3.3. Single circular wire coil over the surface of a conducting half-space

przy czym  $\tilde{U}_r$  i  $\tilde{U}_z$  są złożonymi funkcjami zespolonymi stanowiącymi transformaty Fouriera-Bessela odpowiednich składowych przemieszczeń, a  $J_0$  jest funkcją Bessela pierwszego rodzaju zerowego rzędu.

Obliczenie całek występujących we wzorach (3.19) jest trudnym zadaniem numerycznym. W celu uproszczenia tego zagadnienia w pracy [186] założono przypadek idealnego przewodnika ( $\sigma \rightarrow \infty$ ) i wyznaczono charakterystyki kierunkowe rozpatrywanego przetwornika w polu dalekim. Mimo tych uproszczeń otrzymane wzory są złożonymi funkcjami trygonometrycznymi i ich wykorzystanie w praktyce może być trudne. Zamieszczone w pracy [186] wyniki przykładowych obliczeń dla aluminium przy częstotliwości  $f = 1$  MHz wskazują, że amplituda fali poprzecznej jest prawie o rząd większa od amplitudy fali podłużnej (przy normalnym polu magnetycznym), a kierunek maksymalnego promieniowania dla fali poprzecznej tworzy z normalną do powierzchni kąt wynoszący około  $30^\circ$ . Drugie - nieco mniejsze - maksimum występuje dla kąta wynoszącego kilka stopni. Autor nie podaje jednak żadnych wyników weryfikacji doświadczalnej przedstawionego modelu matematycznego.

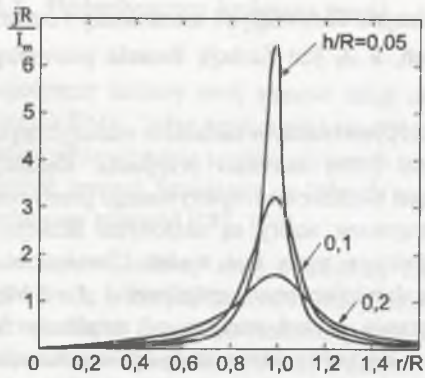
Próbę wyznaczenia w sposób numeryczny rozkładu pola akustycznego wytwarzanego przez kołowy zwoj podjęto w pracy [125]. Wyniki obliczeń zilustrowano przykładowymi rozkładami amplitud obu składowych drgań w polu bliskim. Praca nie zawiera żadnych szczegółów dotyczących zastosowanej metody numerycznego obliczania całek stanowiących rozwiązania równań Maxwella, a przedstawione wyniki mogą jedynie stanowić ilustrację złożoności problematyki związanej z wytwarzaniem fal ultradźwiękowych przez realne przetworniki EMA.

Uproszczony model przetwornika nadawczego w postaci kołowego zwoju zbudowany został przez autora niniejszej monografii [60]. Przyjmując założenie, że badany metal jest idealnym przewodnikiem, wyprowadzono wyrażenie określające rozkład gęstości powierzchniowej prądów wirowych w postaci:

$$j(r) = j_\varphi(r) = I_m R \int_0^\infty J_1(kR) J_1(kr) e^{-kh} k dk. \quad (3.20)$$

Na rys. 3.4 przedstawiono obliczone według powyższego wzoru rozkłady gęstości prądów wirowych dla różnych wartości stosunku  $h/R$ , przy czym całkę występującą w tym wzorze wyznaczono wyrażając ją w postaci całek eliptycznych Legendre'a [60]. Rysunek ten obrazuje podstawową trudność związaną z modelowaniem przetworników EMA, których uzwojenie składa się z pojedynczego przewodu; a mianowicie prądy wirowe płynące po powierzchni metalu cechują się bardzo nierównomiernym rozkładem i płyną w obszarze, którego szerokość szybko powiększa się ze wzrostem odległości  $h$ . Jeżeli jednak odległość zwoju od powierzchni metalu spełnia warunek  $h < 0,05R$  (tzn. np.  $h < 0,5$  mm, gdy  $R = 10$  mm - są to wartości typowe dla realnych przetworników EMA), to gęstość indukowanego prądu osiąga wartości większe niż 10% wartości maksymalnej w obrębie pierścienia o stosunkowo małej w stosunku do promienia zwoju, bo wynoszącej około  $0,2R$ , szerokości. W oparciu o założenie, że prądy wirowe skupione są w wąskim pierścieniu leżącym na powierzchni metalu, w pracy [60] wyznaczono dalej przybliżoną charakterystykę promieniowania w polu dalekim przetwornika EMA na fale podłużne składającego się z kołowego zwoju (lub kołowej cewki o małej w stosunku do promienia szerokości uzwojenia) i źródła stałego, radialnie skierowanego pola magnetycznego (patrz rys. 3.5).





Rys. 3.4. Rozkład gęstości prądów wirowych indukowanych przez kołowy zwoj na powierzchni idealnego przewodnika [60]

Fig. 3.4. Density distribution of eddy current induced by a circular loop on the surface of an ideal conductor [60]

Charakterystyka ta opisana jest zależnością:

$$Q(\Theta) = \frac{v(\Theta)}{v(\Theta=0)} = q_L(\Theta) J_0(k_L R \sin \Theta), \quad (3.21)$$

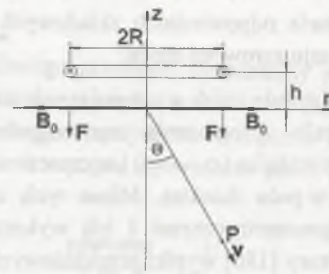
gdzie  $v$  oznacza amplitudę prędkości akustycznej,  $k_L$  - liczbę falową fali podłużnej,  $J_0$  jest funkcją Bessela pierwszego rodzaju zerowego rzędu, a  $q_L(\Theta)$  to charakterystyka kierunkowa źródła elementarnego w postaci punktoowo działającej normalnej siły ( $q_L(\Theta) \approx \cos \Theta$ ).

Jeżeli kąt otwarcia  $\Theta_0$  głównego listka charakterystyki kierunkowej, dla którego prędkość akustyczna (lub ciśnienie) spada do zera, zawiera się w granicach do kilkunastu stopni, to  $q_L(\Theta) \approx 1$  i kąt ten można obliczyć na podstawie wzoru podanego w pracy autora [60]:

$$\Theta_0 \approx \arcsin 0,76 \frac{\lambda_L}{2R}, \quad (3.22)$$

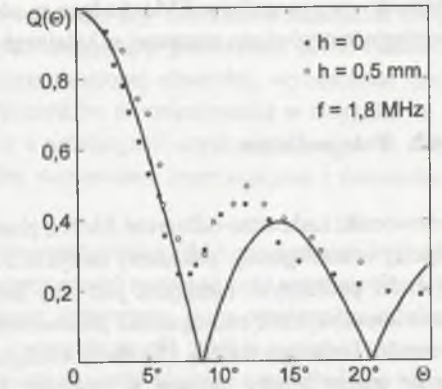
w którym  $\lambda_L$  oznacza długość podłużnej fali ultradźwiękowej w ośrodku. Wzór ten jest podobny do wzoru powszechnie stosowanego w odniesieniu do kołowych przetworników piezoelektrycznych, w którym jednak odpowiedni współczynnik liczbowy wynosi 1,22, a nie 0,76, gdyż charakterystyka kierunkowa przetwornika kołowego jest opisana funkcją typu  $J_1(x)/x$ .

Na rys. 3.6 przedstawiono przykładową charakterystykę kierunkową nadawczego przetwornika EMA z cewką wielozwojową (pomiar z wykorzystaniem pojedynczego zwoju wymagałyby pobudzenia uzwojenia prądem o bardzo dużej amplitudzie) o średnicy  $2R = 18$  mm i szerokości uzwojenia równej 2 mm [60]. Charakterystykę tę zmierzono w aluminium za pomocą stanowiska pomiarowego opisanego w rozdziale 6. Dobra zgodność wyników pomiaru - przynajmniej w obrębie głównego listka charakterystyki - z narysowaną linią ciągłą charakterystyką teoretyczną (wyznaczoną na podstawie wzoru (3.21)) uzasadnia celowość przyjętych przez autora uproszczeń w modelu matematycznym przetwornika.



Rys. 3.5. Geometria układu do obliczenia charakterystyki kierunkowej

Fig. 3.5. Geometry of the system for the determination of directivity pattern



Rys. 3.6. Charakterystyka kierunkowa przetwornika nadawczego EMA z kołową cewką na fale podłużne [60]

Fig.3.6. Directivity pattern of an EMA transmitter with a circular coil for longitudinal waves [60]

Podsumowując ten podrozdział, należy stwierdzić, że opisane w literaturze modele matematyczne przetwornika EMA w postaci pojedynczego kołowego zwoju nie pozwalają na ogół na podanie prostych, przydatnych dla celów praktycznych, wzorów opisujących podstawowe własności przetworników, a prezentowane charakterystyki teoretyczne przykładowych przetworników uzyskane zostały przede wszystkim na drodze obliczeń numerycznych. Wynika to przede wszystkim z dużej niejednorodności pola akustycznego wytwarzanego przez taki przetwornik.

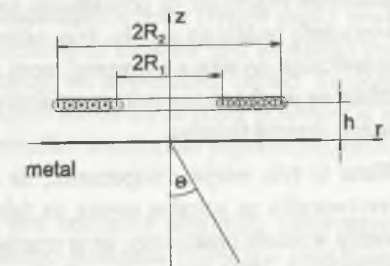
### 3.4. Spiralna cewka

#### 3.4.1. Uwagi ogólne

Płaska spiralna cewka jest uzwojeniem przetwornika EMA najczęściej stosowanym do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych rozchodzących się w kierunku normalnej do powierzchni ośrodka lub pod niewielkim w stosunku do tej normalnej kątem. Dla cewki o  $N$  zwojach (rys. 3.7) rozkład drgań wytwarzanych w dowolnym punkcie rozpatrywanego ośrodka można wyznaczyć całkując rozwiązania uzyskane dla przetwornika w postaci kołowego zwoju:

$$u_{r,z \text{ spir}}(r, z) = \frac{N}{R_2 - R_1} \int_{R_1}^{R_2} u_{r,z}(r, z) dr. \quad (3.23)$$

Amplitudy drgań  $u_{r,z}$  wytwarzanych przez pojedynczy kołowy zwoj przedstawione zostały w postaci całkowej, np. we wspomnianych w podrozdziale 3.3 pracach Szubajewa [185, 186]. Duża złożoność tych rozwiązań powoduje jednak, że ich analiza możliwa jest jedynie na drodze zmuśnionych obliczeń numerycznych, nawet po przyjęciu szeregu założeń upraszczających. Z tego też powodu analiza ta ograniczana jest najczęściej do wyznaczenia charakterystyki kierunkowej przetwornika i wpływu odległości przetwornika od powierzchni badanego materiału na skuteczność przetwarzania (zjawisko unoszenia). Ze względu na złożoność modelu matematycznego powyższe



Rys. 3.7. Płaska spiralna cewka nad powierzchnią przewodzącej półprzestrzeni

Fig. 3.7. Flat spiral coil over the surface of a conducting half-space

własności przetworników EMA badane są również często na drodze eksperymentalnej. Zagadnienia te omówione są szerzej w kolejnych częściach tego podręcznika.

### 3.4.2. Fale podłużne

Przetworniki nadawczo-odbiorcze EMA z płaską spiralną cewką na fale podłużne pracują najczęściej w konfiguracji pokazanej na rys. 1.3.a. Do skutecznego wytworzenia ultradźwiękowych fal podłużnych niezbędne jest, aby linie stałego pola magnetycznego wytwarzanego przez koncentryczne nabiegunki przetwornika skierowane były stycznie (radialnie) do powierzchni badanego metalu. Dla danej konfiguracji przetwornika tak skierowane pole magnetyczne trudno byłoby uzyskać w próbkach ferromagnetycznych i dlatego przetwornik taki przeznaczony jest przede wszystkim do badania wyrobów wykonanych z metali nieferromagnetycznych o dużej konduktywności.

Liczba opublikowanych prac poświęconych przetwornikom ze spiralną cewką na fale podłużne jest stosunkowo niewielka. Wynika to zapewne przede wszystkim z faktu, że są one źródłami fal podłużnych o podobnych charakterystykach kierunkowych jak powszechnie stosowane w technice ultradźwiękowej głowice normalne fal podłużnych z przetwornikami piezoelektrycznymi. Jedyną zaletą przetworników EMA o takiej konfiguracji w stosunku do przetworników konwencjonalnych jest bezstykowe wytwarzanie i odbiór fal ultradźwiękowych. Znacznie większe zainteresowanie badaczy budzą przetworniki EMA generujące fale ultradźwiękowe takich rodzajów, które są trudne lub niemożliwe do uzyskania za pomocą przetworników piezoelektrycznych, jak np. fale poprzeczne spolaryzowane radialnie lub fale poprzeczne o polaryzacji SH.

W jednej z pierwszych prac poświęconych przetwornikom EMA omawianego w tym miejscu rodzaju w celu wyznaczenia charakterystyki kierunkowej promieniowania wprowadzono prosty model matematyczny, w którym układ cewka nadawcza - badany ośrodek zastępuje się układem złożonym z cewki nadawczej i jej zwierciadlanego względem powierzchni granicznej ośrodka odbicia [169]. Siły działające na powierzchnię ośrodka wyznacza się na podstawie wzajemnego oddziaływania tych cewek na siebie; zakłada się przy tym, że siły te są równomiernie rozłożone na powierzchni pierścienia, który stanowi rzut cewki nadawczej na powierzchnię badanego metalu. Przy takim podejściu charakterystyka kierunkowa przetwornika nadawczego wynika z klasycznej teorii źródeł fal ultradźwiękowych [41, 142], a dla  $R_1 \ll R_2$  zbliża się do charakterystyki promieniowania przetwornika w postaci kołowej tarczy, wykonującego drgania tłokowe.

Warto w tym miejscu wspomnieć, że z faktu, iż kierunek maksymalnego promieniowania przetwornika ze spiralną cewką na fale podłużne pokrywa się z osią przetwornika, wynika ważny wniosek praktyczny, że w przetworniku nadawczo-odbiorczym z odrębnymi cewkami: nadawczą i odbiorczą cewka odbiorcza powinna być umieszczona wewnątrz cewki nadawczej, tj. mieć mniejszy promień [112].

Wyniki numerycznej analizy całek reprezentujących rozkład pola akustycznego wytwarzanego przez przetwornik EMA z płaską spiralną cewką przedstawiono w pracy [111], w której założono, że wynikający z równań Maxwella rozkład potencjału wektorowego  $A$  bezpośred-

nie pod cewką jest równomierny, a działające w metalu siły Lorentza o rozkładzie objętościowym sprowadzono do sił powierzchniowych. Przyjmując pobudzenie cewki nadawczej w postaci impulsu sinusoidalnego o wykładniczo tłumionej obwiedni, wyznaczono numerycznie przebiegi czasowe drgań dla różnych kierunków promieniowania w stosunku do osi przetwornika. Przebiegi te porównano następnie z przebiegami uzyskanymi w sposób eksperymentalny i stwierdzono, że różnice pomiędzy wartościami teoretycznymi i doświadczalnymi nie przekraczały 50%.

Rozważania dotyczące modelu matematycznego przetwornika EMA prowadzone były również przez autora niniejszej monografii, a stworzony model matematyczny przetwornika EMA oparty został na założeniu, że fale ultradźwiękowe wytwarzane są na powierzchni idealnego przewodnika [60, 72, 144]. Biorąc jednak pod uwagę złożoność modelu matematycznego realnych przetworników EMA, prace autora w znacznej mierze ukierunkowane były na badanie własności przetworników EMA na fale podłużne na drodze eksperymentalnej. Wyniki tych badań szczegółowo przedstawiono w cytowanych wyżej pozycjach, a niektóre spośród tych wyników będą jeszcze omawiane w punkcie 3.4.4 oraz w rozdziałach 4 i 6.

Jedną z niekorzystnych własności przetworników EMA, która ujawniła się w czasie tych badań, jest odbieranie przez przetwornik dodatkowych impulsów - nie wynikających z kolejnych odbić podłużnych fal ultradźwiękowych od przeciwległych powierzchni próbki. Występowanie tych impulsów związane jest między innymi z faktem, że źródło elementarne w postaci wykonującego prostoliniowe drgania punktu na powierzchni ośrodka wytwarza również fale ultradźwiękowe poprzeczne - o znacznie jednak mniejszej amplitudzie niż fale podłużne - rozchodzące się pod kątem w stosunku do normalnej do powierzchni. Dodatkowo, podczas odbicia rozbieżnej wiązki podłużnych fal ultradźwiękowych od ścianek bocznych badanej próbki zachodzi ich transformacja na fale poprzeczne. Zjawiska te występują również przy zastosowaniu konwencjonalnych głowic piezoelektrycznych, jednak mają wtedy mniejsze znaczenie, gdyż zakłócające impulsy fal poprzecznych nie dochodzą do głowicy przez warstwę ciekłego ośrodka sprzęgającego; mogą one być odebrane przez przetwornik piezoelektryczny tylko wtedy, gdy nastąpi ponowna transformacja fal poprzecznych na podłużne podczas kolejnych odbić. Impulsy wynikające z rozchodzących się w ośrodku fal poprzecznych mogą natomiast być łatwo odebrane przez przetwornik EMA, utrudniając interpretację wyników badania. Zagadnienie odbierania niepożądanych ech przez przetwornik EMA komplikuje się dodatkowo wskutek bezpośredniej generacji fal poprzecznych przez skrajne części cewki nadawczej, tj. w pobliżu nabiegunków, gdyż w obszarach tych kierunek linii sił stałego pola magnetycznego może znacznie odbiegać od równoległego do powierzchni próbki. Szczegółową analizę mechanizmu powstawania ech zakłócających odbieranych przez przetwornik na fale podłużne, a wynikających z rozchodzenia się w ośrodku również fali poprzecznej, przedstawiono w pracy [112].

Bardzo istotną charakterystyką przetwornika EMA jest zależność amplitudy odbieranych impulsów od jego odległości od powierzchni badanego materiału (zjawisko unoszenia). Zagadnienie to omówiono wspólnie dla przetworników na fale podłużne i poprzeczne w punkcie 3.4.4.

### 3.4.3. Fale poprzeczne

Przetworniki EMA ze spiralną cewką pracujące w pokazanej na rys. 1.3.b konfiguracji, w której wykorzystuje się składową normalną stałego pola magnetycznego na powierzchni badanego metalu, są źródłem radialnie spolaryzowanych fal poprzecznych. Fale ultradźwiękowe tego rodzaju trudno byłoby wytworzyć przy użyciu przetworników piezoelektrycznych i dlatego też przetwornikom EMA o takiej konfiguracji poświęca się w literaturze znacznie więcej uwagi niż przetwornikom EMA ze spiralną cewką na fale podłużne.

Analizę teoretyczną przetwornika przedstawia się po wprowadzeniu cylindrycznego układu współrzędnych pokazanego na rys. 3.7. Stałe pole magnetyczne jest w rozpatrywanym tutaj przypadku skierowane prostopadle do powierzchni metalu, tj.  $\mathbf{B}_0 = B_0 \mathbf{a}_z$ . Pole to w obszarze pomiędzy środkowym nabiegunkiem realnego przetwornika (rys. 1.3.b) a powierzchnią badanego metalu można uważać za jednorodne, zwłaszcza gdy metal ten ma własności ferromagnetyczne. Dzięki jednorodności stałego pola magnetycznego wyznaczenie rozkładu pola akustycznego wytwarzanego przez przetwornik ze spiralną cewką na fale poprzeczne jest prostsze niż w przypadku przetwornika na fale podłużne, dla którego stałe pole magnetyczne skierowane jest radialnie, czyli z natury jest niejednorodne. Jeżeli ponadto założy się dla uproszczenia, że rozkład prądów wirowych na powierzchni metalu jest równomierny i ograniczony do obszaru (o kształcie pierścienia) stanowiącego rzut cewki na tę powierzchnię, to dla przetwornika EMA na fale poprzeczne można nie popełniając dużego błędu przyjąć, że źródłem fali ultradźwiękowej są rozłożone na wspomnianym pierścieniu radialnie skierowane siły o równomiernym rozkładzie powierzchniowym. Wyznaczenie pola akustycznego wytwarzanego przez taki przetwornik jest zadaniem klasycznym i może być przeprowadzone w oparciu o fundamentalną pracę Millera i Purseya [153]. Podejście takie zaprezentowano np. w pracach [15, 78, 184]. W dalszym ciągu jednak problemem pozostaje wyznaczenie rozkładu objętościowego gęstości prądów wirowych (który po scałkowaniu po głębokości zastępuje się rozkładem powierzchniowym) indukowanych przez cewkę w badanym metalu dla różnych jej odległości od powierzchni metalu, gdyż wymaga ono kłopotliwego całkowania funkcji Bessela (patrz np. wzór (3.17)). Problem ten można rozwiązać przyjmując przybliżone rozkłady gęstości prądów wirowych wytwarzanych przez spiralną cewkę przedstawione w jednej z podstawowych w dziedzinie metod prądów wirowych prac Sobolewa i Szkarleta [177].

Przyjmując powyższe założenia, w pracach [31, 184] pokazano, że napięcie wyjściowe nadawczo-odbiorczego przetwornika EMA, wytwarzającego poprzeczne fale ultradźwiękowe w metalu nieferromagnetycznym o dużej konduktywności, określone jest przybliżoną zależnością:

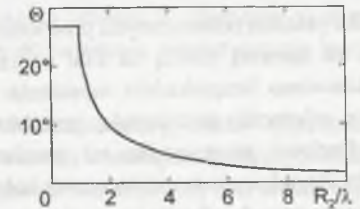
$$U_{odh} = \frac{5,2 N^2 B_0^2 I_m^2 e^{-\frac{2h}{\lambda}}}{\rho c_T} \quad (3.24)$$

gdzie:  $N$  - liczba zwojów cewki,  $B_0$  - indukcja stałego pola magnetycznego,  $I_m$  - amplituda prądu pobudzającego,  $\rho$  - gęstość metalu,  $c_T$  - prędkość fal poprzecznych,  $h$  - odległość cewki od powierzchni metalu,  $R$  - średni promień cewki.

Wzór ten przypomina podane w podrozdziale 3.1 wyrażenie (3.7) dla idealizowanego przetwornika, jednak zaskakuje w nim brak wpływu promienia cewki  $R$  na amplitudę odbieranego sygnału ( $R$  w wykładniku eksponenty wpływa na tę amplitudę jedynie poprzez efekt unoszenia). Według przedstawionych dalej w pracach [31, 184] wyników pomiarów realnego prze-

twornika zmierzona wartość amplitudy odebranego podczas badania próbki aluminiowej impulsu różni się od wartości obliczonej na podstawie powyższego prostego wzoru tylko o 3%, co jest wartością zaskakująco niską, zwłaszcza w zestawieniu z cytowaną w punkcie 3.4.2 pracą [111], w której rozbieżności pomiędzy wynikami analizy numerycznej przetwornika ze spiralną cewką na fale podłużne a wynikami eksperymentalnymi sięgały 50%. Autorzy prac [31, 184] nie podają żadnych szczegółów na temat wykorzystanej w badaniach aparatury pomiarowej i pozwalającej na przeprowadzenie tak precyzyjnych pomiarów (wyniki podawane są z dokładnością do 3 cyfr znaczących), co w znacznej mierze utrudnia dokonanie oceny przedstawionych przez nich wyników.

Teoretyczne charakterystyki kierunkowe przetwornika EMA ze spiralną cewką na fale poprzeczne wyznacza się, przy założeniu że źródłem fali ultradźwiękowej są radialnie skierowane siły równomiernie rozłożone na powierzchni ośrodka w obrębie pierścienia stanowiącego rzut cewki nadawczej na tę powierzchnię, czyli zadanie to sprowadza się do zagadnienia klasycznego. Wyniki analizy wskazują [15], że gdy promień zewnętrzny cewki jest nie większy od długości wytwarzanej fali ultradźwiękowej, tj.  $R_2 \leq \lambda_T$ , to kierunek maksymalnego promieniowania w aluminium lub w stali tworzy z osią przetwornika kąt wynoszący ok.  $30^\circ$ , podobnie zatem jak dla pojedynczego kołowego zwoju [186]. W miarę zwiększania stosunku  $R_2/\lambda_T$  kierunek maksymalnego promieniowania przemieszcza się w stronę mniejszych kątów, tj. w kierunku osi przetwornika, osiągając np. wartość  $\Theta \approx 2^\circ$  przy  $R_2/\lambda_T = 10$ , co pokazano na rys. 3.8, a dla danej wartości  $R_2/\lambda_T$  wzrost stosunku  $R_1/R_2$  powoduje zmniejszanie się maksymalnej amplitudy fali ultradźwiękowej [15].



Rys. 3.8. Zależność kierunku maksymalnego promieniowania od stosunku  $R_2/\lambda_T$  dla  $R_1/R_2 = 0,6$  [15]

Fig. 3.8. Angle of maximum radiation as a function of  $R_2/\lambda_T$  for  $R_1/R_2 = 0,6$  [15]

Opierając się na modelu matematycznym odbioru fal ultradźwiękowych metodą EMA omówionym w podrozdziale 2.3 można wyznaczyć charakterystykę kierunkową przetwornika w postaci płaskiej spiralnej cewki również podczas odbioru. Obliczenia takie przeprowadzono w pracy [17], przy założeniu że w nieferromagnetycznym, przewodzącym prąd ośrodku rozchodzi się ukośnie do jego powierzchni granicznej płaska poprzeczna fala ultradźwiękowa. Uzyskane wyniki odnośnie do kierunku rozchodzenia się fali, dla którego jest ona odbierana z maksymalną efektywnością, pokrywają się z wynikami uzyskanymi dla przetwornika nadawczego i przedstawionymi w cytowanej wcześniej pracy [15].

Fakt, że dla realnych przetworników ze spiralną cewką, której średnica zewnętrzna kilkakrotnie przewyższa długość wzbudzonej poprzecznej fali ultradźwiękowej, kierunek maksymalnego promieniowania tworzy z osią przetwornika kąt wynoszący kilka stopni, znajduje eksperymentalne potwierdzenie w takich np. pracach, jak [17, 77, 92, 117]. Interesujące wyniki badań przetwornika EMA ze spiralną cewką przedstawiono w pracy [117]. Badany przetwornik EMA umieszczano z jednej strony płaskorównoległych próbek o różnych grubościach, natomiast z drugiej strony próbki przemieszczano małą cewką pomiarową, mierząc rozkład

amplitudy wytwarzanej fali ultradźwiękowej w funkcji odległości od osi przetwornika nadawczego. Uzyskane w ten sposób przykładowe rozkłady pola akustycznego pokazano na rys. 3.9, z którego wynika, że poprzeczna fala ultradźwiękowa generowana jest z największą efektywnością w pobliżu zewnętrznej części spiralnej cewki.

Wyniki pomiarów rozkładu pola akustycznego przetwornika EMA rozpatrywanego typu wskazują, że w przetwornikach nadawczo-odbiorczych na fale poprzeczne z dwiema odrębnymi cewkami - nadawczą i odbiorczą - cewka odbiorcza powinna być umieszczona na zewnątrz; odwrotnie zatem niż w przypadku przetwornika na fale podłużne.

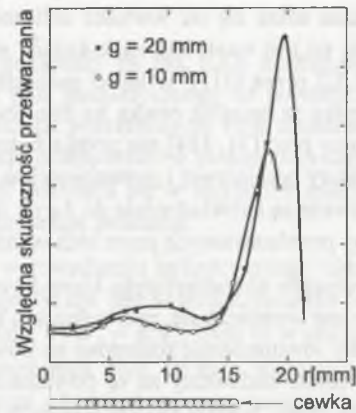
W kilku pracach poświęconych przetwornikom EMA ze spiralną cewką na fale poprzeczne przedstawiono bezpośrednie wyrażenia określające zależność skuteczności przetwarzania od odległości przetwornika od powierzchni metalu. Zagadnienie to omówiono w kolejnym punkcie tego podrozdziału.

### 3.4.4. Zjawisko unoszenia

Zjawisko unoszenia (ang. lift-off), czyli zmniejszanie się skuteczności przetwarzania EMA ze wzrostem odległości przetwornika od powierzchni badanego metalu, jest bardzo niekorzystną własnością przetworników EMA, gdyż powoduje uzależnienie amplitudy odbieranych sygnałów nie tylko od wielkości ewentualnej wady, ale również od odległości przetwornika od próbki, oraz ogranicza zakres tych odległości do wartości sięgających najwyżej 1 - 2 mm, co ma istotne znaczenie, zwłaszcza podczas badania gorących wyrobów, a także może powodować znaczne wahania amplitudy odbieranego sygnału podczas badań realizowanych w sposób ciągły, gdy przetwornik jest przemieszczany wzdłuż powierzchni badanego wyrobu.

We wszystkich opublikowanych pracach, w których porusza się to zagadnienie, stwierdza się, że zarówno amplituda fali ultradźwiękowej wytwarzanej przez przetwornik EMA, jak i amplituda sygnału indukowanego w przetworniku odbiorczym, zmniejszają się wykładniczo ze wzrostem odległości przetwornika od powierzchni metalu. Liczne wyniki badań konkretnych przetworników nadawczo-odbiorczych wskazują, że charakteryzujący to zjawisko współczynnik zawiera się w przedziale od kilku do kilkunastu dB/mm.

Zmniejszanie się skuteczności przetwornika EMA ze wzrostem jego odległości od powierzchni badanego wyrobu wynika zasadniczo z dwóch przyczyn. Po pierwsze, wzrost tej



Rys. 3.9. Zależność względnej amplitudy fali ultradźwiękowej od odległości od osi przetwornika dla różnych grubości próbek  $g$  [117]

Fig. 3.9. Relative amplitude of ultrasonic wave as a function of the distance from the axis of the transducer for various values of sample thickness  $g$  [117]

odległości powoduje zmniejszanie się indukcji stałego pola magnetycznego na powierzchni wyrobu, a należy przypomnieć w tym miejscu, że amplituda sygnału odbieranego przez nadawczo-odbiorczy przetwornik EMA podczas badania metali nieferromagnetycznych zależy wprost proporcjonalnie od kwadratu indukcji stałego pola magnetycznego. Po drugie, oddalenie przetwornika od powierzchni metalu powoduje zmniejszanie się sprzężenia elektromagnetycznego pomiędzy cewką nadawczo-odbiorczą (lub odrębnymi cewkami do nadawania i odbioru) i badanym metalem.

Określenie wpływu pierwszego czynnika na ogólną skuteczność przetwarzania jest klasycznym zadaniem magnetostaticznym i zagadnieniem tym nie będziemy się dalej zajmować. Należy jednak w tym miejscu podkreślić, że ze względu na nieliniowość charakterystyki magnesowania obwodu magnetycznego (magnesu) przetwornika, a także badanego ośrodka, gdy jest on ferromagnetykiem, rozwiązanie tego zagadnienia wymaga na ogół zastosowania numerycznych metod analizy obwodów magnetycznych. Zagadnienie to komplikuje się zwłaszcza w przypadku przetworników EMA przeznaczonych do badania metali nieferromagnetycznych, gdyż wtedy obwód magnetyczny przetwornika jest obwodem otwartym. W przypadku przetworników przeznaczonych do badania metali ferromagnetycznych można przyjąć, że rdzeń magnetyczny (magnes) przetwornika pracuje w obwodzie zamkniętym z niewielką szczeliną powietrzną, o ile nie dochodzi do nasycenia magnetycznego tego rdzenia lub badanego ośrodka.

W odniesieniu do drugiego zjawiska powodującego efekt unoszenia, tj. zmiany sprzężenia elektromagnetycznego pomiędzy cewką (cewkami) przetwornika a badanym metalem, powszechnie przyjmuje się, że dla spiralnej cewki zarówno zmniejszanie się amplitudy fali ultradźwiękowej wytwarzanej przez przetwornik nadawczy, jak i zmniejszanie się amplitudy napięcia indukowanego w cewce przetwornika odbiorczego przy zwiększaniu odległości  $h$  cewki od powierzchni metalu, opisane są zależnością wykładniczą [1, 31, 73, 78, 151, 169, 184]:

$$f_{\text{unoszenia}}(h) = \exp\left(-\alpha \frac{h}{R}\right), \quad (3.25)$$

w której  $R$  oznacza średni promień cewki, a  $\alpha$  jest stałym współczynnikiem. Dla nadawczo-odbiorczego przetwornika EMA wykładnik eksponenty w powyższym wzorze ulega podwojeniu.

W literaturze brak jest jednak zgodności odnośnie do wartości współczynnika  $\alpha$ . W pracach [1, 151] podaje się, że  $\alpha = 2\pi$ , podczas gdy w pracach [78, 184], w których przedstawiono modele matematyczne przetworników EMA zbudowane w oparciu o przybliżone rozkłady prądów wirowych zaproponowane przez Sobolewa i Szkarleta [177], stwierdza się, że  $\alpha = 1,5$ . Z kolei w pracy [169], w której do stworzenia modelu matematycznego przetwornika EMA wykorzystano metodę zwierciadlanego odbicia, dokonano pomiarów indukcyjności spiralnej cewki w funkcji jej odległości od powierzchni metalu, na podstawie których stwierdzono, że  $\alpha = 2,3 \div 2,5$ .

Duża rozbieżność podawanych w literaturze wartości współczynnika  $\alpha$  skłoniły autora niniejszej monografii do przeprowadzenia weryfikacji doświadczalnej tych wartości [67]. Wykorzystano w tym celu skonstruowany przez autora w ramach pracy [60] przetwornik na fale podłużne z kilkunastoma wymiennymi cewkami spiralnymi o różnej średnicy i liczbie zwojów. Liczne, przedstawione w tej pracy, wyniki pomiarów potwierdzają dla zrealizowanych warunków pomiarowych (zakres częstotliwości: 1 ÷ 6 MHz, badane metale: aluminium,

mosiadz, miedź) wynikający z zależności (3.25) fakt, że zarówno częstotliwość fali ultradźwiękowej, jak i rodzaj badanego metalu nie wpływają w istotnym stopniu na charakteryzujący zjawisko unoszenia współczynnik  $\alpha$  i szybkość zmian amplitudy sygnału w funkcji odległości przetwornika od powierzchni metalu zależy przede wszystkim od średnicy cewki. W celu oszacowania wartości występującego we wzorze (3.25) współczynnika  $\alpha$  przeprowadzono badania przetwornika odbiorczego EMA, odbierającego fale ultradźwiękowe wytwarzane przez konwencjonalną głowicę ultradźwiękową z przetwornikiem piezoelektrycznym, którą umieszczono po przeciwległej w stosunku do przetwornika EMA stronie metalowej próbki (metoda przepuszczania). Aby wyeliminować wkład zmian indukcji stałego pola magnetycznego w zjawisko unoszenia, korpus przetwornika EMA utrzymywano w stałej odległości od powierzchni próbki. Odległość samej cewki od tej powierzchni zmieniano przemieszczając ją wzdłuż środkowego nabiegownika przetwornika. Wyznaczona w ten sposób na podstawie pomiarów przeprowadzonych dla kilku cewek wartość współczynnika  $\alpha$  wynosi w przybliżeniu 2 [67].

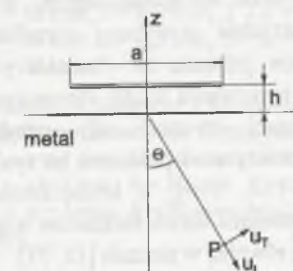
Funkcja opisana wzorem (3.25) obowiązuje niezależnie od tego, czy przetwornik EMA przeznaczony jest na fale podłużne czy poprzeczne, gdyż w obu przypadkach cewka przetwornika umiejscowiona jest w identyczny sposób w stosunku do powierzchni metalu i układ cewka - metal opisany jest identycznymi równaniami Maxwella. Duże różnice mogą natomiast występować w odniesieniu do tej składowej zjawiska unoszenia, która wynika ze zmian indukcji stałego pola magnetycznego na powierzchni badanego metalu, zwłaszcza że przetworniki na fale podłużne preferowane są do badania metali nieferromagnetycznych (obwód magnetyczny przetwornika pracuje w układzie otwartym), a przetworniki na fale poprzeczne stosowane są przede wszystkim do badania metali ferromagnetycznych (obwód magnetyczny przetwornika pracuje w układzie zamkniętym z niewielką szczeliną powietrzną). Ilościowe określenie tej zależności może być trudne, gdyż w zasadniczym stopniu wynika ona z konstrukcji obwodu magnetycznego przetwornika. W związku z tym wnioski dotyczące wpływu zjawiska unoszenia na skuteczność przetwornika EMA mogą mieć charakter przede wszystkim jakościowy. Pierwszy z tych wniosków, potwierdzony w licznych pracach eksperymentalnych - zarówno własnych autora, jak i innych badaczy (np. [47, 78, 112, 149, 184, 208]) - i stwierdzający, że amplituda sygnału odbieranego przez nadawczo-odbiorczy przetwornik EMA (z uwzględnieniem obu składowych zjawiska unoszenia) maleje wykładniczo ze wzrostem jego odległości od powierzchni badanego wyrobu, może mieć znaczenie praktyczne przede wszystkim podczas projektowania elektronicznych układów kompensacji zjawiska unoszenia. Drugi wniosek mówi, że w celu zmniejszenia wpływu zjawiska unoszenia na skuteczność przetwornika jego cewka (cewki) powinna mieć możliwie dużą średnicę. Warunek ten może być trudny do spełnienia, zwłaszcza w odniesieniu do odbiorczych przetworników pomiarowych, np. przeznaczonych do bezstykowego badania charakterystyk kierunkowych głowic ultradźwiękowych. Biorąc pod uwagę, że wymiary cewek takich przetworników nie powinny przekraczać kilku milimetrów, należy się spodziewać dla takich przetworników szczególnie dużego wpływu zjawiska unoszenia na amplitudę odbieranego przez nie sygnału.

### 3.5. Uzwojenia złożone z równoległych prostoliniowych sekcji

#### 3.5.1. Taśma

Pojedyncza taśma, złożona najczęściej z szeregu równoległych prostoliniowych przewodów, nie jest na ogół wykorzystywana jako samodzielne uzwojenie realnych przetworników nadawczych EMA, znajduje natomiast pewne zastosowanie w przetwornikach odbiorczych. Niestosowanie uzwojeń o takiej postaci w przetwornikach nadawczych wynika przede wszystkim z faktu, że obwód powrotny indukowanych na powierzchni metalu prądów wirowych nie jest zasadniczo narzucany przez ten kształt cewki nadawczej. Przepływ powrotny prądów wirowych może odbywać się zatem w obszarze powierzchni metalu, w którym kierunek stałego pola magnetycznego znacznie odbiega od pożądanego dla wytworzenia fali ultradźwiękowej określonego rodzaju, co może z kolei doprowadzić do niepożądanego generacji fali ultradźwiękowej innego rodzaju niż wymagana. Szereg takich taśm ułożonych równolegle obok siebie z określonym odstępem (tzn. np. cewka typu ramka lub meander) powszechnie wykorzystuje się natomiast do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych rozchodzących się skośnie do powierzchni metalu. Przetwornikami takimi zajmujemy się w punktach 3.5.2 i 3.5.3.

Położenie taśmy nad powierzchnią przewodzącej półprzestrzeni przedstawia rys. 3.10. Rozkład pola akustycznego wytwarzanego w metalu przez przetwornik EMA z takim uzwojeniem można wyznaczyć zgodnie z sugestiami autora prac [185, 186], w których przeanalizowano pole akustyczne wytwarzane przez pojedynczy prostoliniowy przewód (patrz podrozdział 3.2), całkując rozwiązania otrzymane dla pojedynczego przewodu. Podejście takie nie znajduje jednak szerszego odzwierciedlenia w literaturze. Najczęściej analiza teoretyczna przetwornika z uzwojeniem w postaci taśmy ogranicza się do wyznaczenia charakterystyki kierunkowej przetwornika w polu dalekim, zwłaszcza przy normalnie skierowanym do powierzchni metalu polu magnetycznym [20, 22, 77].



Rys. 3.10. Taśma nad powierzchnią przewodzącej prąd półprzestrzeni

Fig. 3.10. Strip over the surface of a current conducting half-space

Rozkład gęstości prądów wirowych indukowanych na powierzchni idealnego przewodnika przez taśmę, przez którą płynie prąd sinusoidalnie zmienny o amplitudzie  $I_m$ , jest dobrze znany z teorii grzejnictwa indukcyjnego i określony jest wzorem [20, 22]:

$$j = j_y = \frac{I_m}{\pi a} \left[ \arctg \frac{x + \frac{a}{2}}{h} - \arctg \frac{x - \frac{a}{2}}{h} \right]. \quad (3.26)$$

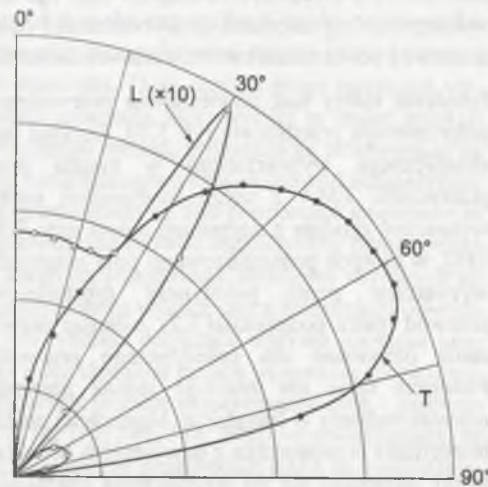
Pod wpływem stałego normalnego pola magnetycznego na powierzchnię metalu działają stycznie skierowane siły Lorentza, których rozkład powierzchniowy w oczywisty sposób wynika z zależności:

$$F_x = j_y B_{0z} \quad (3.27)$$

Charakterystykę kierunkową przetwornika w polu dalekim wyznacza się w sposób klasyczny, tzn. całkując amplitudy drgań dochodzących do pewnego punktu P ośrodka (rys. 3.10) z elementarnych punktów powierzchni drgającej; dodatkowo zakłada się, że jeśli punkt P znajduje się w polu dalekim, to dochodzące do niego fale elementarne rozchodzą się w przybliżeniu w kierunkach równoległych. Taki sposób wyznaczenia charakterystyki kierunkowej zastosowano w pracach [15, 22, 77], przy czym w pracy [22] uwzględniono nierównomierny, wynikający z zależności (3.26) i (3.27), rozkład sił na powierzchni metalu, podczas gdy w pracach [15, 77] założono, że styczne siły powierzchniowe są rozłożone równomiernie w obrębie prostokąta ograniczonego przez szerokość taśmy  $a$  i jej długość  $b$ . Przedstawione w tych pracach charakterystyki kierunkowe przetwornika z uzwojeniem w postaci taśmy opisane są funkcjami typu  $\sin x/x$ , przy czym z oczywistych względów charakterystyka przedstawiona w pracach [15, 77] jest taka sama jak charakterystyka konwencjonalnego stykowego przetwornika nadawczego fal poprzecznych o przekroju prostokątnym.

W pracy [22] dla uproszczenia zagadnienia przyjęto, że charakterystyka promieniowania źródła elementarnego (drgającego punktu) jest taka jak w ośrodku nieograniczonym. Wpływ powierzchni granicznej ośrodka powoduje jednak, że charakterystyka promieniowania źródła elementarnego w postaci stycznej siły przyjmuje w istocie postać pokazaną na rys. 3.11 [20, 153, 196]; o konieczności uwzględnienia takich rozkładów wspomina się również w pracach [15, 77].

Przedstawioną na tym rysunku charakterystykę kierunkową źródła elementarnego wykorzystano w pracy [20] do numerycznego wyznaczenia charakterystyki kierunkowej dla fal poprzecznych przetworników z uzwojeniem w postaci taśmy o kilku przykładowych wymiarach. W pracy tej uwzględniono również, że siły działające na powierzchni ośrodka mają nierównomierny, wynikający z zależności (3.26) i (3.27), rozkład. Uzyskane wyniki przedstawia rys. 3.12. Wynika z niego, że w przetwornikach EMA przeznaczonych do wytwarzania fal poprzecznych rozchodzących się normalnie do powierzchni metalu należy stosować uzwojenia o możliwie dużej szerokości, natomiast w przetwornikach generujących fale poprzeczne rozchodzące się ukośnie do powierzchni granicznej szerokość uzwojenia powinna być mała i powinno być ono umieszczone maksymalnie blisko powierzchni metalu. Wnioski



Rys. 3.11. Charakterystyki promieniowania dla fal podłużnych i poprzecznych źródła liniowego w postaci stycznej siły działającej na powierzchni ośrodka [20, 153]

Fig. 3.11. Radiation patterns for longitudinal and transverse waves of a line source in the form of a tangent force acting on the surface of a medium [20, 153]

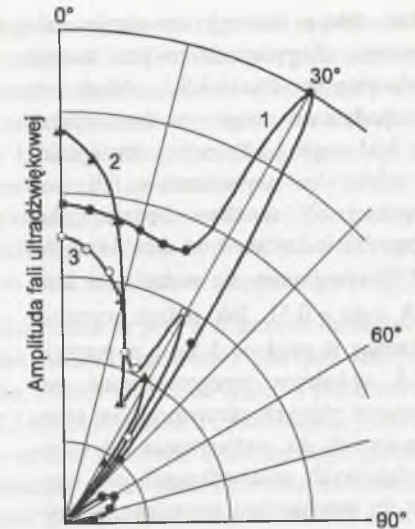
te znajdują potwierdzenie w pracach [92, 96], w których opisano wyniki badań eksperymentalnych charakterystyk kierunkowych różnych przetworników EMA.

Model teoretyczny przetwornika odbiorczego na fale poprzeczne z uzwojeniem w postaci taśmy przedstawiono w pracy [16]. Model ten ma postać przedstawioną w podrozdziale 2.3, a napięcie indukowane w uzwojeniu przetwornika wynika z zależności (2.52) - (2.54). W szczególności w pracy tej wyznaczono charakterystykę kierunkową przetwornika podczas odbioru płaskiej poprzecznej fali ultradźwiękowej, stwierdzając, że jest ona zgodna z charakterystyką kierunkową przetwornika nadawczego.

Interesujące rozważania dotyczące wykorzystania przetwornika odbiorczego z płaską taśmą do odbioru poprzecznych fal ultradźwiękowych rozchodzących się w metalach ferromagnetycznych zawiera praca [204]. W pracy tej podano wyniki obliczeń wpływu poszczególnych mechanizmów przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego, przedstawionych w punkcie 2.2.2, na natężenie pola elektrycznego wytwarzanego w powietrzu nad metalem, gdy poprzeczna fala ultradźwiękowa o polaryzacji SV rozchodzi się pod kątem w stosunku do powierzchni próbki żelaznej. Wyniki te przedstawia rys. 3.13.

Charakterystyka ta wskazuje, że przy normalnie skierowanym stałym polu magnetycznym odbiór poprzecznej fali ultradźwiękowej odbywa się przede wszystkim na zasadzie indukowania prądów wirowych pod wpływem drgań ośrodka w stałym polu magnetycznym. Zjawiska związane ze zmianą namagnesowania ośrodka pod wpływem rozchodzącej się w nim fali ultradźwiękowej odgrywają pewną rolę przede wszystkim dla dużych kątów padania fali, natomiast wpływ zjawiska magnetostrykcji dla założonej normalnej orientacji stałego pola magnetycznego jest pomijalnie mały. Przedstawione w cytowanej wyżej pracy wyniki badań przetwornika odbiorczego z uzwojeniem w postaci wąskiej taśmy potwierdzają teoretyczny przebieg charakterystyki kierunkowej pokazanej na rys. 3.13.

Jak wspomniano na początku tego podrozdziału, szereg uzwojeń typu taśma wykorzystuje się w przetwornikach EMA przeznaczonych do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych rozchodzących się ukośnie do powierzchni badanego obiektu. W przetwornikach nadawczych tego typu wykorzystuje się interferencję fal ultradźwiękowych wytwarzanych przez poszcze-



Rys. 3.12. Charakterystyka kierunkowa przetwornika EMA na fale poprzeczne z uzwojeniem w postaci taśmy (1 -  $a = 1$  mm,  $b = 30$  mm,  $h = 0,3$  mm; 2 -  $a = 5$  mm,  $b = 30$  mm,  $h = 0,3$  mm; 3 -  $a = 1$  mm,  $b = 30$  mm,  $h = 1,5$  mm) [20]

Fig. 3.12. Directivity pattern of a transverse wave EMA transducer with a strip conductor (1 -  $a = 1$  mm,  $b = 30$  mm,  $h = 0,3$  mm; 2 -  $a = 5$  mm,  $b = 30$  mm,  $h = 0,3$  mm; 3 -  $a = 1$  mm,  $b = 30$  mm,  $h = 1,5$  mm) [20]

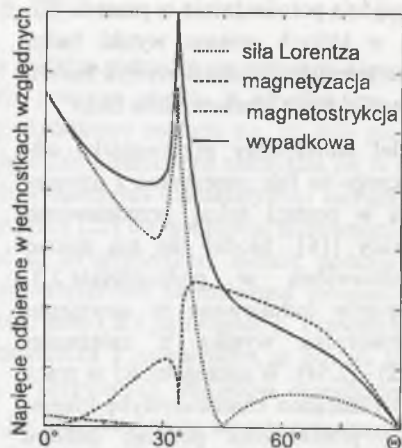
gólne sekcje (taśmy) uzwojenia całkowitego. Zagadnienie to jest szerzej omówione w punkcie 3.5.3, jednak już na podstawie tego punktu (patrz rys. 3.11 i rys. 3.12) można stwierdzić, że efektywne wytwarzanie fali poprzecznej SV możliwe będzie tylko w przedziale kątów  $\Theta$  od zera do około  $30^\circ$  (przynajmniej dla metali, dla których  $c_T/c_L \approx 0,5$ ). Jak jednak zostanie pokazane w punkcie 3.5.4 i w punkcie 3.5.5, w którym przeprowadzono porównanie różnych przetworników przeznaczonych do wytwarzania fal ultradźwiękowych rozchodzących się ukośnie do powierzchni materiału, ograniczenie to nie obowiązuje w odniesieniu do fal poprzecznych o polaryzacji SH. Fale o takiej polaryzacji mogą być efektywnie wytwarzane w szerokim zakresie kątów.

### 3.5.2. Ramka

Uzwojenie w postaci płaskiej prostokątnej lub owalnej ramki (rys. 1.2.e) najczęściej wykorzystywane jest do wytwarzania lub odbioru poprzecznych fal ultradźwiękowych. W istocie wykorzystywane są jedynie dwa dłuższe boki takiej ramki, a krótsze boki są np. ekranowane od strony powierzchni badanego metalu lub umieszczone są w obszarze, w którym indukcja stałego pola magnetycznego osiąga małe wartości. Dzięki temu można pominąć fale ultradźwiękowe generowane przez krótsze boki ramki i model matematyczny przetwornika można zbudować w oparciu o superpozycję wyników uzyskanych dla pojedynczej taśmy.

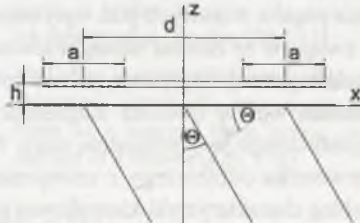
Geometrię układu, na której oprzemy rozważania tego punktu, przedstawia rys. 3.14. Założymy, że długość każdej prostoliniowej części uzwojenia (w kierunku osi Y) wynosi  $b$ .

Podobnie jak w przypadku pojedynczej taśmy literatura poświęcona przetwornikom EMA z uzwojeniem w postaci ramki koncentruje się przede wszystkim na własnościach kierunkowych przetworników. Przetworniki z ramką przeznaczone do wytwarzania lub odbioru poprzecznych fal ultradźwiękowych mogą pracować w dwóch podstawowych



Rys. 3.13. Charakterystyka kierunkowa przetwornika EMA odbierającego poprzeczne fale ultradźwiękowe rozchodzące się w żelaznej próbce [196, 204]

Fig. 3.13. Directivity pattern of an EMA transducer receiving transverse waves from an iron sample [196, 204]



Rys. 3.14. Prostokątna ramka nad powierzchnią przewodzącą półprzestrzeni

Fig. 3.14. Rectangular frame over the surface of a current conducting half-space

konfiguracjach. W pierwszej konfiguracji obie sekcje uzwojenia umieszczone są pod odrębnymi nabiegownikami przetwornika, jak pokazano na rys. 1.3.c. W takim przypadku styczne drgania powierzchni metalu bezpośrednio pod obiema sekcjami uzwojenia odbywają się w tej samej fazie, gdyż prądy wirowe płyną pod oboma nabiegownikami w przeciwnych kierunkach i jednocześnie przeciwnie skierowane są wektory indukcji stałego pola magnetycznego na powierzchni metalu pod tymi nabiegownikami. Wynika z tego, że charakterystyka kierunkowa przetwornika pracującego w takiej konfiguracji wykazuje maksimum w kierunku normalnym do powierzchni badanego metalu; jedynie dla niewielkich odległości od powierzchni występują dwa odrębne maksima odpowiadające promieniowaniu poszczególnych sekcji przetwornika [77].

W drugiej konfiguracji obie sekcje uzwojenia umieszczone są pod tym samym nabiegunkiem przetwornika (rys. 1.3.b). Drgania powierzchni metalu bezpośrednio pod tymi sekcjami odbywają się wtedy w przeciwnej fazie, w związku z czym amplituda drgań w płaszczyźnie symetrii przetwornika (płaszczyzna YOZ na rys. 3.14) jest równa zero i przetwornik generuje drgania rozchodzące się ukośnie do powierzchni metalu. Kierunek maksymalnego promieniowania w polu dalekim wyznacza się, przy założeniu że dla punktu ośrodka dostatecznie odległego od jego powierzchni drgania wytwarzane pod sekcjami ramki dochodzą do tego punktu po prostych w przybliżeniu równoległych. Amplituda drgań w punktach ośrodka leżących na prostej tworzącej z normalną do powierzchni kąt  $\Theta$  osiąga maksymalną wartość, gdy dochodzące do danego punktu fale ultradźwiękowe, wytwarzane przez obie sekcje ramki, przebywają drogi różniące się o połowę długości fali (drgania powierzchni metalu bezpośrednio pod obiema częściami cewki mają fazę przeciwną). Po uwzględnieniu podanego wyżej założenia warunek ten przyjmuje postać [21, 77]:

$$\sin \Theta = \frac{\lambda_T}{2d} = \frac{c_T}{2df} \quad (3.28)$$

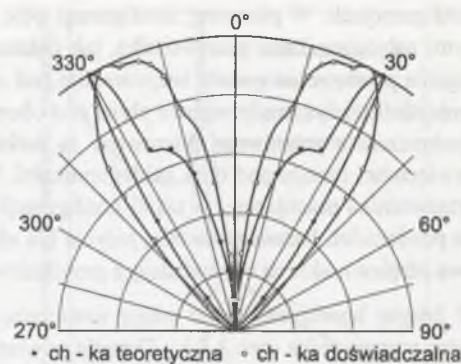
Z zależności tej wynika interesująca właściwość przetworników EMA z uzwojeniem w postaci ramki, polegająca na możliwości płynnej zmiany kierunku maksymalnego promieniowania poprzez zmianę częstotliwości  $f$  prądu zasilającego cewkę. Kąt, jaki kierunek maksymalnego promieniowania tworzy z normalną do powierzchni, może zawierać się w granicach od kilku [77] do niewiele ponad 30 stopni [16, 20, 21]. Przykładową charakterystykę kierunkową przetwornika nadawczego EMA omawianego typu przedstawia rys. 3.15 [21]. Charakterystykę tę wyznaczono w sposób numeryczny na podstawie przeprowadzonej wcześniej przez tych samych autorów analizy własności kierunkowych przetwornika w postaci pojedynczej taśmy [20], w której uwzględniono nierównomierny rozkład prądów wirowych indukowanych przez uzwojenie oraz pokazanej na rys. 3.11 charakterystyki promieniowania źródła elementarnego.

Charakterystykę kierunkową przetwornika odbiorczego EMA z uzwojeniem w postaci ramki wyznaczono w pracy [16], opierając się na wprowadzonym tam modelu matematycznym odbioru płaskich fal ultradźwiękowych metodą EMA, który przedstawiono w podrozdziale 2.3 tego opracowania. Charakterystyka ta wykazuje zgodność z charakterystyką kierunkową przetwornika nadawczego.

W cytowanej wyżej pracy [16] wyprowadzono również wzór pozwalający obliczyć napięcie indukowane w przetworniku odbiorczym. Zgodnie ze wzorem (2.54) zależność tego napięcia od odległości  $h$  przetwornika od powierzchni metalu jest określona przez czynnik  $\exp(-\lambda h)$ ,

przy czym dla parametru  $\lambda$  zachodzi związek  $\lambda \approx k_T \sin \Theta$ . Przetwornik wykazuje maksymalną skuteczność podczas odbioru fali ultradźwiękowej rozchodzącej się pod kątem  $\Theta$  wynikającym z zależności (3.28) i wtedy  $\lambda \approx \pi$ . Uwzględniając fakt, że działanie zarówno nadawczego, jak i odbiorczego przetwornika EMA opisane jest takimi samymi równaniami różniczkowymi, należy oczekiwać, że również efekt unoszenia dla przetwornika nadawczego opisany będzie takim samym czynnikiem, w związku z czym zależność napięcia odbieranego przez nadawczo-odbiorczy przetwornik EMA z cewką w postaci ramki od odległości  $h$  będzie określona czynnikiem  $\exp(-2\pi h)$  (współczynnik ten nie uwzględnia efektu unoszenia dla magnesu). Wniosek ten znajduje potwierdzenie w pracach [1, 151, 196], w których odpowiedni wzór podano wprawdzie dla cewki typu meander, jednak ramkę można uważać za szczególny przypadek cewki typu meander, w której liczba równoległych sekcji wynosi 2.

Omówione wyżej własności przetworników z płaską ramką słuszne są przy założeniu, że źródłem fali ultradźwiękowej są działające stycznie na powierzchni metalu siły Lorentza. Obowiązuje to przede wszystkim w odniesieniu do metali nieferromagnetycznych, w których jednak wytworzenie odpowiednio silnego pola magnetycznego o kierunku normalnym, wymagającym do wytworzenia tak skierowanych sił, może być trudne. Mechanizm zjawisk zachodzących podczas przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego w metalach ferromagnetycznych staje się znacznie bardziej skomplikowany. W szczególności rodzaj wytwarzanej fali ultradźwiękowej zależy nie tylko od konfiguracji przetwornika, ale również od wielkości indukcji stałego pola magnetycznego wytwarzanego na powierzchni rozpatrywanego ośrodka. W pracy [103] zauważono na przykład, że przy stycznie skierowanym stałym polu magnetycznym ze wzrostem jego indukcji aż do punktu przegięcia krzywej magnesowania w żelazie Armco generowane są przede wszystkim fale poprzeczne, natomiast oczekiwane dla takiej konfiguracji fale podłużne wytwarzane są efektywnie dopiero przy wyższych wartościach indukcji tak skierowanego pola magnetycznego. Problem ten omówiono bardziej szczegółowo w pracy [104], w której przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przetworników EMA z płaską ramką w zależności od orientacji i wartości indukcji stałego pola magnetycznego. Zgodnie z wynikami tej pracy w przypadku stycznie skierowanego pola magnetycznego generacja i odbiór fal poprzecznych wynikają ze zjawiska magnetostrykcji, a odbierany przez przetwornik sygnał szybko maleje po osiągnięciu nasycenia magnetycznego badanego materiału (żelazo, nikiel) z wyjątkiem ferrytu, dla którego spadek sygnału wynikającego z generacji i odbioru fal poprzecznych jest znacznie wolniejszy. Przy takiej samej orientacji stałego pola magnetycznego sygnał wynikający z generacji i odbioru fal podłużnych (mechanizm wykorzystujący prądy wirowe) rośnie proporcjonalnie do kwadratu natężenia pola, przy czym

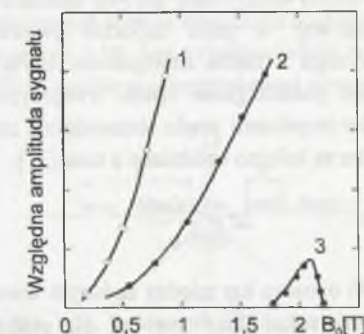


Rys. 3.15. Charakterystyka kierunkowa przetwornika EMA z uzwojeniem nadawczym w postaci płaskiej ramki [21]

Fig. 3.15. Directivity pattern of an EMA transmitter with a winding in the form of a flat frame [21]

uzyskanie wartości sygnału porównywalnej z wartościami otrzymanymi dla fal poprzecznych wymaga przyłożenia pola magnetycznego o natężeniu kilkakrotnie przekraczającym próg nasycenia.

Udział poszczególnych mechanizmów w ogólnym procesie przetwarzania EMA ulega zasadniczej zmianie, gdy stałe pole magnetyczne skierowane jest normalnie do powierzchni próbki. W takim przypadku dzięki sile Lorentza następuje silna generacja ultradźwiękowych fal poprzecznych, a zjawisko magnetostrykcji odgrywa w procesie przetwarzania znikomą rolę. Prawidłowości te zgodne są z wnioskami podanymi wcześniej podczas omawiania przetwornika z uzwojeniem w postaci taśmy (patrz rys. 3.13). W charakterze ilustracji powyższych uwag na rys. 3.16 pokazano przedstawiłone w pracy [104] eksperymentalne zależności wyrażone w jednostkach względnych amplitudy sygnału wynikające z generacji i odbioru poprzecznych fal ultradźwiękowych w różnych metalach (pomiar przeprowadzono przy częstotliwości 3,8 MHz).



Rys. 3.16. Sygnał odbierany przez przetwornik EMA na fale poprzeczne z uzwojeniem w postaci ramki w normalnym (1 - żelazo, 2 - aluminium) i stycznym (3 - żelazo) polu magnetycznym [104]

Fig. 3.16. Signal received by a transverse wave EMA transducer with a rectangular winding for normal (1 - iron, 2 - aluminium) and tangent (3 - iron) magnetic field [104]

Zgodnie z tym rysunkiem przy normalnie skierowanym polu magnetycznym poprzeczne fale ultradźwiękowe są najefektywniej wytwarzane w metalach nieferromagnetycznych o dużej konduktywności (aluminium); należy jednak jeszcze raz podkreślić, że podczas badania metali nieferromagnetycznych obwód magnetyczny przetwornika pracuje w układzie otwartym, w związku z czym uzyskanie silnego pola magnetycznego może być trudne.

Próbie teoretycznego wyjaśnienia zjawisk obserwowanych podczas badania metali ferromagnetycznych przy użyciu przetworników z płaską ramką podjęto w pracy [126]. Punktem wyjścia przedstawionej tam analizy są złożone wzory, które wyrażają poszczególne składowe podłużnych i poprzecznych drgań w ośrodku, wynikające z siły Lorentza i zjawiska magnetostrykcji dla zarówno stycznej, jak i normalnej składowej stałego pola magnetycznego. Na podstawie szczegółowej analizy tych wzorów wyznaczono i przedstawiono rozkłady poszczególnych składowych drgań w metalu, stwierdzając w szczególności, że podawane często w literaturze rozkłady przybliżone w polu dalekim są słuszne dla odległości od powierzchni w głąb metalu przekraczających 10 - 12 długości fali ultradźwiękowej.

Charakterystyki kierunkowe przetworników EMA do wytwarzania lub odbioru skośnie rozchodzących się fal ultradźwiękowych są symetryczne względem płaszczyzny symetrii przetwornika, tzn. wykazują one dwa jednakowe maksima w kierunkach tworzących ten sam kąt z płaszczyzną symetrii. Właściwość ta może utrudniać prawidłową lokalizację wad, gdy przetworniki takie zostaną wykorzystane w defektoskopii ultradźwiękowej - zwłaszcza realizowanej na liniach automatycznych, gdyż każda wada będzie wykrywana dla dwóch różnych



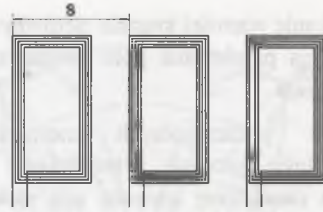
położeń przetwornika. Niedogodność tę można wyeliminować stosując w przetworniku uzwojenie złożone z szeregu ramek pokazane na rys. 3.17.

Tylko jedno maksimum główne charakterystyki kierunkowej w polu dalekim przetwornika nadawczego z takim uzwojeniem uzyskuje się zasilając poszczególne ramki trwającymi kilka okresów impulsami prądu sinusoidalnie zmiennego, które są kolejno opóźniane o czas [21]:

$$\Delta t = \frac{s \sin \Theta}{c_t} \quad (3.29)$$

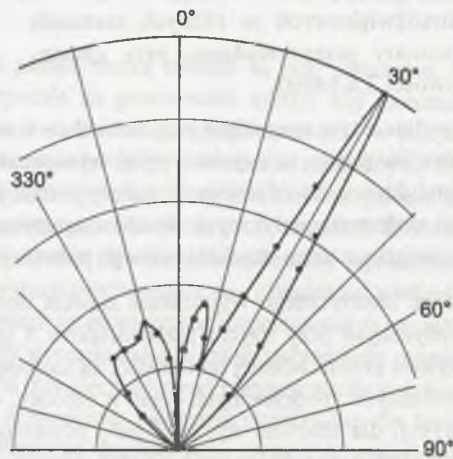
gdzie  $\Theta$  oznacza kąt między żądanym kierunkiem maksymalnego promieniowania i normalną do powierzchni (taki sam jak dla pojedynczej ramki). Dzięki temu drgania pochodzące z poszczególnych ramek w jednym kierunku promieniowania będą się sumować, natomiast w drugim kierunku interferencja fal nie będzie zachodzić, gdyż nie wystąpi koincydencja rozchodzących się w tym kierunku impulsów. W podobny sposób należy opóźnić sygnały indukowane w poszczególnych ramkach podczas odbioru, zanim zostaną one zsumowane [12, 21, 88, 164]. Przykładową charakterystykę kierunkową działającego w oparciu o przedstawioną wyżej zasadę przedstawia rys. 3.18. W opisany sposób można zatem skutecznie wytłumić jedno z dwóch symetrycznie położonych maksimów charakterystyki kierunkowej zarówno przetwornika nadawczego, jak i odbiorczego, wymaga to jednak znacznej rozbudowy i komplikacji układów elektronicznych, które współpracują z przetwornikiem.

Przetworniki EMA, których uzwojenie ma postać płaskiej prostokątnej lub owalnej ramki, są podstawowymi przetwornikami stosowanymi do wytwarzania lub odbioru skośnie rozchodzących się fal ultradźwiękowych. W praktyce do tego celu stosowane są również przetworniki, których uzwojenia złożone są z szeregu takich ramek - np. w przedstawionej wyżej konfiguracji - lub w których stosowane są uzwojenia typu meander. Te ostatnie omówiono w kolejnym punkcie tego podrozdziału.



Rys. 3.17. Uzwojenie przetwornika EMA złożone z szeregu ramek

Fig. 3.17. Winding of an EMA transducer as a phased array of frames



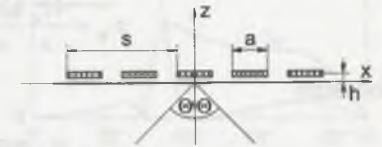
Rys. 3.18. Charakterystyka kierunkowa nadawczego przetwornika EMA złożonego z szeregu ramek [21]

Fig. 3.18. Directivity pattern of a phased array EMA transmitter [21]

### 3.5.3. Szereg równoległych taśm

Do wytwarzania i odbioru podłużnych lub poprzecznych fal ultradźwiękowych rozchodzących się skośnie do powierzchni badanego metalu najczęściej stosowane są przetworniki EMA, których uzwojenie składa się z szeregu prostoliniowych taśm o szerokości  $a$  ułożonych równoległe ze skokiem  $s$ . Uzwojenie takie pokazano na rys. 3.19. Jest to jednocześnie podstawowe uzwojenie wykorzystywane w przetwornikach EMA na fale powierzchniowe i płytowe.

Prąd może przepływać w sąsiednich sekcjach uzwojenia w kierunkach przeciwnych, i wtedy uzwojenie takie nosi nazwę „meander” lub „zygzag”, lub też może płynąć w tym samym kierunku. W praktyce najczęściej wykorzystywane jest uzwojenie pierwszego rodzaju, gdyż indukowane przez nie na powierzchni metalu prądy wirowe płyną przede wszystkim bezpośrednio pod poszczególnymi sekcjami, a ponadto uzwojenie takie łatwiej jest wykonać - zwłaszcza w postaci obwodu drukowanego. Uzwojenie, w którym prąd płynie przez wszystkie sekcje w tym samym kierunku, indukuje prądy wirowe, których obwód powrotny przynajmniej częściowo musi zamykać się pomiędzy sekcjami uzwojenia, co znacznie komplikuje opis matematyczny przetwornika i zmienia kształt rozkład wytwarzanego przez taki przetwornik pola akustycznego. Uzwojenie takie nie posiada żadnych istotnych zalet w stosunku do uzwojenia typu meander i jest rzadko uwzględniane w literaturze, w związku z czym przetworniki z takim uzwojeniem pominiemy w naszych rozważaniach.



Rys. 3.19. Przetwornik EMA złożony z szeregu równoległych taśm

Fig. 3.19. EMA transducer made of parallel strips

Podstawowy model matematyczny przetwornika nadawczego z uzwojeniem typu meander tworzy się w oparciu o założenie, że rozmiary uzwojenia są nieograniczone, z czego wynika, że prądy wirowe indukowane na powierzchni metalu mają okresowy rozkład przestrzenny wzdłuż osi X, a wektor gęstości prądu ma tylko jedną składową  $j_y$  [73, 180, 196]. Rozkład gęstości prądu płynącego przez uzwojenie przetwornika przedstawia się w postaci funkcji:

$$j_y(x) = \frac{I_m}{a} \cdot P(x), \quad (3.30)$$

gdzie  $I_m$  oznacza amplitudę prądu płynącego przez każdą sekcję, a  $P(x)$  jest funkcją okresową o okresie przestrzennym  $s$ , która w odpowiednich przedziałach przyjmuje kolejno wartości 1, 0, -1, 0. Ze względu na okresowość poszukiwanego rozkładu prądów wirowych na powierzchni metalu rozkład ten przedstawia się w postaci szeregu Fouriera [73, 196]. Dla przypadku idealnego przewodnika rozkład ten może być wyznaczony przy zastosowaniu metody zwierciadlanego odbicia i przyjmuje on następującą postać [196]:

$$j_y(x) = -\frac{4I_m}{s} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin \pi(2k+1)a/s}{\pi(2k+1)a/s} e^{-2\pi(2k+1)h/s} \cos 2\pi(k+1)x/s. \quad (3.31)$$

Ze względu na opisany czynnikiem wykładniczym efekt unoszenia tłumienie wyższych harmonicznych przestrzennych rozkładu szybko rośnie ze wzrostem  $k$  (pierwszy czynnik każdego

składnika szeregu również maleje ze wzrostem  $k$ ), w związku z czym w celu uproszczenia dalszych rozważań najczęściej uwzględnia się jedynie podstawową częstotliwość przestrzenną rozkładu prądów wirowych [73, 180, 196].

Jeżeli powierzchnia metalu poddana jest działaniu stałego pola magnetycznego o dowolnej orientacji (w płaszczyźnie XOZ), to wynikające z siły Lorentza naprężenia na powierzchni metalu mają również okresowy rozkład przestrzenny i określone są następującymi wyrażeniami [196]:

naprężenia normalne

$$\sigma_{zz} = \frac{4I_m}{s} \frac{\sin \pi a/s}{\pi a/s} B_{0z} e^{-2\pi h/s} \cos 2\pi x/s \quad (3.32)$$

lub inaczej

$$\sigma_{zz} = \sigma_{zzsk} (e^{2\pi i x/s} + e^{-2\pi i x/s}) \quad (3.33)$$

i naprężenia styczne

$$\sigma_{xz} = \frac{4I_m}{s} \frac{\sin \pi a/s}{\pi a/s} B_{0z} e^{-2\pi h/s} \cos 2\pi x/s \quad (3.34)$$

lub

$$\sigma_{xz} = \sigma_{xzsk} (e^{2\pi i x/s} + e^{-2\pi i x/s}). \quad (3.35)$$

W wyrażeniach tych  $\sigma_{zzsk}$  i  $\sigma_{xzsk}$  oznaczają wartości skuteczne odpowiednich naprężeń i wynikają one z porównania zależności (3.32) i (3.33) oraz (3.34) i (3.35).

W ogólnym przypadku pod wpływem podanych wyżej okresowych rozkładów naprężeń na powierzchni w ośrodku mogą rozchodzić się cztery płaskie fale ultradźwiękowe: dwie fale podłużne i dwie fale poprzeczne, przy czym fala każdego rodzaju rozchodzi się pod dodatnim lub ujemnym w stosunku do normalnej kątem odpowiednio  $\Theta_L$  lub  $\Theta_T$  (rys. 3.19). Kąt ten określony jest zależnością:

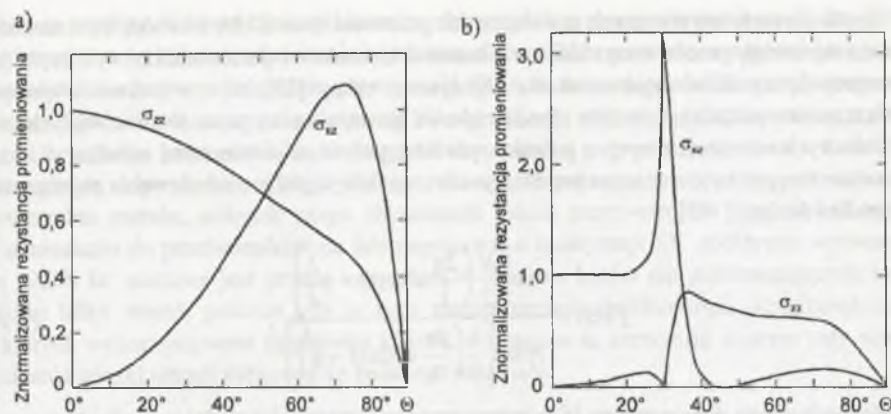
$$\sin \Theta_{L,T} = \frac{c_{L,T}}{fs} = \frac{\lambda_{L,T}}{s}, \quad (3.36)$$

która wynika z warunku, że różnica odległości czoła fali od odległych wzajemnie o  $s$  rzutów sekcji uzwojenia (wytwarzających drgania o tej samej fazie) na powierzchnię metalu jest równa długości odpowiedniej fali.

Podstawienie rozkładów naprężeń (3.32) i (3.34) do odpowiednich równań falowych pozwala na wyznaczenie amplitud generowanych przez przetwornik fal ultradźwiękowych. W pracy [196] rozwiązania te przedstawiono w postaci tzw. znormalizowanej rezystancji promieniowania przetwornika, zdefiniowanej w postaci:

$$R_{L,T} = \left| \frac{\rho c_{L,T} \omega u_{L,T}}{\sigma_{sk}} \right|^2 \cos \Theta, \quad (3.37)$$

gdzie  $u_{L,T}$  oznacza amplitudę fali podłużnej lub poprzecznej, jako  $\sigma_{sk}$  podstawia się odpowiednie naprężenie  $\sigma_{zzsk}$  lub  $\sigma_{xzsk}$ , wyrażenie w liczniku reprezentuje naprężenie w rozcho-



Rys. 3.20. Zależność znormalizowanej rezystancji promieniowania od kąta  $\Theta$  dla fal podłużnych (a) i poprzecznych (b) [196]

Fig. 3.20. Normalized radiation resistance for longitudinal (a) and transverse (b) waves as a function of  $\Theta$  [196]

dzącej się fali podłużnej lub poprzecznej, a  $\cos \Theta$  odzwierciedla kątowy rozkład mocy promieniowanej przez przetwornik w głąb materiału. Graficzne przedstawienie powyższej zależności dla aluminium pokazano na rys. 3.20.

Oba wykresy ilustrują możliwości wytwarzania przy użyciu przetwornika typu meander podłużnych lub poprzecznych (o polaryzacji SV) fal ultradźwiękowych rozchodzących się pod zadanym kątem  $\Theta$  w stosunku do normalnej. Zwraca uwagę fakt, który został już zasygnalizowany wcześniej dla przetwornika typu ramka, że pod wpływem naprężeń stycznych na powierzchni ( $\sigma_{xz}$ ) fale poprzeczne o polaryzacji SV generowane są najefektywniej dla kąta  $\Theta \approx 30^\circ$ .

Przedstawione wyżej wyniki analizy przetwornika o nieograniczonych wymiarach stanowią podstawę do opisu własności realnych przetworników, tj. zawierających cewki typu meander o skończonych wymiarach. W pracy [196] podaje się, że transmitancja przejściowa przetwornika nadawczo-odbiorczego opisana jest zależnością:

$$|Z| = \frac{U_{out}}{I_m} = \frac{2}{\rho c_{L,T}} \left( \frac{2B_0}{s} \right)^2 \left( \frac{\sin \pi a/s}{\pi a/s} \right)^2 e^{-4\pi h/s} R_{L,T} b l, \quad (3.38)$$

gdzie  $b$  oznacza szerokość przetwornika (tj. długość pojedynczej sekcji uzwojenia), a  $l$  - jego długość.

Zależność ta pozwala na obliczenie maksymalnego sygnału odbieranego przez przetwornik EMA, przy założeniu że w obrębie wiązki generowanej przez przetwornik fale ultradźwiękowe rozchodzą się równolegle, a szerokość wiązki wynika bezpośrednio z długości cewki i kąta promieniowania, tj. wynosi  $l \cos \Theta$ . Ze wzrostem kąta  $\Theta$  zjawiska związane z dyfrakcją zaczynają jednak odgrywać coraz większą rolę (w przeciwnym razie szerokość wiązki musiałaby dążyć do 0 przy  $\Theta \rightarrow 90^\circ$ ) i dokładność wzoru (3.38) szybko maleje [196]. Czynniki wykładniczy  $e^{-4\pi h/s}$  uwzględnia efekt unoszenia dla przetwornika nadawczo-odbiorczego z cewką typu meander. Taki sam wzór podaje się również w pracach [1, 151].

W innych pracach teoretycznych poświęconych przetwornikom EMA z cewką typu meander zwraca się uwagę przede wszystkim na własności kierunkowe przetwornika, wykorzystując superpozycję wyników uzyskanych dla pojedynczej taśmy [22] lub - w jeszcze większym uproszczeniu - zakładając, że fale ultradźwiękowe generowane są przez  $N$  równoległych źródeł liniowych rozmieszczonych z jednakowym odstępem  $d$  na powierzchni ośrodka, dla których charakterystyka kierunkowa jest iloczynem charakterystyki promieniowania pojedynczego źródła i funkcji [143]:

$$f(\Theta) = \frac{\sin \left[ \frac{N}{2} \left( \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \Theta - \varphi \right) \right]}{N \sin \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \Theta - \varphi \right) \right]}, \quad (3.39)$$

w której  $\varphi = 0$  dla źródeł promieniujących w tej samej fazie i  $\varphi = \pi$ , gdy drgania sąsiednich źródeł mają fazę przeciwną.

Oprócz podstawowej dla przetworników EMA rozpatrywanego tutaj rodzaju zależności (3.36) tak uproszczone modele pozwalają wyznaczyć przybliżoną szerokość wiązki ultradźwiękowej (dla zerowej wartości naprężeń na skraju wiązki) [143]:

$$\Delta\Theta = 2 \arcsin \frac{\lambda_{L,T}}{l \cos \Theta}, \quad (3.40)$$

gdzie  $l$  oznacza długość przetwornika, a  $\Theta$  jest kątem określającym kierunek maksymalnego promieniowania (3.36).

Szerokość wiązki ultradźwiękowej w zadanej odległości od przetwornika z cewką typu meander można w pewnym stopniu zmniejszyć ogniskując tę wiązkę. W pracy [3] pokazano, że zogniskowanie wiązki ultradźwiękowej można uzyskać stosując cewkę typu meander z nierównomiernym, odpowiednio dobieranym odstępem pomiędzy poszczególnymi sekcjami. Warto w tym miejscu zauważyć, że ogniskowanie wiązki fal ultradźwiękowych jest bardzo proste w przypadku wykorzystania cewki typu meander do wytwarzania fal powierzchniowych lub płytowych. Wystarczy w tym celu zastosować cewkę nie w postaci równoległych prostoliniowych sekcji, lecz łuków okręgowych, których środek leży w żądanym punkcie ogniskowym [1, 73, 151].

Interesujące wyniki prac teoretycznych dotyczących modelowania przetworników EMA z uzwojeniem typu meander zawiera praca [159], w której przedstawiono uzyskane na drodze obliczeń numerycznych trójwymiarowe rozkłady sił generowanych na powierzchni metalu przez przykładowy przetwornik oraz jego charakterystyki kierunkowe. Wyniki badań eksperymentalnych charakterystyk kierunkowych przetworników EMA z cewką typu meander przedstawiono natomiast w takich pracach, jak np. [22, 73, 92], przy czym głównym celem tych badań było praktyczne potwierdzenie wynikającej ze wzoru (3.36) możliwości zmiany kierunku maksymalnego promieniowania poprzez zmianę częstotliwości prądu zasilającego uzwojenie przetwornika. Zagadnienia związane z wykorzystaniem metod numerycznych do analizy przetworników z uzwojeniami w postaci równoległych sekcji przedstawiono również w pracach [137 - 140].

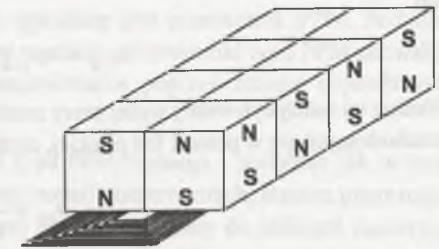
Mimo iż możliwość łatwej zmiany kierunku maksymalnego promieniowania na drodze elektronicznej jest wyjątkową właściwością przetworników EMA, zasadniczo odróżniającą je od przetworników konwencjonalnych, przetworniki EMA wytwarzające skośnie rozchodzące się fale podłużne lub poprzeczne o polaryzacji SV nie znalazły szerszego zastosowania w praktyce. W przypadku przetworników na fale podłużne wynika to przede wszystkim z trudności wytworzenia odpowiednio silnego stałego pola magnetycznego skierowanego stycznie do powierzchni metalu, wskutek czego skuteczność takich przetworników jest bardzo mała. W odniesieniu do przetworników na fale poprzeczne o polaryzacji SV efektywne wytwarzanie takich fal możliwe jest przede wszystkim w zakresie kątów nie przekraczających trzydziestu kilku stopni, podczas gdy w tych zastosowaniach defektoskopii ultradźwiękowej, w których wykorzystywane są głowice kątowe, wymagane są zazwyczaj większe kąty wprowadzania wiązki ultradźwiękowej do badanego materiału.

Znacznie większe możliwości efektywnego wytwarzania fal poprzecznych rozchodzących się skośnie do powierzchni badanego metalu oferują przetworniki EMA na fale poprzeczne o polaryzacji SH, którym poświęcony jest następny punkt tego rozdziału.

#### 3.5.4. Przetworniki na fale poprzeczne o polaryzacji SH

Omówione w poprzednim punkcie tego rozdziału przetworniki EMA z cewką typu meander pozwalają na wytwarzanie i odbiór rozchodzących się skośnie do powierzchni badanego metalu fal poprzecznych o polaryzacji SV, tzn. takich fal ultradźwiękowych, w których drgania cząsteczek ośrodka zachodzą w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni ośrodka. W literaturze dotyczącej przetworników EMA bardzo dużym zainteresowaniem cieszą się przetworniki do wytwarzania i odbioru fal poprzecznych o polaryzacji SH, tj. fal poprzecznych, w których drgania cząsteczek ośrodka odbywają się równolegle do powierzchni granicznej, do której zbliżony jest przetwornik nadawczy. Zasadniczą zaletą takich fal w porównaniu z falami poprzecznymi o polaryzacji SV jest to, że nie ulegają one transformacji podczas odbicia, załamania lub dyfrakcji, a w ośrodkach o dużych wymiarach mogą rozchodzić się również równolegle do powierzchni granicznej.

Przetworniki EMA na fale poprzeczne SH realizowane są najczęściej w pokazanej na rys. 3.21 tzw. konfiguracji PPM (ang. Periodic Permanent Magnet), tj. ze stałym (statycznym) polem magnetycznym o okresowo zmiennym rozkładzie przestrzennym. Do wytwarzania pola magnetycznego w badanym materiale w przetwornikach takich wykorzystuje się szereg miniaturowych (o wymiarach nie przekraczających zazwyczaj kilku milimetrów) magnesów trwałych, wykonanych z materiałów zawierających domieszki pierwiastków ziem rzadkich (które pozwalają na wytworzenie silnego pola magnetycznego przy zachowaniu bardzo małych wymiarów magnesów), a uzwojenie nadawcze



Rys. 3.21. Budowa przetwornika typu PPM

Fig. 3.21. Basic design of the PPM (Periodic Permanent Magnet) transducer

i odbiorcze przetwornika ma najczęściej postać płaskiej ramki. Zasadę działania przetwornika typu PPM ilustruje rys. 3.22.

W pewnym sensie działanie przetwornika tego typu jest podobne do działania przetwornika na fale poprzeczne o polaryzacji SV z uzwojeniem typu meander (patrz punkt 3.5.3). W przypadku tego ostatniego na powierzchni metalu poddanego działaniu stałego jednorodnego pola magnetycznego indukuje się za pomocą cewki typu meander prądy wirowe o okresowym rozkładzie przestrzennym. W przypadku przetwornika typu PPM na powierzchni metalu indukowany jest prąd wirowy o stałym w kierunku X rozkładzie, natomiast statyczne pole magnetyczne ma wzdłuż tej powierzchni okresowy rozkład przestrzenny. Ze względu na te podobieństwa model matematyczny przetwornika typu PPM o nieskończonej długości również tworzy się w oparciu o rozkład odpowiednich funkcji na szereg Fouriera. Jeżeli gęstość prądu w uzwojeniu przetwornika zostanie opisana zależnością:

$$j_x = nI_m, \quad (3.41)$$

w której  $n$  oznacza liczbę zwojów na jednostkę długości, a okresowy rozkład statycznego normalnego pola magnetycznego na powierzchni metalu zostanie przedstawiony w postaci funkcji:

$$B_z = B_0 P(x), \quad (3.42)$$

w której funkcja  $P(x)$  jest funkcją okresową o okresie przestrzennym  $s$ , przyjmującą na przemian wartości 1 i -1, to rozkład wynikających z siły Lorentza naprężeń stycznych na powierzchni metalu będzie opisany funkcją okresową [196]:

$$\sigma_{yz} = -2nI_m B_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin(2k+1)\pi/2}{(2k+1)\pi/2} e^{-2x(2k+1)/s} \cos 2\pi x/s \quad (3.43)$$

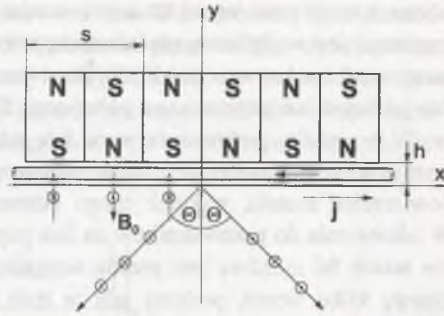
lub

$$\sigma_{yz} = -\sigma_{yzsk} (e^{2\pi x/s} + e^{-2\pi x/s}). \quad (3.44)$$

Według tej samej cytowanej wyżej pracy moduł zespolonej amplitudy drgań cząsteczek ośrodka, rozchodzących się w postaci fali płaskiej, można przedstawić w postaci prostej funkcji:

$$U_{SH} = \frac{\sigma_{yzsk}}{\omega \rho c_T \cos \Theta}. \quad (3.45)$$

Dla przetwornika o skończonej długości  $l$  i szerokości  $b$  impedancję przejściową idealizowanego przetwornika nadawczo-odbiorczego, dla którego zakłada się, że wytwarzana przez nie-



Rys. 3.22. Zasada działania przetwornika typu PPM

Fig. 3.22. Principle of operation of the PPM transducer

go wiązka fal ultradźwiękowych ma stały przekrój (tj. fale ultradźwiękowe rozchodzą się w obrębie wiązki po liniach równoległych), podaje się w postaci [196]:

$$|Z| = \frac{U_{adb}}{I_m} = \frac{8}{\pi^2 \rho c_T} (nB_0)^2 e^{-4\pi h/s} R_{SH} b l, \quad (3.46)$$

przy czym znormalizowana rezystancja promieniowania  $R_{SH}$  zdefiniowana jest wzorem (3.37), w którym jako amplitudę drgań cząsteczek ośrodka należy podstawić wyrażenie (3.45), a naprężenie skuteczne  $\sigma_{yzsk}$  wynika z porównania wzorów (3.43) i (3.44).

Wzór ten pozwala na oszacowanie maksymalnej wartości sygnału odbieranego przez przetwornik PPM, przy czym zgodnie z podanymi w pracy [196] uwagami przestaje on obowiązywać dla kątów propagacji  $\Theta$  bliskich  $90^\circ$ , gdyż wtedy w wyniku założeń upraszczających przyjętych podczas budowy modelu matematycznego przetwornika teoretyczna amplituda drgań cząsteczek ośrodka rośnie do nieskończoności, a szerokość wiązki ultradźwiękowej maleje do zera.

Kierunek maksymalnego promieniowania fali ultradźwiękowej generowanej przez przetwornik typu PPM w polu dalekim wyznacza się przy podobnych założeniach jak dla przetworników wytwarzających skośnie rozchodzące się fale podłużne lub poprzeczne o polaryzacji SV, tzn. że różnica dróg przebywanych przez rozchodzące się w przybliżeniu równoległe fale ultradźwiękowe, wytwarzane pod sąsiednimi magnesami przetwornika i dochodzące do danego punktu ośrodka, musi być równa połowie długości fali. Tak więc kąt, jaki kierunek maksymalnego promieniowania tworzy z normalną do powierzchni, określony jest wzorem:

$$\sin \Theta = \frac{\lambda_T}{s} = \frac{c_T}{sf}, \quad (3.47)$$

w którym  $s$  oznacza rozstaw jednoimiennych biegunów magnesów (rys. 3.22), sama zaś charakterystyka kierunkowa przetwornika jest według prac [149, 151] opisana wyrażeniem:

$$Q(\Theta) = \pi \frac{\sin \alpha}{2\alpha} \frac{\sin \frac{M}{2}(\alpha - \pi)}{\sin \frac{1}{2}(\alpha - \pi)}, \quad (3.48)$$

gdzie  $\alpha = \pi \frac{s}{\lambda_T} \sin \Theta$ ,  $\lambda_T$  oznacza długość poprzecznej fali ultradźwiękowej o częstotliwości

$f$ , a  $M$  jest równe liczbie magnesów, z których wykonany jest przetwornik PPM. Podobnie zatem, jak dla przetworników EMA z cewką typu meander, przetworniki typu PPM pozwalają na łatwą zmianę kierunku maksymalnego promieniowania poprzez zmianę częstotliwości prądu zasilającego cewkę nadawczą.

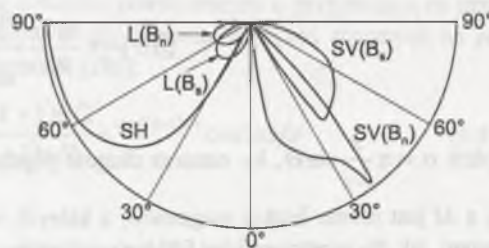
Dokładniejsza analiza teoretyczna przetwornika typu PPM wymaga - podobnie jak w przypadku innych przetworników EMA - zastosowania metod numerycznych. Bardzo interesująca z tego punktu widzenia jest praca [159], w której podano przydatny do obliczeń numerycznych model przetwornika typu PPM oraz przedstawiono wyniki obliczeń rozkładów działających na powierzchni metalu sił oraz charakterystyk kierunkowych przetwornika o przykładowych parametrach.

Działanie przetwornika typu PPM opiera się zasadniczo na wykorzystaniu mechanizmu oddziaływania prądów wirowych ze stałym polem magnetycznym, tj. sił Lorentza, niezależnie od tego, czy fale poprzeczne o polaryzacji SH mają być wytwarzane w metalu ferromagnetycznym, czy w nieferromagnetycznym. W pracach [3, 88, 116, 164] zauważono, że do generacji fal poprzecznych o polaryzacji SH w ferromagnetykach można również wykorzystać przetworniki z uzwojeniem typu meander. Stałe pole magnetyczne powinno być w takim przypadku skierowane stycznie do powierzchni metalu i równoległe do poszczególnych sekcji uzwojenia, a wytwarzanie fal ultradźwiękowych odbywa się w oparciu o zjawisko magnetostrykcji. Szczegółową analizę teoretyczną przetwornika EMA pracującego w takiej konfiguracji przedstawiono np. w pracy [116].

Przetworniki EMA na fale poprzeczne o polaryzacji SH, zwłaszcza pracujące w konfiguracji PPM, stanowią jeden z najbardziej interesujących rodzajów przetworników EMA, gdyż wytwarzanie tego rodzaju fal przy użyciu technik klasycznych - aczkolwiek teoretycznie możliwe - jest w praktyce bardzo trudne, a fale te mają wiele korzystnych z punktu widzenia defektoskopii ultradźwiękowej własności. Dlatego też liczba opisanych w literaturze prób zastosowania tych przetworników w praktyce jest stosunkowo duża. Zastosowania te omówione są w rozdziale 5.

### 3.5.5. Podsumowanie własności przetworników na fale ultradźwiękowe rozchodzące się skośnie do powierzchni materiału

Omówione w tym podrozdziale przetworniki EMA, których uzwojenia składają się z szeregu równoległych prostoliniowych sekcji, stosowane są przede wszystkim do wytwarzania lub odbioru podłużnych i poprzecznych fal ultradźwiękowych rozchodzących się skośnie względem powierzchni badanego metalu (oprócz ich wykorzystania do generacji i odbioru fal powierzchniowych i płytowych). Unikalną w porównaniu z konwencjonalnymi głowicami stykowymi własnością tych przetworników jest możliwość prostej zmiany kierunku maksymalnego promieniowania poprzez zmianę częstotliwości prądu zasilającego uzwojenie nadawcze przetwornika. Na rys. 3.23 przedstawiono zakresy kątów, w jakich fale ultradźwiękowe poszczególnych rodzajów mogą być efektywnie wytwarzane w metalach nieferromagnetycznych dla normalnej ( $B_n$ ) i stycznej ( $B_s$ ) orientacji stałego pola magnetycznego [88, 151, 164].



Rys. 3.23. Zakres kątów, w jakim możliwe jest wytwarzanie fal ultradźwiękowych metodą EMA [88, 151, 164]

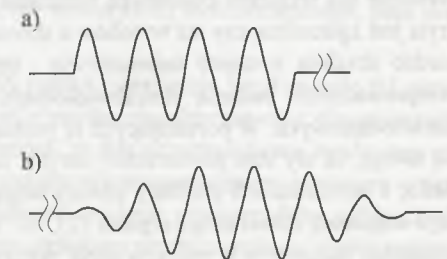
Fig. 3.23. Angular range of ultrasonic waves generated by the EMA method [88, 151, 164]

W metalach ferromagnetycznych dzięki występowaniu sił magnetycznych ulega pewnemu rozszerzeniu zakres kątowy generacji fal poprzecznych o polaryzacji SV przy normalnie skierowanym polu magnetycznym, a dzięki zjawisku magnetostrykcji zwiększa się amplituda fal

poprzecznych o tej samej polaryzacji, lecz wytwarzanych przy stycznie skierowanym polu magnetycznym.

Z powyższego rysunku wynika, że wykorzystanie rozchodzących się skośnie fal podłużnych jest niekorzystne, gdyż skuteczność przetwarzania EMA jest dla nich mniejsza niż dla fal poprzecznych. Fale poprzeczne o polaryzacji SV najefektywniej wytwarzane są dla kątów propagacji zbliżonych do 30°, jednak wykazują one wtedy wiele niekorzystnych własności. Po pierwsze, niewielkie zmiany kąta propagacji  $\Theta$  w pobliżu 30° powodują duże zmiany fazy fali ultradźwiękowej, które z kolei silnie wpływają na kształt wiązki ultradźwiękowej [196]. Po drugie, w przypadku badania próbek płaskorównoległych fala poprzeczna generowana pod optymalnym z punktu widzenia skuteczności przetwarzania kątem, tj. zbliżonym do 30°, odbija się pod takim samym kątem od drugiej - przeciwległej powierzchni ośrodka, a kąt ten jest zbliżony do kąta krytycznego, przy którym następuje transformacja na falę podłużną. Fala ta rozchodząc się w przybliżeniu równoległe do powierzchni badanego obiektu powoduje niekorzystne rozproszenie energii w dużej objętości próbki. Tak więc, w zastosowaniach wymagających wprowadzenia fali ultradźwiękowej pod pewnym kątem w stosunku do normalnej do powierzchni najbardziej celowe jest wykorzystanie przetworników EMA na fale poprzeczne o polaryzacji SH, które pozwalają na efektywne wytwarzanie fal ultradźwiękowych w szerokim zakresie kątów - od około 20° do 90°. Podstawową zaletą tego typu przetworników jest brak problemów związanych z transformacją fal ultradźwiękowych podczas ich odbicia, gdyż dla fal poprzecznych o polaryzacji SH transformacja taka nie występuje.

Poważną wadą kątowych przetworników EMA - zwłaszcza z punktu widzenia zastosowań w defektoskopii ultradźwiękowej - jest ich mała rozdzielczość, tzn. zdolność rozróżniania wad leżących blisko siebie w kierunku rozchodzenia się fali ultradźwiękowej. Wynika to z faktu, że promieniowanie wiązki fali ultradźwiękowej w żądanym kierunku uzyskuje się wykorzystując interferencję fal ultradźwiękowych wytwarzanych przez poszczególne sekcje uzwojenia przetwornika. W przeciwieństwie do normalnych przetworników EMA, które zasilane są zazwyczaj krótkim impulsem prądu (np. w postaci połowy okresu przebiegu sinusoidalnego), uzwojenia przetworników kątowych muszą być zatem zasilane impulsem obejmującym przynajmniej kilka okresów przebiegu sinusoidalnego. Impuls ultradźwiękowy w danym punkcie ośrodka ulega dodatkowo wydłużeniu w stosunku do impulsu elektrycznego przyłożonego do uzwojenia, gdyż drgania w tym punkcie rozpoczynają się, gdy dochodzi do niego przednie zbocze impulsu ultradźwiękowego wytworzonego przez najbliższą sekcję uzwojenia, a kończą wtedy, gdy do punktu tego dochodzi tylne zbocze impulsu wytworzonego przez najdalej położoną sekcję przetwornika. Efekt ten ilustruje rys. 3.24.



Rys. 3.24. Impuls elektryczny w uzwojeniu (a) i odpowiadający mu impuls ultradźwiękowy w ośrodku (b)

Fig. 3.24. Electric pulse in the winding (a) and the corresponding ultrasonic pulse in the medium (b)

Zjawisko to, na które w literaturze poświęconej przetwornikom EMA w ogóle nie zwraca się uwagi, stanowi zdaniem autora tej monografii poważne ograniczenie możliwości zastosowania tego typu przetworników EMA w praktyce. Na niekorzyść przetworników EMA do wytwarzania skośnie rozchodzących się fal ultradźwiękowych dodatkowo działa fakt, że ze względu na wymagany przebieg czasowy prądu wzbudzającego (kilka lub kilkanaście okresów przebiegu sinusoidalnego) wymagają one użycia bardziej skomplikowanych układów nadajników niż przetworniki normalne. Układy te komplikują się jeszcze bardziej, gdy w dążeniu do wyeliminowania jednego z dwóch symetrycznych maksimów charakterystyki kierunkowej promieniowania przetwornika stosuje się zespoły cewek nadawczych zasilanych z pewnym opóźnieniem (patrz punkt 3.5.2).

Wymienione wyżej trudności powodują, że pomimo znacznego zainteresowania przetwornikami EMA do wytwarzania i odbioru skośnie rozchodzących się fal ultradźwiękowych opublikowane wyniki ich badań dotyczą przede wszystkim analizy własności tych przetworników na drodze teoretycznej lub też uzyskane zostały w warunkach laboratoryjnych, a liczba opisanych zastosowań praktycznych jest bardzo mała. Do zastosowań tych powrócimy w rozdziale 5.

### 3.6. Różne aspekty przetwarzania

Przedstawiony dotąd przegląd własności przetworników EMA poświęcony był przede wszystkim omówieniu tych własności i charakterystyk, które bezpośrednio wynikają z konkretnej konfiguracji przetwornika, tzn. kształtu jego cewki nadawczej (odbiorczej) i orientacji stałego pola magnetycznego. Istnieją jednak pewne zagadnienia charakterystyczne dla przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego, które nie są specyficzne dla ściśle określonej konfiguracji przetwornika, lecz mają charakter bardziej ogólny.

Jednym z najważniejszych zagadnień tego rodzaju jest możliwość wykorzystania przetworników EMA do badania wyrobów o nieobrobionej powierzchni, np. wyrobów o wysokiej temperaturze lub wyrobów poddanych uprzednio obróbce termicznej, gdy ich powierzchnia pokryta jest zgorzeliną, czy też wyrobów o skorodowanej powierzchni itp. Taki stan powierzchni bardzo utrudnia, a często uniemożliwia - bez uprzedniego oczyszczenia tej powierzchni - przeprowadzenie badania ultradźwiękowego przy użyciu klasycznych stykowych głowic ultradźwiękowych. W poruszających tę problematykę pracach na temat metody EMA zwraca się uwagę, że zły stan powierzchni nie jest zasadniczą przeszkodą dla przeprowadzenia badania, a zgorzelina lub produkty korozji mogą nawet w pewnych warunkach znacznie zwiększyć amplitudę odbieranego sygnału [23, 40, 160, 175]. Warunki te to przede wszystkim duża zawartość magnetytu w rozpatrywanej warstwie powierzchniowej, dzięki któremu zjawisko przetwarzania EMA odbywa się przede wszystkim w oparciu o zjawisko magnetostrykcji, oraz ściśle przyleganie tej warstwy do podłoża. W warunkach laboratoryjnych - przy użyciu specjalnie przygotowanych próbek - stwierdzono, że dzięki obecności zgorzeliны amplituda sygnału odbieranego przez przetwornik EMA może wzrosnąć nawet o kilkadziesiąt decybeli [23, 40, 175]. W warunkach przemysłowych zjawisko to często jednak bardzo utrudnia przeprowadzenie badania ultradźwiękowego metodą EMA, gdyż skutek zmienności składu chemicznego powierzchniowej warstwy zgorzeliны lub produktów korozji, jej grubości, spistości i stopnia przylegania do podłoża amplituda sygnału odbieranego podczas przemiesz-

czania przetwornika po powierzchni wyrobu ulega znacznym wahaniom [160, 175]. Według pracy [175], w której opisano przyrząd do pomiaru grubości nieskorodowanego materiału rur kotłowych w elektrowni bez usuwania skorodowanej warstwy zewnętrznej (o grubości sięgającej 5 mm), zmiany amplitudy sygnału wzdłuż badanych rur sięgały w pewnych przypadkach kilku rzędów wielkości!

W naszych dotychczasowych rozważaniach przyjmowaliśmy, że niezbędnymi elementami każdego przetwornika EMA są źródło silnego stałego pola magnetycznego (magnes, elektromagnes) i przynajmniej jedna cewka. W punkcie 3.2 wspomniano już jednak, że wytwarzanie fal ultradźwiękowych może odbywać się bez udziału stałego pola magnetycznego, tj. na zasadzie oddziaływania prądów wirowych ze zmiennym polem magnetycznym wytwarzanym w ośrodku przez cewkę nadawczą przetwornika - tę samą, która indukuje prądy wirowe. Skuteczność takiego przetwornika jest jednak znacznie mniejsza (czyli konieczne jest znaczne zwiększenie amplitudy prądu w cewce nadawczej), a częstotliwość generowanej fali ultradźwiękowej jest dwukrotnie większa od częstotliwości prądu wzbudzającego. Jak wykazano praktycznie [129], metoda ta może znaleźć zastosowanie w przetwornikach nadawczych EMA przeznaczonych do badania wyrobów o temperaturze rzędu 1000°C, gdyż przy tak wysokiej temperaturze możliwość schłodzenia nabiegunków poniżej temperatury Curie materiałów magnetycznych użytych do ich wykonania jest problematyczna.

Metoda ta jest przypadkiem szczególnym ogólniejszej metody, w której do wytwarzania fal ultradźwiękowych wykorzystuje się dwa pola elektromagnetyczne o różnej częstotliwości. Analizę teoretyczną takiego sposobu wytwarzania fal ultradźwiękowych przeprowadzono w pracy [162], stwierdzając, że fale ultradźwiękowe zarówno o częstotliwości różnicowej, jak i sumacyjnej mogą być generowane dla znacznie wyższych częstotliwości niż w metodzie podstawowej, tj. z wykorzystaniem stałego pola magnetycznego, w której amplituda generowanej fali ultradźwiękowej maleje ze wzrostem częstotliwości począwszy już od kilku MHz. Autorowi nie są jednak znane żadne próby wykorzystania tej metody w praktyce. Metoda ta wydaje się być interesująca bardziej z poznawczego niż praktycznego punktu widzenia, zwłaszcza że zasady tej nie można wykorzystać w przetwornikach odbiorczych, które wymagają wytworzenia w badanym ośrodku stałego, lub co najwyżej wolnozmiennego, pola magnetycznego.

W literaturze poświęconej przetwornikom EMA rzadko uwzględnia się tłumienie fal ultradźwiękowych, wychodząc z założenia, że jest to zjawisko charakterystyczne dla propagacji fal, a nie sposobu ich wytwarzania. Zauważmy jednak, że fala ultradźwiękowa, rozchodząc się w ośrodku przewodzącym poddany działaniu stałego pola magnetycznego, wytwarza w nim prądy wirowe - na zjawisku tym opiera się przecież działanie przetworników odbiorczych EMA. Energia fal ultradźwiękowych ulega zatem częściowo przetworzeniu na ciepło związane z przepływem tych prądów, w związku z czym tłumienie tych fal w ośrodku zwiększa się. Zjawisko to omówiono w pracy [53], w której przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika tłumienia poprzecznej fali ultradźwiękowej w różnych ośrodkach, w których wytworzono silne jednorodne pole magnetyczne o kierunku zgodnym z kierunkiem propagacji fali. Stwierdzono, że w materiałach nieferromagnetycznych pole magnetyczne powoduje wzrost tłumienia tylko o kilka dziesiątych procent, natomiast dla niektórych rodzajów stali wzrost ten sięga nawet kilkadziesiąt procent. Zjawisko to w praktyce można jednak zazwyczaj zaniedbać, gdyż

w większości zastosowań przetworników EMA silne pole magnetyczne wytwarzane jest przede wszystkim w powierzchniowej warstwie wyrobu, a nie w całej jego objętości.

Możliwości zastosowania przetworników EMA zależą nie tylko od podstawowych własności samej metody elektromagnetyczno-akustycznej, lecz również od parametrów osiąganych przez realne przetworniki, współpracujące z określonymi układami elektronicznymi. Zagadnienia te będą omawiane w rozdziale 4, natomiast w tym miejscu warto poświęcić kilka zdań strefie martwej, gdyż jest to parametr, który w istotnym stopniu ogranicza zakres zastosowań przetworników EMA i ich konkurencyjność w stosunku do konwencjonalnych głowic stykowych. Ze względu na małą skuteczność przetworniki EMA wymagają pobudzenia cewki nadawczej impulsami napięcia o amplitudzie zazwyczaj większej niż 1 kV. W chwili pobudzenia cewki nadawczej takiego samego rzędu napięcie pojawia się na zaciskach cewki odbiorczej (często jest to ta sama cewka), powodując znaczne przesterowanie wzmacniacza odbiorczego, wskutek czego przez pewien czas (kilka mikrosekund) nie jest możliwy odbiór żadnych ech. Podobne problemy - choć w mniejszym stopniu - występują dla głowic konwencjonalnych, jednak w ich przypadku strefę martwą można łatwo zmniejszyć stosując głowice podwójne umieszczone na odpowiednich nasadkach opóźniających. W przypadku przetworników EMA opóźnienie chwili wejścia fali ultradźwiękowej do ośrodka w stosunku do elektrycznego impulsu nadawczego nie jest możliwe, gdyż fala ultradźwiękowa jest wytwarzana bezpośrednio na powierzchni badanego materiału, a energia jest przekazywana z przetwornika nadawczego do tego materiału za pośrednictwem pola elektromagnetycznego. Tak więc stosunkowo duża - wynosząca co najmniej 5 - 10 mm - strefa martwa jest parametrem charakterystycznym dla impulsowo pracujących przetworników EMA, który znacznie ogranicza zakres ich zastosowań, zwłaszcza w odniesieniu do pomiarów grubości, a jak to zostanie dalej pokazane (rozdział 5), jest to jeden z najważniejszych jak dotychczas obszarów zastosowań tych przetworników.

### 3.7. Podsumowanie

Z przeprowadzonego w rozdziałach 2 i 3 przeglądu zagadnień teoretycznych dotyczących przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego wynika, że wskutek złożoności opisu matematycznego procesu przetwarzania i realnych przetworników istnieje wiele modeli matematycznych przetworników EMA, które tworzone są po przyjęciu szeregu założeń upraszczających. W zależności od zakresu przyjętych uproszczeń modele te prowadzą do różnych zależności opisujących własności przetwornika o określonej konfiguracji. Weryfikacja praktyczna tych modeli jest na ogół niedostateczna, głównie dlatego, że najczęściej prowadzona była przy użyciu pojedynczych egzemplarzy przetworników. W związku z tym w literaturze brak jest prostych wzorów, podobnych do stosowanych dla przetworników piezoelektrycznych, które opisywałyby podstawowe parametry pola akustycznego przetwornika EMA o określonej konfiguracji i które byłyby uznawane przez ogół badaczy.

Najprostsze z tych modeli, które bazują na założeniu, że generowana przez przetwornik fala ultradźwiękowa jest falą płaską, pozwalają jedynie na oszacowanie sprawności przetwarzania energii elektrycznej na ultradźwiękową i odwrotnie oraz jej zależności od własności fizycznych badanego materiału (gęstości, konduktywności, przenikalności magnetycznej - przy za-

łożeniu że jest ona stała - i stałych sprężystości) i temperatury; nie dają one natomiast żadnych informacji na temat rozkładu pola akustycznego wytwarzanego przez przetwornik.

W modelach bardziej złożonych przyjmuje się, że źródłem fal ultradźwiękowych są siły równomiernie rozłożone na powierzchni metalu w obszarze, który stanowi rzut cewki przetwornika na tę powierzchnię. Podejście takie jest szczególnie często wykorzystywane do oceny własności kierunkowych przetworników, zwłaszcza w polu dalekim, a odpowiednie obliczenia prowadzone są w oparciu o klasyczną teorię promieniowania źródeł fal ultradźwiękowych. Modele te nie pozwalają jednak na ogół na uwzględnienie wpływu zjawiska unoszenia na charakterystyki przetworników.

Najbardziej złożone modele przetworników EMA podawane są w postaci równań różniczkowych lub ich rozwiązań w postaci całkowitej. Uzyskanie na ich podstawie wyników przydatnych w praktyce wymaga zazwyczaj zastosowania metod numerycznych. Wybór do obliczeń numerycznych odpowiedniego modelu matematycznego stwarza jednak duże trudności, głównie dlatego, że walidacja tych modeli nie została w pełni przeprowadzona, gdyż ze względu na duże koszty i pracochłonność mogła być tylko fragmentaryczna, lub walidacja ta była prowadzona w warunkach odmiennych od założonych podczas budowy modelu (np. badane przetworniki najczęściej pobudzane są impulsowo, podczas gdy w modelach matematycznych przyjmuje się najczęściej pobudzenie w postaci ciągłego przebiegu sinusoidalnego). Kolejnym poważnym problemem związanym z walidacją i wykorzystaniem tych modeli jest trudność, a często niemożność uzyskania pełnych danych, dotyczących parametrów i charakterystyk badanych metodą EMA materiałów ferromagnetycznych, których znajomość w procesie modelowania przetworników EMA ma zasadnicze znaczenie.

Najistotniejszym - zdaniem autora - mankamentem dotychczas przeprowadzonych i przedstawionych w literaturze rozważań teoretycznych na temat metody EMA jest brak prac, których celem byłaby optymalizacja przetworników, a zwłaszcza jego cewek, pod kątem sprawności przetwarzania. Do tej pory nie zostały sformułowane, wynikające z przesłanek teoretycznych, żadne zalecenia dotyczące, na przykład, optymalnej ze względu na sprawność przetwarzania liczby zwojów cewki nadawczej przetwornika przy założonych jej wymiarach (których dobór może wynikać z założonych parametrów pola akustycznego przetwornika). Rozwiązanie tego problemu wymagałoby jednak stworzenia modelu matematycznego, który oprócz opisu pola akustycznego przetwornika obejmowałby opis impedancji cewki oraz opis własności statycznych i dynamicznych zastosowanego układu nadajnika. Każdy z tych problemów jest złożonym zagadnieniem matematycznym. W przypadku cewki, na przykład, duże problemy stwarza uwzględnienie wpływu na jej impedancję zblizzonego do niej metalu, zwłaszcza ferromagnetycznego, a także wpływu sąsiadujących z cewką nabiegunków. W klasycznej metodzie prądów wirowych zagadnienia te są obecnie powszechnie analizowane przy użyciu metody elementów skończonych.

Biorąc pod uwagę złożoność problematyki modelowania matematycznego przetworników EMA nie należy zatem oczekiwać, że optymalizacja tych przetworników będzie możliwa na drodze wyłącznie teoretycznej (choćby kontynuacja prac nad stworzeniem efektywnych algorytmów numerycznej analizy przetworników EMA jest w pełni uzasadniona) i opracowanie konstrukcji optymalnych dla konkretnego zastosowania będzie wymagać każdorazowo przeprowadzenia licznych badań i prób laboratoryjnych.

## 4. ELEMENTY PRZETWORNIKÓW I WSPÓŁPRACUJĄCE Z NIMI UKŁADY ELEKTRONICZNE

### 4.1. Cewki nadawcze i odbiorcze

Dużą zaletą przetworników EMA jest ich prosta konstrukcja. Najprostszy przetwornik EMA może składać się jedynie z magnesu i płaskiej cewki. Podstawowe kształty uzwojeń stosowanych w przetwornikach EMA pokazano w rozdziale 1 na rys. 1.2.

Z punktu widzenia układów elektronicznych współpracujących z przetwornikiem EMA (nadajnik impulsów, wzmacniacz odbiorczy) podstawowe znaczenie ma znajomość charakteru i przynajmniej przybliżonej wartości impedancji cewki. Problem wyznaczenia wpływu ośrodka metalicznego na składowe impedancji cewki zbliżonej do powierzchni tego ośrodka znajduje szerokie odzwierciedlenie w literaturze dotyczącej jednej z najważniejszych metod wykorzystywanych w badaniach nieniszczących materiałów, tj. metody prądów wirowych. Jedną z podstawowych publikacji poświęconych tym zagadnieniom jest praca [177], której wyniki są wykorzystywane w kilku pracach poświęconych modelom teoretycznym przetworników EMA, zwłaszcza zawierających cewki spiralne. Do wytwarzania i odbioru skośnie rozchodzących się fal ultradźwiękowych często stosowane są uzwojenia złożone z szeregu równoległych sekcji (np. cewki typu meander). Analizę wpływu przewodzącego prąd ośrodka na indukcyjność i rezystancję takiego uzwojenia przeprowadzono np. w pracach [73, 93].

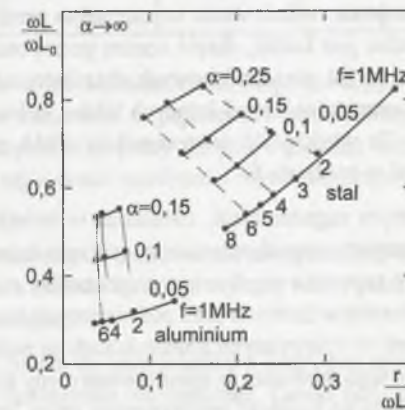
Podawane w literaturze dotyczące metod prądów wirowych wyniki można wykorzystywać w odniesieniu do cewek przetworników EMA w bardzo ograniczonym jednak zakresie. Po pierwsze, cewki przetworników EMA pracują zazwyczaj przy znacznie większej częstotliwości (1 - 10 MHz) niż częstotliwości typowo wykorzystywane w badaniach prowadzonych przy użyciu metod prądów wirowych (kilkadziesiąt do kilkaset kHz). Po drugie, i co ważniejsze, na impedancję cewki przetwornika EMA w dużym stopniu - często współmiernym z wpływem badanego ośrodka - wpływają również zbliżone do niej nabiegunki. Wpływ ten jest szczególnie duży w przetwornikach EMA na fale poprzeczne, w których cewka całą powierzchnią przylega do powierzchni nabiegunka. (Fakt ten jest przyczyną kolejnego problemu, polegającego na wzbudzeniu fal ultradźwiękowych nie tylko w badanym materiale, lecz również w korpusie samego przetwornika. Eliminacja tego zjawiska powinna być uwzględniona podczas konstruowania obwodu magnetycznego przetwornika.) Często skomplikowany kształt nabiegunków powoduje, że ilościowe uwzględnienie ich wpływu na impedancję cewki jest jednak bardzo trudne i zagadnienia te nie są rozpatrywane w literaturze. Niemniej jednak, jeżeli nawet wpływ nabiegunków na impedancję cewki zostanie pominięty, to i tak zależności jej składowych od odległości cewki od powierzchni metalu, rodzaju tego metalu i często-

tliwości pozwalają na wyciąganie pewnych, przynajmniej jakościowych, wniosków dotyczących niektórych własności przetworników EMA.

Na rys. 4.1 przedstawiono uzyskane przez autora przykładowe zależności rezystancji  $r$  i reakcji  $\omega L$  spiralnej cewki od częstotliwości i bezwymiarowej odległości  $\alpha$  cewki ( $\alpha = h/R$ ,  $h$  - odległość,  $R$  - średni promień cewki) od powierzchni aluminiowej i stalowej (wzorec W1) próbki [60].  $L_0$  oznacza indukcyjność cewki znacznie oddalonej od wszelkich przewodzących materiałów i oddzielonej od nabiegunków (tzw. indukcyjność w powietrzu).

Pomiary przeprowadzone dla różnych cewek wykazują, że szczególnie duże zmiany indukcyjności cewki występują, gdy jest ona zbliżana do metalu nieferromagnetycznego o dużej konduktywności (miedź, mosiądz, aluminium). W skrajnych przypadkach indukcyjność cewki przylegającej do powierzchni takiego metalu była aż pięciokrotnie mniejsza od indukcyjności cewki oddalonej od metalu o kilka milimetrów. Dla cewek zbliżonych do próbki stalowej zakres zmian indukcyjności jest mniejszy; zwiększa się natomiast rezystancja strat. Gdy cewka zamocowana jest do przetwornika, to jego nabiegunki powodują wstępną zmianę impedancji cewki w stosunku do wartości obserwowanej dla cewki swobodnej i zakres zmian tej impedancji podczas zbliżania przetwornika do metalowej próbki ulega zmniejszeniu. Niemniej jednak, zbliżenie cewki zamontowanej w przetworniku do metalu o konduktywności kilkadziesiątkrotnie przewyższającej konduktywność materiału, z którego wykonane są nabiegunki, powoduje zmniejszenie jej indukcyjności nawet o kilkadziesiąt procent. Dla próbek stalowych - o konduktywności zazwyczaj porównywalnej z konduktywnością materiału nabiegunków - zakres zmian indukcyjności cewki jest znacznie mniejszy.

Omówione wyżej prawidłowości mają duże znaczenie w odniesieniu do stałości częstotliwości generowanej w ośrodku fali ultradźwiękowej. Jednym z najczęściej stosowanych sposobów pobudzania przetwornika EMA, wytwarzającego fale ultradźwiękowe rozchodzące się normalnie w stosunku do powierzchni badanego materiału, jest rozładowanie przez cewkę nadawczą kondensatora naładowanego uprzednio do wysokiego napięcia. Częstotliwość wytworzonych w ten sposób elektrycznych drgań gasnących zależy zarówno od pojemności tego kondensatora, jak i indukcyjności cewki. Jeżeli indukcyjność cewki zmienia się przy zbliżaniu lub oddalaniu przetwornika od próbki, to zmianom ulega również częstotliwość drgań elektrycznych w obwodzie utworzonym przez cewkę nadawczą i kondensator, a tym samym częstotliwość drgań ultradźwiękowych wytwarzanych w ośrodku. Prowadzone przez autora badania różnych przetworników EMA wykazały, że podczas badania metali nieferromagnetycz-



Rys. 4.1. Zależność składowych impedancji cewki od odległości cewki od powierzchni metalu i częstotliwości dla próbki aluminiowej i stalowej [60]

Fig. 4.1. Components of the coil's impedance as a function of coil-to-metal surface separation and frequency for an aluminium and a steel sample [60]



nych o dużej konduktywności zmiana częstotliwości generowanej fali ultradźwiękowej może sięgać nawet 30 - 40% (dla przetwornika ze spiralną cewką na fale podłużne) przy zmianie odległości przetwornika od powierzchni metalu o 2 - 3 mm [60]. Dla metali ferromagnetycznych zmiany te nie przekraczają kilku procent [60, 145].

Wzrost rezystancji cewki nadawczej wywołany oddziaływaniem na nią nabiegunków przetwornika i badanego metalu powoduje, że cewki przetworników EMA charakteryzują się stosunkowo niską - wynoszącą nieraz tylko 2 - 3 - dobrocią. Silne wytłumienie jest zatem naturalną cechą tych przetworników i jeśli do pobudzenia przetwornika nadawczego wykorzystuje się rozładowanie kondensatora przez cewkę nadawczą, to czas trwania generowanego impulsu jest krótki, dzięki czemu przetworniki EMA do wytwarzania normalnie rozchodzących się fal ultradźwiękowych charakteryzują się bardzo dobrą rozdzielczością, tzn. zdolnością rozróżniania wad leżących blisko siebie w kierunku rozchodzenia się fali ultradźwiękowej. Ta właściwość przetworników EMA zilustrowana zostanie przykładowymi oscylogramami w rozdziale 6.

Ważnym zagadnieniem, zwłaszcza w świetle bardzo małej skuteczności przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego, jest taki dobór liczby zwojów cewki nadawczej i odbiorczej, który zapewni uzyskanie z przetwornika maksymalnego sygnału. Autor nie napotkał jednak w literaturze żadnych prac poświęconych temu zagadnieniu, a w przypadkach, gdy parametry cewek w opisywanych konstrukcjach są podawane, ich wybór nie jest uzasadniany. Rozwiązanie tego problemu w sposób analityczny jest praktycznie niemożliwe - przede wszystkim ze względu na trudność analitycznego opisu impedancji cewki, na którą wpływają zarówno nabiegunki, jak i badany materiał, a także ze względu na konieczność modelowania procesów dynamicznych w celu uwzględnienia strat energii w nadajniku impulsów. Z doświadczeń autora zdobytych podczas badań przetworników ze spiralną cewką na fale podłużne [60, 144] i przetworników z uzwojeniem w postaci ramki na fale poprzeczne [145], w których stosowano szereg wymiennych cewek o zbliżonych wymiarach, lecz o różnej liczbie zwojów, wynika, że dla żądanej częstotliwości drgań i konkretnego układu nadajnika można tak dobrać w sposób eksperymentalny liczbę zwojów cewki nadawczej, aby amplituda wytwarzanej fali ultradźwiękowej była maksymalna. Liczba ta zazwyczaj wynosi od kilku zwojów dla częstotliwości z zakresu 5 - 10 MHz do kilkunastu zwojów, gdy częstotliwość fali ultradźwiękowej ma wynosić 1 - 5 MHz. Takie też wartości podawane są powszechnie w dostępnych w literaturze opisach konkretnych przetworników. Wymagania dotyczące cewek odbiorczych są odmienne - optymalna ze względu na amplitudę indukowanego w nich napięcia liczba zwojów wynosi zazwyczaj od kilkunastu do kilkudziesięciu; liczba ta powinna być jak największa, ale jest ona ograniczona od góry przez pojemność własną cewki.

Uzwojenia przetworników EMA wytwarzane są jednym z czterech sposobów: jako cewki nawijane ręcznie drutem nawojowym, w postaci obwodu drukowanego lub w technologii cienkowarstwowej, albo też przy użyciu płaskiego kabla wielożyłowego. Porównanie własności uzwojeń wykonanych tymi technikami przedstawia tabela 4.1 [73].

Rezystancja elektryczna uzwojenia jest uwarunkowana przede wszystkim grubością materiału przewodzącego i jest najwyższa dla uzwojeń wykonanych w technologii cienkowarstwowej. Wytwarzanie uzwojeń w postaci obwodu drukowanego lub cienkowarstwowego zapewnia doskonałą powtarzalność, lecz wymaga poniesienia znacznych kosztów początkowych i jest ekonomicznie uzasadnione w przypadku podjęcia produkcji seryjnej, podczas gdy większość

Porównanie technik wytwarzania cewek do przetworników EMA

Technika wytwarzania cewki	Rezystancja	Koszt początkowy	Powtarzalność	Maksymalna częstotliwość pracy	Maksymalna temperatura pracy
Drut nawojowy	mała	niski	dostateczna	mała	wysoka
Obwód drukowany	mała	wysoki	doskonała	duża	średnia
Technologia cienkowarstwowa	duża	wysoki	doskonała	duża	średnia
Płaski kabel	mała	niski	dobra	mała	niska

opisywanych w literaturze przetworników EMA to pojedyncze konstrukcje prototypowe. Maksymalna częstotliwość pracy wynika przede wszystkim z pojemności pasozytniczych i równomierności uzwojenia. O maksymalnej temperaturze pracy decyduje głównie rodzaj materiału przewodzącego (np. miedź, wolfram) i największe możliwości wyboru oferuje pod tym względem zastosowanie drutu nawojowego.

Wszystkie cewki do przetworników EMA skonstruowanych przez autora nawijane były drutem nawojowym przy użyciu specjalnej formy. Inna metoda ręcznego wykonywania płaskich cewek opiera się na wykorzystaniu taśmy samoprzylepnej.

Ważnym zagadnieniem związanym z konstrukcją cewek do przetworników EMA jest zapewnienie ich odporności na przebicie elektryczne i uszkodzenia mechaniczne. Cewki nadawcze zasilane są napięciem o wartości szczytowej sięgającej kilowoltów, w związku z czym istnieje duże ryzyko wystąpienia przebiegów elektrycznych pomiędzy cewką a powierzchnią badanego metalu lub powierzchnią nabiegunka, a także przebiegów międzyzwojowych. Cewki nawijane ręcznie i przeznaczone do pracy w normalnej temperaturze najczęściej wykonywane są z emaliowanego drutu miedzianego, w związku z czym maksymalne dopuszczalne napięcie międzyzwojowe wynosi najczęściej 200 - 300 V. Aby zapobiec przebiciom między cewką i powierzchnią nabiegunka lub badanego metalu, konieczne jest zastosowanie odpowiednich przekładek izolacyjnych, wskutek czego następuje niekorzystne ze względu na obniżenie skuteczności oddalenie cewek od powierzchni badanego wyrobu.

Cewki przetworników EMA są narażone na uszkodzenie mechaniczne podczas przemieszczania przetwornika wzdłuż nieobrobionej, nierównej powierzchni badanego wyrobu, a przede wszystkim podczas przykładania przetwornika do wyrobu wykonanego z metalu ferromagnetycznego, gdyż wskutek znacznych sił przyciągania bardzo prawdopodobne jest uderzenie przetwornika o powierzchnię wyrobu i zgniecenie cewki. Konstrukcja przetwornika EMA powinna zatem uwzględniać zabezpieczenia przeciwko takim uszkodzeniom w postaci ograniczników, osłon itp.

Interesujące rozwiązanie tego problemu, polegające na zmianie sposobu nawijania cewki i zastosowaniu dodatkowego rdzenia, zaproponowano w pracy [165]. Na rys. 4.2 przedstawiono konstrukcję zmodyfikowanej cewki typu meander. Cewka nawijana jest w szczelinach rdzenia o kształcie grzebienia, wykonanego z materiału o dużej indukcji nasycenia i przenikalności magnetycznej oraz małej konduktywności. Zmienny prąd przepływający przez cewkę wytwarza w rdzeniu zmienne pole magnetyczne, którego linie sił zamykają się przez badany obiekt, a rozkład tego pola na powierzchni metalu jest podobny do rozkładu pola wytwarza-

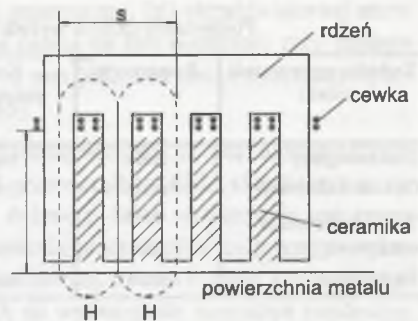
nego przez cewkę typu meander umieszczoną bezpośrednio przy tej powierzchni. Rdzeń z tak nawiniętą cewką umieszcza się pod nabiegunkiem (wymagana składowa normalna indukcji) lub między nabiegunkami (wymagana składowa styczna) magnesu lub elektromagnesu służącego do wytworzenia silnego stałego pola magnetycznego. Chociaż autor tego rozwiązania podkreśla wystarczającą skuteczność i dużą odporność mechaniczną cewki o zaproponowanej przez niego konstrukcji, nie została ona jednak wykorzystana w innych, opisywanych w literaturze konstrukcjach przetworników. Główną tego przyczyną należy upatrywać w wysokich kosztach wytworzenia rdzenia, który spełnia podane wcześniej wymagania. Ze względu na niską indukcję nasycenia (0,3 - 0,4 T) nie nadają się do tego celu ferryty; tak więc rdzenie te muszą być składane z szeregu cienkich blach transformatorowych lub wykonywane ze spiekanych w odpowiednich formach proszków magnetycznych.

Inny oryginalny sposób mechanicznego zabezpieczenia cewki zastosowany został w przetworniku opisanym w pracy [86]. Płaska spiralna cewka ułożona jest na górnej powierzchni miedzianej podkładki o kształcie pokazanym na rys. 4.3. Prądy wirowe indukowane przez cewkę na górnej powierzchni podkładki przepływają przez rozcięcie na dolną powierzchnię i indukują prądy wirowe w badanym metalu, do którego podkładka jest zbliżona. W cytowanej pracy brak jest jednak bliższych informacji na temat skuteczności takiego rozwiązania, a autorowi tej monografii nie są znane przykłady jego zastosowania w innych konstrukcjach przetworników EMA.

Do zagadnień dotyczących cewek przetworników powrócimy jeszcze w rozdziale 5 podczas omawiania przetworników przeznaczonych do pracy w wysokiej temperaturze.

## 4.2. Obwód magnetyczny przetwornika

Z wyjątkiem pewnych szczególnych przypadków przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego amplituda sygnału odbieranego przez nadawczo-odbiorczy przetwornik EMA jest zasadniczo wprost proporcjonalna do kwadratu indukcji stałego pola magnetycznego w powierzchniowej warstwie badanego wyrobu. Tak więc odpowiedni dobór źródła stałego pola magnetycznego oraz konstrukcja obwodu magnetycznego przetwornika mają podstawowo-



Rys. 4.2. Zmodyfikowana konstrukcja cewki przetwornika EMA [165]

Fig. 4.2. Modified design of a coil for EMA transducers [165]



Rys. 4.3. Cewka z pierścieniową podkładką odległościową [86]

Fig. 4.3. Coil with a ring spacer washer [86]

we znaczenie dla zapewnienia odstępu napięciowego sygnału od szumu umożliwiającego przeprowadzenie badania lub pomiaru. Jako źródła silnego pola magnetycznego w przetwornikach EMA wykorzystuje się elektromagnesy lub magnesy trwałe.

Najsilniejsze pola uzyskiwane są najczęściej przy użyciu elektromagnesów prądu stałego, które wyposażone są w odpowiednio ukształtowane nabiegunki, zapewniające koncentrację linii sił pola magnetycznego w obszarze powierzchni badanego materiału, do którego zbliżona jest cewka nadawcza lub odbiorcza przetwornika EMA. Elektromagnesy stosowane w przetwornikach EMA pozwalają na uzyskanie pola magnetycznego o indukcji sięgającej 1,5 - 2 T. Podstawowymi wadami takich elektromagnesów są ich znaczne wymiary, masa i pobór mocy. Dwa ostatnie parametry sięgają często wartości rzędu - odpowiednio - kilkudziesięciu kilogramów i kilkuset watów [19, 86, 160]. Znaczna moc elektryczna wydzielana w uzwojeniu elektromagnesu w postaci ciepła wymaga z kolei rozbudowania układów chłodzenia, zwiększających ogólne wymiary przetwornika. Dlatego też elektromagnesy używane są przede wszystkim w zastosowaniach stacjonarnych, gdy przetwornik EMA montowany jest na linii technologicznej i doprowadzenie do niego energii elektrycznej i czynnika chłodzącego oraz wykonanie i zainstalowanie odpowiedniego oprzyrządowania mechanicznego, służącego do dosuwania lub odsuwania przetwornika od badanego obiektu, nie stwarzają większych problemów.

Zmniejszenie gabarytów elektromagnesów i pobieranej przez nie mocy można uzyskać zasilając je w sposób impulsowy, dzięki czemu eliminuje się najczęściej konieczność stosowania układów chłodzących [32]. Wykorzystuje się w tym przypadku fakt, że czas potrzebny na przeprowadzenie - na podstawie nadchodzących do przetwornika ech - pomiaru lub badania nie przekracza na ogół kilkudziesięciu mikrosekund, a następny pomiar (badanie) przeprowadzany jest po czasie, który wynika z częstotliwości powtarzania impulsów nadawczych i wynosi najczęściej przynajmniej kilka milisekund. Ze względu na związane ze zmiennym polem magnetycznym straty na prądy wirowe rdzeń elektromagnesu zasilanego w sposób impulsowy musi być wykonany z izolowanych blach magnetycznych. Rozwiązanie takie przyjęto na przykład w opisanym w rozdziale 6 grubościomierzu EMA wykonanym w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej [49]. Odmianą przetworników EMA z elektromagnesem zasilanym impulsowo są przetworniki, w których w ogóle nie stosuje się rdzenia magnetycznego. W takim przypadku wytworzenie pola magnetycznego o indukcji sięgającej kilku dziesiątych tesli wymaga zasilania cewki magnesującej impulsami prądu o wartości szczytowej sięgającej kilku tysięcy amperów [30]. Perspektywnie do wytworzenia silnego pola magnetycznego przewiduje się wykorzystanie zjawiska nadprzewodnictwa [151]. Zastosowanie nadprzewodzących elektromagnesów pozwoli na wytworzenie pola magnetycznego o indukcji sięgającej 5 - 10 T, przy której skuteczność przetworników EMA staje się zbliżona do skuteczności przetworników piezoelektrycznych. Przewiduje się, że przetworniki EMA wykorzystujące efekt nadprzewodnictwa znajdą szerokie zastosowania podczas badań nieniszczących materiałów realizowanych w przestrzeni kosmicznej [151].

W małogabarytowych przetwornikach EMA, przeznaczonych przede wszystkim do badań ręcznych, preferowane jest wykorzystanie magnesów trwałych. Zastosowanie magnesów trwałych wykonanych z tradycyjnych materiałów magnetycznych pozwala na zmniejszenie masy przetwornika EMA do kilkuset gramów, jednak dopiero wykorzystanie materiałów zawierających domieszki pierwiastków ziem rzadkich (np. samar, ren, neodym) pozwoliło na konstruowanie przetworników EMA o gabarytach podobnych jak dla głowic piezoelektrycz-

nych. Spośród materiałów tradycyjnych do najpopularniejszych należą stopy typu Alnico; w kilku przetwornikach EMA z magnesami trwałymi wykonanych przez autora [60, 61, 144, 145] zastosowano magnesy odlane ze stopu Alnico 400B, który charakteryzuje się natężeniem powściągającym  $H_C = 44 \text{ kA/m}$  i energią maksymalną  $(BH)_{maks} = 36,8 \text{ kJ/m}^3$ . Magnesy z domieszkami pierwiastków ziem rzadkich stosowane w przetwornikach EMA początkowo wykonywane były ze stopu samaru i kobaltu, jednak w najnowszych konstrukcjach wykorzystuje się przede wszystkim magnesy neodymowe (Nd-Fe-B). Porównanie podanych wyżej typowych parametrów magnetycznych stopu Alnico z parametrami magnesów neodymowych ( $H_C = 892 \text{ kA/m}$ ,  $(BH)_{maks} = 255 \text{ kJ/m}^3$ ) zastosowanych przez autora w przetworniku na fale poprzeczne [70] wskazuje na olbrzymi postęp w zakresie inżynierii materiałów magnetycznych, który umożliwił znaczną miniaturyzację przetworników EMA. Dostępność silnych magnesów o wymiarach nie przekraczających kilku milimetrów pozwoliła również na opracowanie jednego z najbardziej interesujących rodzajów przetworników EMA, tj. przetwornika pracującego w konfiguracji PPM - opisanego w punkcie 3.5.4. Przy swych bardzo małych wymiarach przetworniki z magnesami zawierającymi domieszki pierwiastków ziem rzadkich pozwalają na uzyskanie pola magnetycznego o indukcji wynoszącej typowo 0,3 - 0,5 T podczas badania metali nieferromagnetycznych (składowa styczna indukcji) i 1 - 1,5 T w przypadku metali ferromagnetycznych (składowa normalna) (np. [51, 52]).

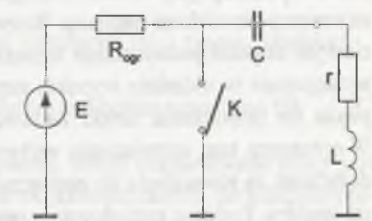
Przetworniki EMA z magnesami trwałymi zdecydowanie górują nad przetwornikami z elektromagnesami pod względem gabarytów; mają one jednak dwie zasadnicze wady, które w wielu przypadkach znacznie utrudniają lub uniemożliwiają ich zastosowanie. Pierwsza z tych wad ujawnia się podczas badania materiałów ferromagnetycznych, gdy znaczne siły przyciągania stwarzają duże ryzyko uszkodzenia przetwornika, a zwłaszcza jego cewki (cewek), wskutek silnego uderzenia przetwornika o powierzchnię metalu, które może łatwo nastąpić, gdy przetwornik jest przykładany do tej powierzchni w celu przeprowadzenia badań ręcznych. Siły te znacznie utrudniają precyzyjne prowadzenie głowicy po powierzchni materiału ferromagnetycznego, wymagając użycia znacznej siły ze strony operatora. Przy wykorzystaniu przetworników z elektromagnesami problemy te występują w znacznie mniejszym stopniu, gdyż - po pierwsze - przetworniki takie ze względu na swoje gabaryty wymagają zastosowania odpowiednich mechanicznych układów prowadzących i - po drugie - podczas zbliżania przetwornika do powierzchni obiektu (przed rozpoczęciem badania) lub oddalania od niej (po zakończeniu badania) wzmiankowane siły przyciągania występują w minimalnym stopniu, gdyż zasilanie elektromagnesu jest wtedy wyłączone. Ponadto, siły przyciągania pomiędzy przetwornikiem i badanym obiektem można również znacznie zmniejszyć stosując elektromagnesy zasilane impulsowo. Druga wada, która również związana jest bezpośrednio ze wspomnianymi siłami przyciągania, polega na gromadzeniu się na powierzchni czołowej przetwornika zanieczyszczeń o własnościach ferromagnetycznych (np. okruchy, opiłki, pył magnetyczny itp.), które po pewnym czasie tworzą warstwę uniemożliwiającą dalszą realizację badania, a ich usunięcie z oczywistych względów jest bardzo trudne. Prostim rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie zdejmowalnych osłon, wykonanych np. z gumy silikonowej [200], które nakłada się na cewkę i powierzchnię czołową nabiegownika przetwornika. Zdjęcie takiej osłony w celu usunięcia zanieczyszczeń jest znacznie łatwiejsze w przetwornikach z elektromagnesem. Użycie osłony powoduje jednak oddalenie przetwornika od powierzchni badanego metalu o co najmniej kilka dziesiątych milimetra, co pociąga za sobą zmniejszenie skuteczności przetwornika.

Projektowanie i analiza obwodu magnetycznego wymagają zastosowania metod numerycznych i obecnie zadania te realizowane są za pomocą komercyjnie dostępnych programów komputerowych do analizy statycznych obwodów magnetycznych. Dalsza dyskusja tych zagadnień jako typowych zadań magnetostatyki leży poza zakresem niniejszej pracy, a w literaturze poświęconej przetwornikom EMA jest podejmowana sporadycznie, i to w bardzo ograniczonym zakresie (np. [151]).

### 4.3. Nadajniki impulsów

Podstawowym sposobem zwiększenia amplitudy sygnałów uzyskiwanych przy użyciu przetworników EMA jest wytworzenie silnego stałego pola magnetycznego na powierzchni badanego wyrobu. Niezależnie od tego cewki nadawcze tych przetworników muszą być zasilane impulsami o amplitudzie znacznie wyższej niż w przypadku przetworników piezoelektrycznych. Przetworniki EMA pobudzane są zasadniczo impulsami o dwóch podstawowych kształtach. W przypadku przetworników wytwarzających fale ultradźwiękowe rozchodzące się normalnie do powierzchni materiału są to najczęściej przebiegi sinusoidalne o wykładniczo zanikającej amplitudzie (o możliwie krótkim czasie trwania), a w skrajnych przypadkach przyjmują one postać trwającego pół okresu przebiegu sinusoidalnego. Przetworniki generujące fale ultradźwiękowe, które rozchodzą się skośnie do powierzchni materiału, działają w oparciu o interferencję fal wytwarzanych przez poszczególne sekcje cewki nadawczej, w związku z czym wymagają one zasilania impulsami sinusoidalnymi o prostokątnej obwiedni i czasie trwania wynoszącym co najmniej kilka okresów przebiegu sinusoidalnego.

Do wytwarzania szybko zanikających drgań gasnących w cewce nadawczej przetwornika powszechnie wykorzystywany jest obwód pokazany na rys. 4.4. W obwodzie tym kondensator C jest ładowany przez rezystor ograniczający wartość prądu  $R_{ogr}$  do napięcia  $E$ . Po zamknięciu klucza K kondensator rozładowuje się przez cewkę nadawczą, a częstotliwość powstałych w obwodzie drgań elektrycznych (jest to jednocześnie częstotliwość wytwarzanych w badanym ośrodku drgań ultradźwiękowych) wynika z parametrów  $L$ ,  $r$  cewki nadawczej (rezystancja  $r$  reprezentuje przede wszystkim straty elektryczne, gdyż ze względu na bardzo małą skuteczność przetwarzania straty na promieniowanie można pominąć) i pojemności kondensatora  $C$ . Drgania te są w naturalny sposób silnie tłumione ze względu na charakterystyczną dla cewek przetworników EMA małą dobroć.



Rys. 4.4. Uproszczony schemat nadajnika EMA opartego na rozładowywaniu kondensatora

Fig. 4.4. Simplified diagram of an EMA transmitter based on discharging of a capacitor

Według podobnej zasady działa większość nadajników przeznaczonych do współpracy z przetwornikami piezoelektrycznymi, jednak pewne istotne różnice między własnościami elektrycznymi przetworników obu rodzajów powodują, że nadajniki EMA muszą być konstruowane z uwzględnieniem specyficznych wymagań stawianych przez przetworniki EMA.

Po pierwsze, cewki nadawcze przetworników EMA stanowią dla nadajnika obciążenie o charakterze indukcyjnym i ich impedancja wynosi typowo od kilku do kilkudziesięciu omów, podczas gdy przetworniki piezoelektryczne są elementami o charakterze pojemnościowym i o znacznie większej impedancji. Po drugie, ze względu na swoją małą skuteczność przetworniki EMA wymagają pobudzenia impulsami napięcia o amplitudzie wynoszącej typowo kilka kilowoltów, podczas gdy dla przetworników piezoelektrycznych (przynajmniej ceramicznych) zazwyczaj wystarczające jest napięcie nie przekraczające 200 - 300 V. Niemniej jednak, w wielu opublikowanych pracach stwierdza się, że do pobudzenia przetworników EMA wykorzystywano nadajniki klasycznych defektoskopów ultradźwiękowych o wysokim napięciu wyjściowym (np. defektoskop DUK-6W w pracach [14, 16, 21 - 24, 26, 28, 83]).

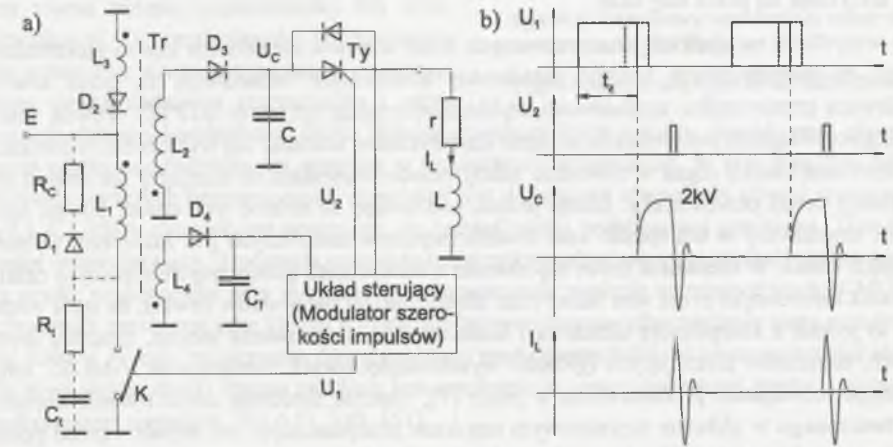
Skonstruowanie skutecznego nadajnika EMA działającego w oparciu o schemat z rys. 4.4 wymaga zatem rozwiązania dwóch podstawowych problemów: wyboru sposobu wytwarzania wysokiego napięcia oraz doboru właściwego elementu kluczującego o dużej szybkości przełączania, który jest zdolny wytrzymać napięcie o wartości wynoszącej kilka kilowoltów w stanie blokowania i przewodzić prąd o wartości wynoszącej co najmniej kilkadziesiąt amperów w stanie przewodzenia.

Najprostszą metodą wytworzenia wysokiego napięcia jest zastosowanie podwyższającego transformatora sieciowego z układem prostowniczym i filtrującym i takie też rozwiązanie przyjęte zostało przez autora na początkowym etapie jego badań [60]. Nadajnik zbudowany według takiej koncepcji charakteryzuje się jednak dużymi rozmiarami i ciężarem. Ponadto - i co ważniejsze - jeśli wymagana częstotliwość powtarzania impulsów nadawczych jest większa od częstotliwości sieci, to wysokonapięciowy kondensator zastosowany na wyjściu filtru musi mieć dużą pojemność, aby amplituda kolejnych impulsów nie ulegała zauważalnym wahaniom. Możliwość pracy z dużą częstotliwością powtarzania impulsów pogarszają się jeszcze bardziej, gdy w celu zmniejszenia wymiarów transformatora sieciowego zostanie zastosowany powielacz napięcia. Rozwiązanie z pracującym w sposób ciągły zasilaczem sieciowym stwarza jednocześnie stosunkowo duże zagrożenie dla operatora ze względu na stale występujące w układzie wysokie napięcie. Interesującą metodę wytworzenia wysokiego napięcia do pobudzenia cewki nadawczej przetwornika EMA przedstawiono w pracy [130]. W opisanym tam rozwiązaniu wykorzystano kilka kondensatorów, które podczas ładowania dołączone są równolegle do zasilacza sieciowego o napięciu wyjściowym wynoszącym kilkaset woltów. Podczas rozładowania przez cewkę nadawczą kondensatory te połączone są szeregowo poprzez odpowiedni zespół kluczy elektronicznych.

Całkowicie odmienną koncepcją wytworzenia wysokiego napięcia do zasilania nadajników EMA jest zastosowanie zasilaczy impulsowych, które pozwalają na znaczne zmniejszenie wymiarów i ciężaru nadajnika, a dzięki możliwości wykorzystania do ich zasilania dowolnego źródła napięcia stałego pozwalają na skonstruowanie nadajników w wersji przenośnej, która rozwiązuje problem realizacji badań w warunkach terenowych. W ramach kontynuacji prac nad nadajnikami, zapoczątkowanych w pracy doktorskiej autora [60], skonstruowany został nadajnik impulsów wykorzystujący do wytworzenia wysokiego napięcia klasyczną przetwornicę z impulsową stabilizacją napięcia [36, 145]. Podczas badania różnych przetworników EMA pobudzanych takim nadajnikiem okazało się jednak, że generowane przez przetwornicę impulsową zakłócenia elektromagnetyczne przenikają do części odbiorczej układu pomiarowego (cewka odbiorcza, wzmacniacz odbiorczy) i objawiają się na ekranie defektoskopu

(oscylloskopu) w postaci fałszywych ech, których amplituda jest porównywalna z amplitudą ech odbieranych z próbki.

W dalszych pracach konstrukcyjnych autora koncepcja zastosowania przetwornicy impulsowej została zmodyfikowana tak, aby przetwornica była włączana jedynie na krótki czas - potrzebny do wytworzenia wysokiego napięcia - tuż przed wyzwoleniem nadajnika. Po wygenerowaniu impulsu nadawczego przetwornica nie pracuje, w związku z czym nie są generowane przez nią żadne zakłócenia elektromagnetyczne, które mogłyby utrudnić przeprowadzenie badania ultradźwiękowego [68, 145]. Koncepcję tak zmodyfikowanego układu i przebiegi czasowe ilustrujące jej działanie przedstawia rys. 4.5, natomiast szczegółowy schemat elektryczny i wyniki badań podano w cytowanych wyżej pracach autora.



Rys. 4.5. Uproszczony schemat nadajnika z przetwornicą impulsową (a) i typowe przebiegi czasowe (b) ilustrujące jego działanie

Fig. 4.5. Simplified circuit diagram of a switch-mode driver (a) and typical waveforms (b)

Zasadniczą część tego układu stanowi przetwornica napięcia, której częstotliwość pracy jest równa częstotliwości wyzwalań nadajnika, tzn. wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset herców. Klucz  $K$  (wysokonapięciowy bipolarny tranzystor impulsowy mocy lub tranzystor V-MOS) jest załączany na czas  $t_z$  (od kilkudziesięciu do kilkuset mikrosekund, zależnie od wartości  $C$ ) potrzebny do zgromadzenia odpowiedniej energii w rdzeniu transformatora ferrytowego  $Tr$ . Czas  $t_z$  zależy od wartości szczytowej napięcia na uzwojeniu  $L_2$  w poprzednim cyklu, która to wartość jest mierzona za pośrednictwem uzwojenia  $L_4$ , np. w prostym detektorze szczytowym, a następnie porównywana z wartością zadaną. Napięcie wyjściowe z układu porównania steruje modulatorem szerokości impulsów. Gdy klucz  $K$  zostanie rozarty, energia zgromadzona w transformatorze zostanie przekazana do kondensatora  $C$ , który naładuje się do napięcia

$$U_{maks} = \frac{E}{\sqrt{L_1 C}} I_{t_z} \quad (4.1)$$

Po załączeniu klucza tyrystorowego  $Ty$  kondensator rozładowuje się przez cewkę nadawczą w postaci drgań gasnących i cykl pracy rozpoczyna się od nowa. Obwód  $D_1 R_C$  lub  $R_C C_1$

(alternatywnie) zabezpiecza klucz K przed przebicciem, które mogłoby nastąpić z chwilą otwarcia tego klucza w wyniku zgromadzenia energii w indukcyjności rozproszenia transformatora. Obwód  $D_2L_3$  stanowi zabezpieczenie przed nadmiernym wzrostem napięcia na uzwojeniu  $L_2$ , gdy na przykład przetwornik EMA zostanie odłączony przy działającej przetwornicy, w wyniku czego kondensator C nie będzie rozładowywany. Skonstruowany przez autora nadajnik pozwala wytworzyć impulsy napięcia o wartości szczytowej sięgającej 2 kV i był z powodzeniem używany z różnymi przetwornikami EMA na fale podłużne i poprzeczne w zakresie częstotliwości fali ultradźwiękowej od 1 do 6 MHz. Oprócz wspomnianych już zalet takiego układu nadajnika ze względów bezpieczeństwa istotne jest również to, że wysokie napięcie występuje w nim jedynie przez krótki czas przed pobudzeniem cewki nadawczej; inaczej zatem niż w układach nadajników omówionych wcześniej, w których wysokie napięcie utrzymuje się przez cały czas.

We wszystkich nadajnikach skonstruowanych przez autora w charakterze klucza elektronicznego, za pośrednictwem którego naładowany kondensator rozładowuje się przez cewkę nadawczą przetwornika, zastosowano szybkoprzełączające tyrystory BTP129. Pewną wadą takiego rozwiązania jest charakterystyczna dla tyrystorów trudność ich wyłączenia, w związku z czym czas zaniku drgań w obwodzie zależy przede wszystkim od tłumiącej ten obwód rezystancji cewki przetwornika. Biorąc jednak pod uwagę, że dobroć tych cewek jest na ogół mała, uzyskiwany w ten sposób czas trwania impulsów nadawczych jest zazwyczaj wystarczająco krótki. W literaturze mówi się również o nadajnikach generujących impulsy o czasie trwania narzuconym przez sam układ (tzn. niezależnie od parametrów cewki); na ogół wiąże się to jednak z komplikacją układową i koniecznością zastosowania innych, znacznie droższych, elementów kluczujących (głównie wysokonapięciowych tranzystorów V-MOS). Interesujące rozwiązanie przedstawiono w pracy [7]; znaczne skrócenie czasu trwania impulsu wytworzonego w układzie tyrystorowym uzyskano przepuszczając ten impuls - przed podaniem na cewkę przetwornika - przez kaskadę obwodów LC z nasycającymi się dławikami.

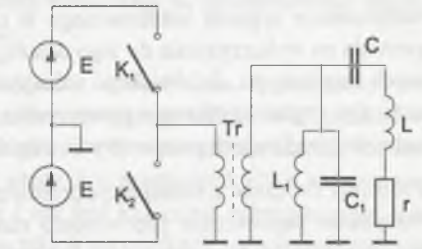
Tyrystory są często stosowanymi elementami kluczującymi w układach nadajników EMA zbudowanych według koncepcji z rys. 4.4 [76, 130, 209]. Dla wyższych napięć (4 - 5 kV) wykorzystywane są tyratrony [160] lub tetrody mocy [178], a w pracy [112] mówi się o zastosowaniu iskiernika. Autor tej ostatniej pracy podaje, że wykorzystywał do pobudzania przetworników EMA źródło napięcia o wartości 19 kV, która znacznie odbiega w górę od wartości typowo podawanych w literaturze, lecz nie wspomina o żadnych szczególnych środkach zapobiegających przebicciu elektrycznym - zwłaszcza pomiędzy cewką przetwornika i powierzchnią badanego metalu. Z doświadczeń autora tej monografii wynika, że przy zastosowaniu jako warstwy izolacyjnej ceratki elektrotechnicznej przebiccia takie mogą występować już przy napięciach rzędu 1,5 - 2 kV. Przy niższych napięciach (rzędu 1 kV) jako klucze elektroniczne stosowane są również tranzystory polowe V-MOS, które przede wszystkim jednak znajdują zastosowanie w nadajnikach wytwarzających impulsy w postaci bramkowanego przebiegu sinusoidalnego.

Jak już wspomniano wcześniej, nadajniki wytwarzające w cewce nadawczej przetwornika EMA impulsy w postaci trwającego kilka lub kilkanaście okresów przebiegu sinusoidalnego przeznaczone są przede wszystkim do pobudzania przetworników generujących fale ultradźwiękowe, które rozchodzą się skośnie do powierzchni badanego materiału. W charakterze takich nadajników można wykorzystać odpowiednio bramkowane, komercyjnie dostępne generatory mocy lub generatory połączone ze wzmacniaczami mocy wielkiej częstotliwości.

Konstrukcje takie cechują się jednak na ogół znacznymi gabarytami, małą sprawnością energetyczną i wysoką ceną. W stosunkowo prosty sposób żądany przebieg można wytworzyć w układzie, którego ideę przedstawia rys. 4.6 [149].

W układzie tym napięcia stałe o wartości wynoszącej kilkaset woltów łączy się na przemian przez klucze  $K_1$  i  $K_2$  na uzwojenie pierwotne impulsowego transformatora mocy Tr, dzięki czemu na uzwojeniu tym wytwarzany jest przebieg prostokątny o czasie trwania równym zadanej - i łatwo zmienianej - liczbie okresów. Częstotliwość przełączania kluczy jest równa żądanej częstotliwości fali ultradźwiękowej. Do częstotliwości tej dostrojony jest szeregowy obwód rezonansowy utworzony przez cewkę nadawczą przetwornika i odpowiednio dobrany kondensator; dzięki filtrującym własnościom takiego obwodu prąd płynący przez cewkę przetwornika ma przebieg w przybliżeniu sinusoidalny. W celu lepszego odfiltrowania wyższych harmonicznych stosowany jest dodatkowo równoległy obwód rezonansowy  $L_1C_1$ , który również jest dostrojony do częstotliwości podstawowej przebiegu. Transformator podwyższający Tr pozwala na zwiększenie maksymalnej wartości napięcia podawanego na cewkę przetwornika przy jednoczesnym ograniczeniu napięcia na tranzystorach V-MOS - używanych zazwyczaj jako klucze  $K_1$  i  $K_2$ , dla których dopuszczalne napięcie sięga co najwyżej 1000 V. W celu zwiększenia dopuszczalnego prądu często kilka takich tranzystorów łączy się równoległe, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie w cewce nadawczej prądu o wartości maksymalnej sięgającej 100 A [1, 149, 151].

Nadajniki EMA działające według opisanej wyżej zasady cechują się stosunkowo prostą konstrukcją i dużą sprawnością energetyczną. W odróżnieniu od nadajników działających w oparciu o rozładowanie kondensatora przez cewkę nadawczą, częstotliwość drgań elektrycznych w cewce jest narzucana przez częstotliwość przełączania kluczy i nie zależy od indukcyjności cewki nadawczej, czyli nie ulega zmianom przy zmianach odległości przetwornika od powierzchni metalu. Przy zmianach tej odległości będzie jednak następować wywołane zmianą indukcyjności cewki przetwornika odstrojenie obwodu rezonansowego, w skład którego wchodzi ta cewka, od częstotliwości generowanego przebiegu, w rezultacie czego zmniejszy się wartość maksymalna prądu płynącego przez tę cewkę. Zjawisko to jest zasadniczo niepożądane, gdyż zmniejsza czułość badania metodą EMA; może ono jednak być wykorzystane do częściowej kompensacji zjawiska unoszenia, której poświęcony jest punkt 4.5. Nadajnik tego typu został również wykonany w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej [206], aby przy jego użyciu zweryfikować koncepcje autora dotyczące kompensacji zjawiska unoszenia.



Rys. 4.6. Impulsowy wzmacniacz mocy jako nadajnik EMA

Fig. 4.6. Pulse amplifier as an EMA driver

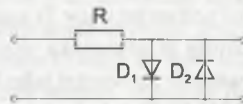
### 4.4. Wzmacniacze odbiorcze

Zadaniem dodatkowych wzmacniaczy odbiorczych stosowanych z przetwornikami EMA jest wzmocnienie sygnału indukowanego w cewce odbiorczej przetwornika do poziomu, który pozwala na wykorzystanie do jego dalszego wzmocnienia lub obróbki wzmacniaczy wejściowych oscyloskopu, defektoskopu ultradźwiękowego lub innej aparatury pomiarowej. Zazwyczaj, aby sygnał uzyskany z przetwornika EMA mógł być dalej przetwarzany w konwencjonalnych urządzeniach pomiarowych, konieczne jest jego wstępne wzmocnienie o 40 - 60 dB.

Problemy związane z konstrukcją przedwzmacniaczy do przetworników EMA dotyczą przede wszystkim zapewnienia odpowiednio niskiego poziomu szumów oraz szybkiego powrotu wzmacniacza do stanu ustalonego (odzyskania własności wzmacniających) po przesterowaniu wynikłym z podania na jego wejście impulsu nadawczego, zwłaszcza gdy przetwornik pracuje w oparciu o impulsową metodę echa. Skrajne wymagania stawiane obwodowi wejściowemu wzmacniacza, tj. odporność na impulsy nadawcze o sięgającej kilowoltów amplitudzie, czas powrotu do stanu ustalonego po przesterowaniu nie przekraczający kilku mikrosekund oraz czułość na poziomie kilku lub najwyżej kilkunastu mikrowoltów, powodują, że praktycznie jedynym obwodem wejściowym, który umożliwi spełnienie tych wymagań, jest prosty diodowy ogranicznik równoległy pokazany na rys. 4.7.

Typowa wartość rezystancji  $R$  wynosi kilkaset omów. Stosowanie wyższych wartości rezystancji pociąga za sobą wzrost szumów cieplnych występujących na wejściu wzmacniacza oraz utrudnia utrzymanie odpowiednio szerokiego pasma przenoszenia wzmacniacza, gdyż rezystor  $R$  tworzy w połączeniu z pojemnościami diod i pojemnością wejściową wzmacniacza filtr dolnoprzepustowy. Z kolei nadmierne obniżenie tej rezystancji powoduje konieczność zastosowania diod impulsowych o dużym dopuszczalnym prądzie szczytowym i - co ważniejsze - wskutek bocznikującego działania tego obwodu w stosunku do nadajnika powoduje zmniejszenie amplitudy prądu doprowadzanego do cewki nadawczej. W pracy autora [145] rozważano wprawdzie zastosowanie w obwodzie wejściowym wzmacniacza bardziej rozbudowanych układów kluczujących, jednak ze względu na znacznie zwiększoną komplikację układową, zwiększony poziom szumów oraz konieczność użycia kluczujących elementów elektronicznych o dużej szybkości przełączania i napięciu dopuszczalnym sięgającym kilowoltów praktyczne wykorzystanie tych układów nie przynosi istotnych korzyści w porównaniu z ogranicznikiem z rys. 4.7. Innym prostym rozwiązaniem problemu zapewnienia odporności wzmacniacza na impulsy nadawcze jest zastosowanie w obwodzie wejściowym wzmacniacza lampy elektronowej [160].

Jednym z podstawowych sposobów zmniejszenia poziomu szumów wzmacniacza odbiorczego jest ograniczenie jego pasma przenoszenia. Z doświadczeń autora [145] oraz analizy widma impulsów stosowanych do pobudzania przetworników EMA wynika jednak, że w przypadku przetworników EMA zasilanych impulsami o krótkim czasie trwania nie jest celowe zawężanie tego pasma poniżej przedziału 0,5 - 1 MHz. Przy szerokim widmie częstotliwości takich impulsów nadmierne zawężenie pasma przenoszenia wzmacniacza powoduje spadek



Rys. 4.7. Ogranicznik diodowy jako obwód wejściowy wzmacniacza

Fig. 4.7. Diode limiter as an input circuit of the amplifier

amplitudy impulsów oraz wydłużenie czasu ich trwania, co wpływa niekorzystnie na rozdzielczość przetwornika. Typowa wartość międzyszczytowa szumów sprowadzonych do wejścia wzmacniacza szerokopasmowego do przetworników EMA rzadko jest zatem niższa niż 3 - 5  $\mu$ V [151], a czas powrotu wzmacniacza do stanu równowagi po przesterowaniu impulsem nadawczym wynosi nie mniej niż 2 - 3  $\mu$ s [149].

Lepsze wartości czułości można uzyskać w przypadku zastosowania wąskopasmowych przetworników EMA (pobudzanych impulsem w postaci trwającego kilka lub kilkanaście okresów przebiegu sinusoidalnego), przeznaczonych głównie do wytwarzania skośnie rozchodzących się fal ultradźwiękowych; szczególnie zaś wtedy, gdy przetwornik EMA jest przeznaczony wyłącznie do odbioru fali ultradźwiękowej i nie jest konieczne zabezpieczenie jego wejścia przed impulsem nadawczym. Stosowane w takich przypadkach rozwiązania opierają się całkowicie na klasycznych układach do wzmacniania małych sygnałów wielkiej częstotliwości (np. [6]) i dalsze ich omawianie w tej pracy nie jest celowe. Warto jednak jeszcze zauważyć, że prostym i nie wnoszącym dodatkowych źródeł szumu sposobem zwiększenia amplitudy sygnału uzyskiwanego z przetwornika EMA jest włączenie transformatora podwyższającego pomiędzy przetwornik i wejście wzmacniacza. Maksymalna przekładnia takiego transformatora uwarunkowana jest przede wszystkim pojemnością kabla łączącego transformator ze wzmacniaczem i między innymi dlatego w praktycznych rozwiązaniach przetworników EMA wzmacniacz odbiorczy umieszczany jest często bezpośrednio przy cewce odbiorczej, co w dobie znacznej miniaturyzacji układów elektronicznych nie przedstawia żadnych trudności.

Na zakończenie rozważań tego punktu warto jeszcze wspomnieć o możliwości wykorzystania cyfrowych metod przetwarzania sygnału do dalszej poprawy własności układów odbiorczych współpracujących z przetwornikami EMA. W najprostszej postaci może to być cyfrowe uśrednianie przebiegów, powszechnie wykorzystywane w technice pomiarowej do zwiększania odstepu napięciowego sygnału od szumu dla powtarzalnych sygnałów. W takim przypadku należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że w procesie uśredniania uwypuklone zostaną nie tylko impulsy odebrane z badanej próbki, lecz również wszelkie inne impulsy skorelowane z impulsami nadawczymi, do których w szczególności należą impulsy ultradźwiękowe generowane przez cewkę nadawczą w korpusie przetwornika [151]. Projektowanie przetwornika EMA pod kątem minimalizacji takich niepożądanych impulsów nabiera zatem w tych warunkach szczególnego znaczenia. Zagadnieniami cyfrowego przetwarzania sygnałów odbieranych przez przetworniki EMA nie będziemy jednak dalej się zajmować w tym miejscu, gdyż nie jest to problematyka specyficzna wyłącznie dla metody elektromagnetyczno-akustycznej.

### 4.5. Kompensacja zjawiska unoszenia

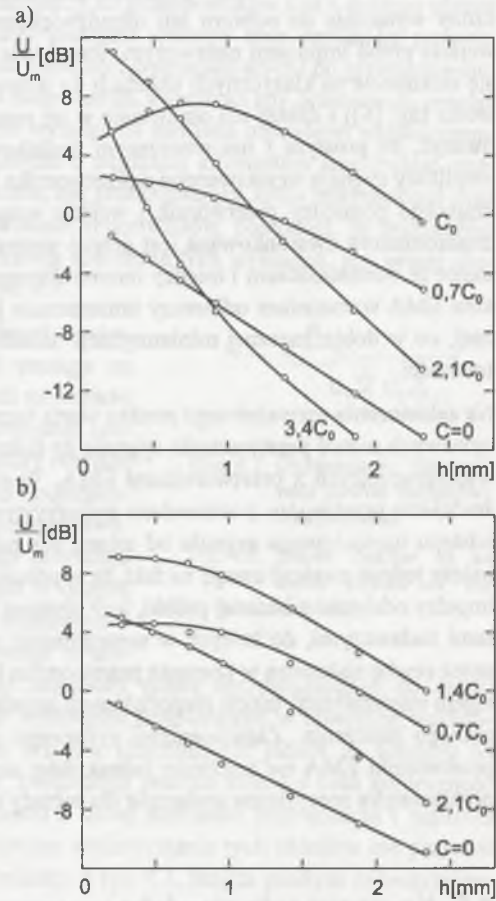
Zjawisko unoszenia (ang. lift-off), tzn. zależność amplitudy odbieranego przez przetwornik EMA sygnału od odległości przetwornika od powierzchni badanego metalu, jest jedną z głównych wad tego rodzaju przetworników ultradźwiękowych. Stwarza ono problemy zwłaszcza wtedy, gdy o własnościach badanego obiektu wnioskuje się na podstawie amplitudy odbieranych impulsów, np. podczas oceny wielkości wykrywanych wad. Z tego powodu odległość pomiędzy przetwornikiem EMA i powierzchnią obiektu jest najczęściej stabilizo-

wana w sposób mechaniczny przy użyciu rolek, płytek ślizgowych, przewodnic itp. Mimo to odległość ta może ulegać pewnym wahaniom podczas ruchu przetwornika wzdłuż powierzchni badanego obiektu, np. wskutek nierówności tej powierzchni. Z tego powodu warto przeprowadzić ocenę możliwości kompensacji zjawiska unoszenia w sposób elektroniczny, zwłaszcza że problematyka ta jak dotychczas znajduje niewielkie odzwierciedlenie w literaturze dotyczącej przetworników EMA.

Jeszcze w pracy doktorskiej autora tej monografii [60] zauważono, że przynajmniej częściową kompensację zjawiska unoszenia można w prosty sposób uzyskać dla przetworników odbiorczych EMA na fale podłużne, dobierając w odpowiedni sposób pojemność kondensatora dołączonego do cewki przetwornika. Wyniki dalszych prac nad kompensacją zjawiska unoszenia przedstawiono w pracy [67], a próbę zastosowania podobnej metody kompensacji w przetworniku nadawczym podjęto w pracy [206].

Na rys. 4.8 pokazano przedstawione we wspomnianych wyżej pracach [60, 67] zależności amplitudy sygnału odbieranego metodą przepuszczania przez przetwornik odbiorczy EMA na fale podłużne od odległości tego przetwornika od powierzchni aluminiowej lub stalowej próbki. Zależności te uzyskano dla różnych wartości pojemności kondensatora dołączonego do cewki odbiorczej przetwornika, przy czym  $C_0$  oznacza pojemność kondensatora, która zapewnia dostrojenie cewki odbiorczej przetwornika do częstotliwości odbieranej fali ultradźwiękowej, gdy cewka ta jest znacznie oddalona od wszelkich metalowych przedmiotów.

Z przedstawionych wykresów wynika, że dzięki dołączeniu do cewki przetwornika odbiorczego EMA kondensatora o odpowiedniej pojemności w łatwy sposób można zmniejszyć spadek sygnału wynikający ze zjawiska unoszenia, a dla pewnych wartości tej pojemności odbierany sygnał może nawet wzrastać podczas

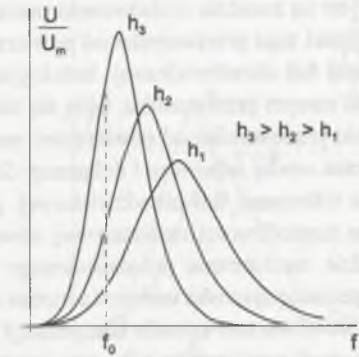


Rys. 4.8. Zależność względnej amplitudy odbieranego sygnału od odległości przetwornika od powierzchni aluminiowej (a) i stalowej (b) próbki dla różnych pojemności kondensatora dołączonego do cewki

Fig. 4.8. Relationship between the relative signal strength and transducer-to-sample separation for an aluminium (a) and a steel (b) sample for various tuning capacitors

oddalania przetwornika od powierzchni próbki. Efekty te wynikają ze zmian charakterystyki rezonansowej obwodu, utworzonego przez cewkę odbiorczą i dołączony do niej kondensator, zachodzących podczas zbliżania lub oddalania przetwornika od powierzchni badanego metalu.

Zmiany kształtu tych charakterystyk zilustrowano na rys. 4.9. Gdy przetwornik jest oddalany od powierzchni metalu, to indukcyjność jego cewki rośnie, czyli częstotliwość rezonansowa obwodu maleje. Jednocześnie wskutek zmniejszającej się rezystancji strat cewki rośnie jej dobroć i maksimum krzywej rezonansowej podnosi się. Uzyskiwany w ten sposób wzrost amplitudy sygnału indukowanego w cewce odbiorczej może zatem kompensować zmniejszanie się tej amplitudy wynikające ze słabnącego ze wzrostem odległości sprzężenia elektromagnetycznego cewki z badanym metalem oraz z malejącej indukcji stałego pola magnetycznego na powierzchni metalu. Zjawisko to w największym stopniu widoczne jest dla przetwornika odbierającego fale podłużne z metalu nieferromagnetycznego o dużej konduktywności (rys. 4.8a), gdyż w takim przypadku - jak stwierdzono w punkcie 4.1 - zmiany indukcyjności cewki wskutek zmian odległości przetwornika od powierzchni metalu są stosunkowo duże, a tłumienie cewki przez metal jest stosunkowo małe. Podczas badania metalu ferromagnetycznego indukcyjność i rezystancja cewki zmieniają się w mniejszych granicach, rozpatrywana krzywa rezonansowa zmienia się w węższym zakresie i wpływ pojemności kondensatora dostrajającego na zależności amplitudy odbieranego sygnału od odległości przetwornika od powierzchni metalu jest mniejszy (rys. 4.8b).



Rys. 4.9. Charakterystyki obwodu rezonansowego utworzonego przez cewkę odbiorczą i dołączony kondensator dla różnych odległości  $h$  przetwornika od powierzchni metalu

Fig. 4.9. Characteristics of the resonant circuit made of the receiving coil and the tuning capacitor for various transducer-to-metal surface separations  $h$

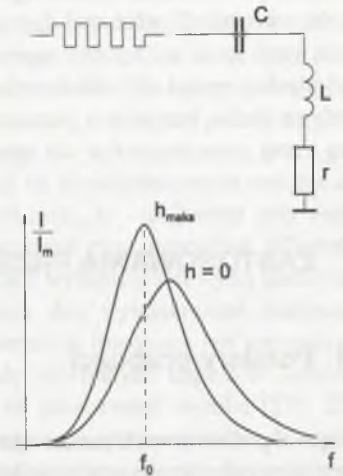
Podobne badania przeprowadzono również dla przetwornika odbiorczego EMA na fale poprzeczne, odbierającego fale ultradźwiękowe ze stalowej próbki [67]. W tym przypadku stwierdzono jednak, że pojemność dołączonego do cewki odbiorczej kondensatora nie wpływa w istotnym stopniu na nachylenie zależności amplitudy odbieranego sygnału od odległości przetwornika od powierzchni metalu, czyli kompensacja zjawiska unoszenia praktycznie nie zachodzi, lecz w przypadku odpowiedniego doboru tej pojemności powoduje ona jedynie wzrost amplitudy odbieranego sygnału o kilka decybeli. Wynika to z faktu, że w przetworniku na fale poprzeczne cewka przylega całą powierzchnią do nabiegownika, który wpływa na indukcyjność i rezystancję cewki w tak dużym stopniu, że zbliżenie do tej cewki badanego metalu ferromagnetycznego nie powoduje już znaczących zmian jej parametrów. Tak więc prosta kompensacja zjawiska unoszenia poprzez dołączenie do cewki przetwornika kondensatora o odpowiednio dobranej pojemności możliwa jest przede wszystkim w odniesieniu do przetworników odbiorczych na fale podłużne.

Omówione wyżej badania prowadzone były dla odbiorczych przetworników EMA metodą przepuszczania przy stałej częstotliwości fali ultradźwiękowej. Jeżeli badania będziemy prowadzić mającą podstawowe znaczenie w badaniach nieniszczących metodą echa i wykorzystamy do tego celu przetwornik nadawczo-odbiorczy EMA, w którym cewka nadawcza zasilana jest na zasadzie rozładowania przez nią odpowiedniego kondensatora, to przy zmianach odległości tego przetwornika od powierzchni metalu zmieniać się będzie częstotliwość generowanej fali ultradźwiękowej. Indukcyjności cewek nadawczej i odbiorczej, zamontowanych w tym samym przetworniku, będą się zmieniać w taki sam sposób, w wyniku czego przy oddalaniu przetwornika od powierzchni metalu częstotliwość rezonansowa obwodu utworzonego przez cewkę odbiorczą i dołączony do niej kondensator nie będzie zbliżać się do częstotliwości odbieranej fali ultradźwiękowej, gdyż ta ostatnia będzie się zmniejszać stosownie do zmian częstotliwości rezonansowej obwodu nadajnika i kompensacja zjawiska unoszenia na zasadzie mechanizmu przedstawionego na rys. 4.9 nie nastąpi. W takim przypadku prostą kompensację zjawiska unoszenia można uzyskać w sposób zaproponowany np. w pracy [211]. Przedstawiona tam metoda kompensacji polega na wykorzystaniu do wzmacniania sygnałów odebranych przez cewkę odbiorczą przetwornika wzmacniacza rezonansowego. Częstotliwość środkowa pasma przenoszenia tego wzmacniacza dobierana jest w taki sposób, aby była ona niższa od częstotliwości fali ultradźwiękowej wytwarzanej przez przetwornik w całym zakresie przewidywanych odległości tego przetwornika od powierzchni badanego metalu. Jeżeli przetwornik będzie oddalał się od próbki, to wskutek zmniejszania się częstotliwości generowanej przez niego fali ultradźwiękowej nastąpi przesuwanie się punktu pracy na charakterystyce amplitudowej wzmacniacza rezonansowego w kierunku jej wierzchołka, w wyniku czego sygnał będzie silniej wzmacniany. Skuteczność kompensacji zjawiska unoszenia w takim rozwiązaniu można zmieniać w pewnych granicach dobierając odpowiedni odcinek pracy na zboczach charakterystyki amplitudowej wzmacniacza.

Jeszcze inna metoda kompensacji została zaproponowana przez autora i zweryfikowana praktycznie w ramach pracy [206]. Metoda ta również opiera się na wykorzystaniu własności obwodu rezonansowego, lecz kompensacja zjawiska unoszenia realizowana jest w części nadawczej przetwornika, która pobudzana jest przebiegiem obejmującym kilka okresów fali prostokątnej, wytwarzanym w nadajniku zrealizowanym według schematu z rys. 4.6. Cewka nadawcza dołączona jest do wyjścia nadajnika poprzez kondensator (rys. 4.10), którego pojemność jest dobierana tak, aby częstotliwość szeregowego obwodu rezonansowego utworzonego przez ten kondensator i cewkę nadawczą była dla założonej maksymalnej odległości przetwornika od powierzchni metalu równa częstotliwości przebiegu pobudzającego. W takiej sytuacji, gdy przetwornik spoczywa na powierzchni metalu, rozpatrywany szeregowy obwód rezonansowy jest maksymalnie odstrojony od rezonansu i amplituda prądu w cewce osiąga minimalną wartość. W miarę oddalania przetwornika od powierzchni metalu indukcyjność cewki rośnie i następuje dostrajanie się rozpatrywanego obwodu do częstotliwości przebiegu pobudzającego, dzięki czemu amplituda prądu w cewce rośnie, kompensując przynajmniej częściowo spadek skuteczności przetwornika wynikający z jego oddalenia od próbki. Dzięki stałej w tej metodzie - niezależnej od odległości przetwornika od powierzchni metalu - częstotliwości wytwarzanej w badanym ośrodku fali ultradźwiękowej możliwe jest w tym przypadku również wprowadzenie kompensacji w części odbiorczej przetwornika.

Opisane wyżej metody kompensacji zjawiska unoszenia bazują na wykorzystaniu własności obwodów rezonansowych, a ich realizacja praktyczna jest bardzo prosta, gdyż polega na odpowiednim dobraniu pojemności kondensatora dołączonego do cewki przetwornika. Jednocześnie jednak własności obwodów rezonansowych są przyczyną pewnych wad takich sposobów kompensacji. Przede wszystkim przemieszczanie się punktu pracy na krzywych rezonansowych przy zmianach odległości przetwornika od powierzchni metalu może powodować zmiany w szerokich granicach relacji fazowych pomiędzy przebiegiem elektrycznym w cewce nadawczej lub odbiorczej i falą ultradźwiękową w ośrodku, co w pewnych pomiarach może być niedopuszczalne. Po drugie, poprzez zastosowanie obwodów rezonansowych powoduje się zawężenie pasma przenoszonych częstotliwości, co wpływa niekorzystnie na rozdzielczość przetwornika. Poza tym metody te nadają się przede wszystkim do zastosowania w przetwornikach na fale podłużne przeznaczonych do badania metali nieferromagnetycznych o dużej konduktywności, gdyż w takim przypadku parametry cewki nadawczej lub odbiorczej w największym stopniu uzależnione są od ich odległości od powierzchni metalu, a na wykorzystaniu zmian parametrów tych cewek opiera się istota kompensacji.

Bardziej ogólna metoda kompensacji zjawiska unoszenia, która pozbawiona jest powyższych wad i nadaje się do zastosowania we wszystkich przetwornikach EMA, opiera się na automatycznej regulacji wzmocnienia wzmacniacza odbiorczego. W takim przypadku wzmocnienie wzmacniacza, który może być wzmacniaczem szerokopasmowym (co jest istotne ze względu na rozdzielczość przetwornika), regulowane jest sygnałem, który jednoznacznie uzależniony jest od odległości przetwornika od powierzchni metalu. Prosty sposób uzyskania takiego sygnału sterującego może być na przykład pomiar amplitudy prądu w cewce nadawczej przetwornika, realizowany za pomocą rezystora o małej rezystancji i detektora szczytowego włączonych szeregowo pomiędzy nadajnik i cewkę nadawczą [211]. Indywidualny pomiar zależności amplitudy sygnału odbieranego przez konkretny przetwornik od jego odległości od powierzchni badanego metalu pozwala na wyznaczenie wymaganej funkcji regulacji wzmocnienia i skuteczną kompensację zjawiska unoszenia; od strony układów elektronicznych zadanie to nie przedstawia większych problemów.



Rys. 4.10. Zasada kompensacji zjawiska unoszenia w przetwornikach nadawczych  
 Fig. 4.10. Principle of lift-off compensation in EMA transmitters



## 5. ZASTOSOWANIA PRZETWORNIKÓW EMA

### 5.1. Pomiary grubości

Jednym z podstawowych zastosowań przetworników EMA, w których mogą one być konkurencyjne w stosunku do przetworników piezoelektrycznych, jest bezstykowy pomiar grubości wyrobów metalowych. Mała skuteczność przetworników EMA nie stwarza w tym zastosowaniu istotnych problemów, gdyż już wynoszący np. tylko 6 dB odstęp napięciowy sygnału od szumu wystarcza często na przeprowadzenie pomiaru.

Pomiar grubości z wykorzystaniem przetworników EMA realizowany jest najczęściej impulsową metodą echa w sposób podobny jak przy użyciu klasycznych grubościomierzy ultradźwiękowych z głowicami piezoelektrycznymi [41, 56, 156, 161], tzn. poprzez pomiar czasu, po którym wygenerowany impuls fali ultradźwiękowej powraca do powierzchni, przez którą został wprowadzony, po co najmniej dwukrotnym przejściu przez badany ośrodek po odbiciu od jego przeciwległych (równoległych) powierzchni.

Najistotniejszym ograniczeniem przetworników EMA w takim zastosowaniu jest ich stosunkowo duża strefa martwa, zwłaszcza że nie jest możliwe opóźnienie chwili wejścia fali ultradźwiękowej do badanego ośrodka, jak to jest powszechnie praktykowane w grubościomierzach współpracujących z przetwornikami piezoelektrycznymi, które to przetworniki są najczęściej umieszczane na odpowiednich nasadkach opóźniających. Znaczne przesterowanie wzmacniacza odbiorczego impulsem nadawczym powoduje, że do chwili powrotu tego wzmacniacza do stanu ustalonego nie jest możliwy odbiór echa. W wyniku tego zjawiska minimalna grubość mierzona przez grubościomierze EMA pracujące w oparciu o impulsową metodę echa wynosi zazwyczaj nie mniej niż 3 - 7 mm [32, 76, 114, 200, 207, 208, 210]. Wyjątek stanowi pod tym względem praca [136], według której minimalna grubość mierzona przez prezentowany w niej grubościomierz wynosi 0,7 mm; brak jakichkolwiek szczegółów konstrukcyjnych przetwornika i współpracujących z nim układów elektronicznych w cytowanej pracy nie pozwala jednak na przeprowadzenie porównań z innymi znanymi konstrukcjami. Maksymalna mierzona grubość uwarunkowana jest przede wszystkim dysponowanym odstępem napięciowym sygnału od szumu i sięga w większości znanych konstrukcji 100 - 200 mm, czyli wartości na ogół wystarczających w praktyce.

Typowa dokładność pomiaru grubości przy użyciu przetworników EMA wynosi 1 - 2% lub 0,05 - 0,1 mm. Niekorzystny wpływ na dokładność pomiaru mają charakterystyczne dla przetworników EMA znaczne zmiany amplitudy odbieranego sygnału przy zmianach odległości przetwornika od powierzchni badanego wyrobu (zjawisko unoszenia). Przy stałym po-

ziomie dyskryminacji na wyjściu wzmacniacza odbiorczego zmiany amplitudy odbieranych impulsów powodują błąd określenia chwili pojawienia się tych impulsów. Dodatkowo należy pamiętać o tym, że oprócz fali ultradźwiękowej określonego rodzaju, na którą dany przetwornik został zaprojektowany, często generowana jest jednocześnie fala innego rodzaju (np. fala podłużna generowana przez przetwornik na fale poprzeczne), o mniejszej jednak amplitudzie niż fala podstawowa. Fale ultradźwiękowe typu innego niż wykorzystywany przez grubościomierz mogą także powstawać wskutek transformacji fal ultradźwiękowych podczas ich odbicia. Jeżeli poziom dyskryminacji impulsów jest zbyt niski, to - zwłaszcza przy dużej amplitudzie odbieranych sygnałów, co ma miejsce na przykład przy niewielkiej odległości przetwornika od powierzchni próbki - impulsy zakłócające o wymienionym wyżej pochodzeniu mogą spowodować błędne wskazania grubościomierza. Aby wyeliminować możliwość wystąpienia takich błędów, w torze odbiorczym grubościomierza stosowana jest automatyczna regulacja wzmocnienia, zapewniająca stałą amplitudę odbieranych impulsów (również zakłócających) przy zmianach odległości przetwornika od powierzchni wyrobu [175, 207, 208], lub też poziom dyskryminacji jest ustawiany automatycznie - proporcjonalnie do amplitudy odbieranych impulsów [32, 114]. Oprócz tego dopuszczalne zmiany odległości przetwornika od wyrobu ograniczane są zazwyczaj do zakresu 0,5 - 1 mm.

Niezależnie od rodzaju metalu (ferromagnetyczny, nieferromagnetyczny), z którego wykonany jest badany wyrób, do pomiaru grubości metodą EMA zasadniczo wykorzystuje się przetworniki na fale poprzeczne. Zastosowanie tego rodzaju fal umożliwia uzyskanie mniejszej strefy martwej niż przy użyciu przetworników na fale podłużne. Wyjątek stanowi pomiar grubości gorących wyrobów stalowych w temperaturze zbliżonej do temperatury punktu Curie (gdy wykorzystuje się - omówione w punkcie 2.2.2 - znaczne zwiększenie amplitudy generowanych metodą EMA fal podłużnych) i wyższej [207, 208].

Impulsy prądu wytwarzane w cewce nadawczej mają zazwyczaj postać szybko zanikających drgań gasnących (w skrajnych przypadkach jest to pół okresu przebiegu sinusoidalnego), a częstotliwość podstawowa ich widma nie przekracza na ogół 2 - 3 MHz [114, 200, 207, 208, 209], czyli jest niższa od częstotliwości pracy głowic z przetwornikami piezoelektrycznymi stosowanych w konwencjonalnych grubościomierzach. Wynika to w dużej mierze z trudności zastosowania odpowiednich elementów kluczujących, które charakteryzując się napięciem dopuszczalnym sięgającym 1 - 2 kV i prądem dopuszczalnym wynoszącym kilkadziesiąt amperów, powinny zapewniać czasy przełączania na poziomie dziesiątek nanosekund.

Jednym z głównych problemów związanych z konstrukcją grubościomierzy EMA jest wytworzenie na powierzchni badanego wyrobu silnego stałego pola magnetycznego o indukcji wynoszącej co najmniej kilka dziesiątych tesli. W grubościomierzach przewidzianych do zamontowania na stałe na linii technologicznej w zakładach metalurgicznych zazwyczaj stosuje się do tego celu elektromagnesy. Znaczne rozmiary całej konstrukcji oraz duży pobór mocy (np. 500 W [19, 114]) nie powodują w takich zastosowaniach istotnych ograniczeń. Zmniejszenie mocy pobieranej przez elektromagnes możliwe jest dzięki impulsowemu podmagnesowaniu powierzchni badanego obiektu, np. w grubościomierzu przedstawionym w pracy [32] elektromagnes załączany jest na czas równy 1 ms, który wystarcza na przeprowadzenie pomiaru, przy czym nadajnik przetwornika EMA jest wyzwany w chwili, gdy prąd w uzwojeniu elektromagnesu osiąga maksymalną wartość. Radykalne zmniejszenie wymiarów grubościomierzy EMA i pobieranej przez nie mocy osiągnięte jest przez zastosowanie magnesów zawierających domieszki pierwiastków ziem rzadkich [76, 136, 175, 200, 209, 210]. Użycie magnesów

trwałych stwarza jednak problemy związane z gromadzeniem się na powierzchni czołowej przetwornika zanieczyszczeń o własnościach magnetycznych (opiłków, produktów korozji itp.). Ich usuwanie możliwe jest dzięki zastosowaniu, na przykład, wykonanych z gumy wymiennych nasadek ochronnych na głowice pomiarowe [200], o czym wspomniano już w podrozdziale 4.2.

Spośród opublikowanych na świecie opisów grubościomierzy EMA duża ich część dotyczy grubościomierzy przeznaczonych do pomiaru grubości ścianek rur. Liczba dostępnych publikacji na ten temat (np. [1, 86, 175, 200, 207, 208]) świadczy o tym, że jest to jedno z najważniejszych zastosowań przetworników EMA; dowodzi tego również podjęcie przez niemiecką firmę Nukem produkcji grubościomierzy EMA do pomiaru grubości ścianek rur już na początku lat osiemdziesiątych [54].

W Holandii skonstruowano grubościomierz w postaci samojezdnego zespołu (tzw. PIG, z ang. Pipe Inspection Gauge), który poruszając się we wnętrzu podwodnych rur ma poprzez pomiar grubości ich ścianek określać stopień występującej na powierzchni zewnętrznej korozji [200]. Badania przeprowadzone na instalacji doświadczalnej wykazały zdolność pomiaru grubości ścianek rur w zakresie 7 - 40 mm oraz wykrywania wżerów o średnicy 10 mm i głębokości 2,5 mm. Brak jest jednak jakichkolwiek informacji o zastosowaniu tego przyrządu do badania konkretnych instalacji podwodnych. Podobne zastosowanie przetworników EMA do oceny korozji zakopanych rurociągów wspomniane jest w pracy [1].

W Krajowym Centrum Badań Nieniszczących (National NDT Centre) w Harwell w Wielkiej Brytanii skonstruowano przenośny grubościomierz do oceny stopnia korozji rur kotłowych w elektrowniach [175]. Rury te pokryte są produktami korozji w postaci magnetytu o silnych własnościach magnetostrykcyjnych. W warunkach laboratoryjnych stwierdzono, że jeśli skorodowana warstwa silnie przylega do rury, to nawet przy grubości tej warstwy sięgającej 5 mm możliwe jest wytworzenie w nieskorodowanej części ścianki rury drgań ultradźwiękowych o amplitudzie wystarczającej do przeprowadzenia pomiaru grubości. Przyrząd ten nie wszedł jednak do produkcji seryjnej; badania prowadzone w warunkach przemysłowych wykazały, że wskutek silnych zmian własności skorodowanej warstwy wzdłuż długości badanych rur amplituda sygnału odbieranego przez przetwornik EMA podczas jego przemieszczania często ulegała zmianom nawet o kilkadziesiąt decybeli, wskutek czego dochodziło do błędnych wskazań grubości.

Możliwość wykorzystania przetworników EMA do wzbudzania i odbioru fal ultradźwiękowych przez warstwę rdzy wykorzystano również w przyrządzie do oceny stopnia korozji innych konstrukcji stalowych, głównie elementów mostów, który opisano w pracy [113].

Interesujące rozwiązanie grubościomierza do pomiaru grubości ścianek gorących (700 - 900°C) rur w jednym z japońskich zakładów metalurgicznych przedstawiono w pracach [207, 208]. W celu jednoczesnego badania profilu grubości w kilku przekrojach, wzdłuż obwodu badanej rury umieszczonych jest symetrycznie sześć cewek nadawczo-odbiorczych, które znajdują się pomiędzy nabiegunkami przetwornika, co zapewnia generację i odbiór fal podłużnych. Chłodzenie wodą wnętrza przetwornika umożliwia jego ciągłą pracę. Urządzenie wyposażone jest dodatkowo w układ pomiaru temperatury ścianki rury, który pozwala na przeprowadzenie korekcji wyników, związanej z omówioną dalej (podrozdział 5.2) zależnością prędkości fal ultradźwiękowych od temperatury materiału. Grubościomierz ten zapewnia pomiar grubości stalowych rur w zakresie 3 - 25 mm z dokładnością  $\pm 0,1$  mm.

Podobne urządzenie, o zakresie pomiarowym 9 - 60 mm i przeznaczone do badania rur o temperaturze 800 - 1200°C, testowano w warunkach eksploatacyjnych w zakładzie produkującym rury w Czelabińsku (ZSRR) [86]. Przetwornik wyposażony jest w układ pomiaru temperatury powierzchni wyrobu i urządzenie, które natryskuje tę powierzchnię rozpyloną wodą, aby obniżyć temperaturę do temperatury punktu Curie, w której następuje silna generacja fal podłużnych.

Wykorzystanie przetworników EMA do pomiaru grubości stalowych ścianek zbiorników do cynkowania przedstawiono w pracy [44]. W zbiorniku takim znajduje się roztopiony cynk o temperaturze 450° - 460°C, w którym zanurzany jest element przeznaczony do cynkowania. Reakcja zachodząca pomiędzy stalą i cynkiem powoduje stałe zmniejszanie się grubości ścianek zbiornika i gdy grubość ta spadnie do 40% wartości początkowej (wynoszącej 50 mm), to zbiornik nie może być dalej w bezpieczny sposób użytkowany. Pomiar grubości ścianek metodą klasyczną, tj. przy użyciu konwencjonalnych grubościomierzy ultradźwiękowych, realizowany jest od wewnątrz i jest bardzo pracochłonny i kosztowny, gdyż wymaga usunięcia cynku ze zbiornika (około 100 ton) i oczyszczenia ścianek z nagromadzonej warstwy stopu, a po przeprowadzeniu badania i ponownym napełnieniu zbiornika roztopienie cynku wymaga znacznej energii. Zastosowanie chłodzonych wodą nadawczo-odbiorczych przetworników EMA ze spiralną cewką na fale poprzeczne, pracujących z normalnym polem magnetycznym wytwarzanym przy użyciu magnesów Nd-Fe-B, pozwala na łatwe przeprowadzenie pomiaru od zewnątrz - bez opróżniania zbiornika, a w krótkim czasie potrzebnym na przeprowadzenie pomiaru temperatura zbiornika ulega obniżeniu jedynie o kilka stopni (pomiar odbywa się przy wyłączonym ogrzewaniu). Główna wada grubościomierzy EMA, tzn. stosunkowo duża strefa martwa, nie stwarza w tym zastosowaniu żadnych problemów, gdyż pomiar grubości realizowany jest w zakresie 20 - 50 mm.

Jak wcześniej stwierdzono, stosunkowo duża strefa martwa przetworników EMA nie pozwala na pomiar małych grubości, jeśli grubościomierz pracuje w oparciu o impulsową metodę echa. Częściowo problem ten można rozwiązać wykorzystując do pomiaru grubości analizę widma odbieranych impulsów, w którym występuje prążek o częstotliwości, z jaką odbierane są echa wielokrotne, rozchodzące się w badanym obiekcie. Sposób taki wykorzystano w przyrządzie do pomiaru grubości blach w zakresie poniżej 4 mm [90], a widmo częstotliwościowe odbieranych impulsów uzyskiwane jest dzięki zastosowaniu szybkiej transformaty Fouriera. W literaturze opisane są też próby wykorzystania do pomiarów małych grubości innych sposobów niż impulsowa metoda echa.

W pracy [5] przedstawiono wyniki badań dokładności rezonansowego grubościomierza EMA z przetwornikiem wytwarzającym poprzeczne fale ultradźwiękowe w postaci impulsu obejmującego 10 okresów sinusoidy o częstotliwości 3 MHz. Grubość wzorcowych płytek stalowych (1,5 mm) mierzono na zasadzie pomiaru fazy impulsów odbieranych przez ten przetwornik w czasie sięgającym 100  $\mu$ s od chwili wygenerowania impulsu. Stwierdzono, że zastosowana metoda pozwala na pomiar czasu przejścia fali ultradźwiękowej przez badany ośrodek z dokładnością 5 ns; cytowana praca nie zawiera jednak żadnych szczegółów dotyczących zarówno konstrukcji przetwornika, jak i samego układu pomiarowego oraz wykorzystanych metod obróbki sygnału.

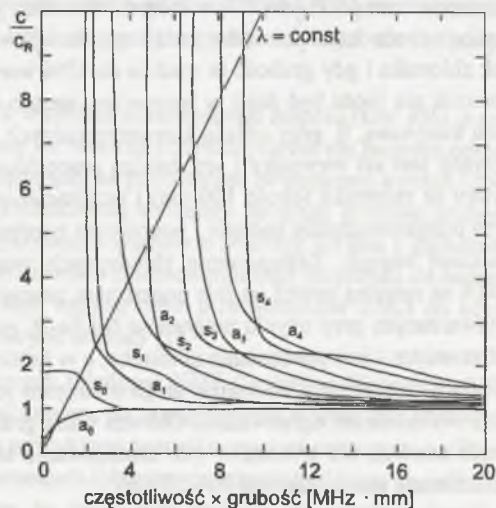
Praca [55] omawia próby wykorzystania przetworników EMA do badania blach o grubości wynoszącej kilka dziesiątych milimetra w oparciu o metodę rezonansową. Przetwornik

nadawczy generuje falę ultradźwiękową w sposób ciągły, przy czym jej częstotliwość jest modulowana przebiegiem sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz w zakresie 0,5 - 5 MHz (dobieranym stosownie do zakresu mierzonych grubości). Przetwornik odbiorczy - umieszczony po drugiej stronie badanej blachy - odbiera impulsy o maksymalnej amplitudzie wtedy, gdy częstotliwość fali ultradźwiękowej osiąga częstotliwości rezonansowe dla danej grubości blachy, tzn. gdy spełniony zostaje warunek, iż grubość blachy jest równa całkowitej wielokrotności połowy długości fali. Uzyskano dokładność pomiaru grubości na poziomie 1%. Istotną wadą tej metody jest konieczność uzyskania dwustronnego dostępu do badanego wyrobu.

Mimo iż niniejsza praca poświęcona jest zasadniczo przetwornikom EMA na fale podłużne i poprzeczne, to jednak dla przedstawienia pełniejszego obrazu możliwości zastosowań metody EMA do pomiaru grubości warto w tym miejscu wspomnieć o wykorzystaniu fal płytowych do pomiaru małych grubości [167, 203]. W przeciwieństwie do innych rodzajów fal ultradźwiękowych fale płytowe charakteryzują się silną dyspersją, tzn. zależnością ich prędkości od częstotliwości. Przykładowe zależności tego typu pokazano na rys. 5.1, przy czym prędkości fal płytowych odniesione są do prędkości fal powierzchniowych  $c_R$ .

Układ pomiarowy zawiera odrębne przetworniki: nadawczy i odbiorczy, które umieszczone są na tej samej powierzchni badanej blachy w pewnej odległości od siebie. Przetwornik nadawczy, zrealizowany w postaci przetwornika z cewką typu meander [203] lub w konfiguracji PPM (patrz

rys. 3.2.1) zasilany jest przebiegiem sinusoidalnym o wolno modulowanej częstotliwości, np. w zakresie od 300 kHz do 1,5 MHz [167]. Długość płytowej fali ultradźwiękowej generowanej w ośrodku jest stała i wymuszana przez konfigurację przetwornika (np. dla przetwornika z cewką typu meander długość fali jest równa podwójnej odległości pomiędzy sąsiednimi sekcjami uzwojenia); wielkości tej odpowiada na rys. 5.1 prosta przechodząca przez początek układu współrzędnych. Punkty przecięcia tej prostej z odpowiednimi krzywymi wyznaczają częstotliwości, przy których generowane są fale płytowe różnych postaci i rzędów. Fale te, wykrywane przez przetwornik odbiorczy, mają postać impulsów o odpowiedniej częstotliwości podstawowej widma. Na podstawie tej częstotliwości podstawowej widma kolejnych odbieranych impulsów wyliczana jest grubość badanej blachy [167]. Metoda ta pozwala na pomiar grubości blach w zakresie od kilku dziesiątych do kilku milimetrów z dokładnością 1%.



Rys. 5.1. Przykładowa zależność prędkości fazowej fal płytowych od iloczynu grubości płyty i częstotliwości dla różnych rzędów fali symetrycznej  $s$  i antysymetrycznej  $a$  [50]

Fig. 5.1. Example relationship between the phase velocity of plate waves and the plate thickness-frequency product for various symmetric  $s$  and antisymmetric modes  $a$  [50]

Grubościomierz ultradźwiękowy z przetwornikiem EMA, wykorzystujący impulsową metodę echa, skonstruowany został również w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej [49]. Opis tego grubościomierza zawarty jest w rozdziale 6, który poświęcony jest omówieniu przetworników EMA i współpracujących z nimi przyrządów, opracowanych przez autora tej pracy.

## 5.2. Badanie wyrobów o wysokiej temperaturze

Podstawowa zaleta przetworników EMA, tj. możliwość pracy bez jakiegokolwiek materialnego ośrodka sprzęgającego, czyni je szczególnie predestynowanymi do badania wyrobów o tak wysokiej temperaturze, w której użycie ciekłych ośrodków sprzęgających nie jest możliwe. Zastosowanie tych przetworników jest szczególnie korzystne wtedy, gdy temperatura badanego metalu ferromagnetycznego jest zbliżona do temperatury punktu Curie, gdyż w takich warunkach następuje znaczne zwiększenie amplitudy generowanej metodą EMA podłużnej fali ultradźwiękowej (patrz punkt 2.2.2). Zjawisko to występuje jednak w stosunkowo wąskim zakresie temperatur (750 - 800°C dla stali), w związku z czym przetworniki do badania wyrobów o wyższej temperaturze są często wyposażone w system chłodzenia powierzchni tych wyrobów przy użyciu rozpylonej wody oraz w układ pomiaru temperatury powierzchni, który steruje intensywnością chłodzenia tak, aby temperatura ta zawierała się w optymalnym z punktu widzenia skuteczności przetwarzania zakresie [82, 86, 201].

Wykorzystanie fal podłużnych do badań realizowanych w wysokiej temperaturze jest również preferowane, gdy temperatura wyrobu przekracza temperaturę punktu Curie, gdyż wtedy tłumienie poprzecznych fal ultradźwiękowych jest silniejsze niż fal podłużnych i - co więcej - rośnie ono szybciej ze wzrostem temperatury [130, 160]. Poniżej temperatury punktu Curie w zakresie aż do około 750°C (dla stali) korzystniejsze jest zastosowanie fal poprzecznych, gdyż łatwiejsze jest wtedy wymagane dla nich wytworzenie w badanym obiekcie silnego pola magnetycznego o kierunku normalnym do powierzchni.

Głównym problemem, jaki należy rozwiązać konstruując przetworniki EMA przeznaczone do badania wyrobów o temperaturze sięgającej 1000°C i więcej [30, 82, 86, 129, 130, 150, 160], jest zapewnienie odpowiednio niskiej temperatury samych przetworników, gwarantującej ich niezawodną pracę. Osiąga się to przez wymuszone chłodzenie wodne lub olejowe przetworników oraz zastosowanie odpowiednich materiałów izolujących termicznie i materiałów zdolnych do pracy w znacznie podwyższonej temperaturze. Oprócz tego przetworniki takie pracują często w sposób przerywany, tzn. po kilkunastu lub kilkudziesięciu sekundach pracy są one odsuwane od badanego wyrobu na czas potrzebny do ich ostygnięcia lub wyroby (np. kęsy) są dostarczane do badania w odpowiednich odstępach czasowych.

Do wytwarzania stałego pola magnetycznego w przetwornikach EMA przeznaczonych do badania gorących wyrobów stosunkowo rzadko wykorzystywane są magnesy trwałe, gdyż ich dopuszczalna temperatura pracy na ogół nie przekracza 120°C [2] (choć w pracy [4] wspomina się o magnesach wykonanych ze stopu samaru i kobaltu, zdolnych do ciągłej pracy w temperaturze sięgającej 350°C), a poza tym zastosowanie takich przetworników na liniach technologicznych w zakładach metalurgicznych nie narzuca konieczności ich miniaturyzacji. Najczęściej stosowane są elektromagnesy prądu stałego [82, 86, 130, 160], które wymagają

wymuszonego chłodzenia zarówno uzwojeń, jak i rdzenia magnetycznego (przy czym konieczność chłodzenia uzwojeń wynika nie tylko ze zbliżenia do gorącego wyrobu, lecz również z ich nagrzewania się pod wpływem stosunkowo dużej doprowadzanej do nich energii elektrycznej); większość stali stosowanych na rdzenie magnetyczne nie może pracować w temperaturze przekraczającej 550°C (niektóre stopy kobaltu mogą pracować w temperaturach sięgających 800°C) [2]. Moc potrzebna do zasilania tych elektromagnesów sięga często kilkuset watów, co znacznie zwiększa wymagania w zakresie ich chłodzenia, w związku z czym czasem stosowane jest impulsowe podmagnesowanie powierzchni gorącego wyrobu. Do tego celu wykorzystuje się zarówno elektromagnesy z rdzeniem [150], jak i płaskie cewki powietrzne, umieszczone nad uzwojeniem nadawczym lub odbiorczym przetwornika [2, 30]. Przez cewkę taką przepuszczany jest impuls prądu o czasie trwania wystarczającym na przeprowadzenie pojedynczego pomiaru (badania). Przy braku rdzenia magnetycznego maksymalne natężenie prądu wymagane dla uzyskania indukcji magnetycznej wynoszącej kilka dziesiątych tesli jest jednak bardzo duże, sięgając np. 1500 A [2, 30]. Stosowane są również rozwiązania przetworników nadawczych EMA, które generują falę ultradźwiękową dzięki wykorzystaniu zmiennego pola magnetycznego wielkiej częstotliwości wytwarzanego przez prąd płynący w cewce nadawczej przetwornika [129]. W takim przypadku - o czym wspomniano już w punkcie 3.2 - częstotliwość fali ultradźwiękowej jest dwukrotnie większa od częstotliwości prądu wzbudzającego, a jej amplituda jest znacznie mniejsza niż podczas pracy ze źródłem silnego stałego lub wolnozmiennego pola magnetycznego.

W znacznie bardziej krytycznych warunkach niż magnesy lub elektromagnesy pracują cewki nadawcze i odbiorcze przetworników EMA przeznaczonych do badania gorących wyrobów. Ze względu na małą skuteczność przetworników i zjawisko unoszenia cewki te nie powinny być oddalone od powierzchni wyrobu o więcej niż 2 - 3 mm i w celu ich zabezpieczenia są one separowane od tej powierzchni przy użyciu osłon wykonanych z odpornych na wysokie temperatury materiałów ceramicznych, takich jak np. tlenek aluminium [30, 129, 160] lub węglík krzemu [130]. Cewki te mogą być chłodzone w sposób wymuszony wyłącznie jednostronnie, to jest od strony wnętrza przetwornika. Jeżeli do wykonania cewki wykorzystany zostanie typowy, izolowany emalią drut miedziany nawojowy, to maksymalna temperatura pracy cewki wyniesie około 200°C. Zastosowanie izolacji poliamidowej pozwala na długotrwałą pracę w temperaturze sięgającej 350°C [2]. Jeżeli utrzymanie temperatury pracy cewki poniżej podanych wartości nie jest możliwe, to odpowiednie cewki nawija się najczęściej drutem nieizolowanym z zachowaniem odstępu międzyzwojowego wynoszącego 0,5 - 1 mm, a następnie izoluje się je przy użyciu azotku krzemu [160, 179], czy też tlenku glinu, magnezu lub berylu [129]. Powstają jednak przy tym problemy związane ze słabym przyleganiem powyższych materiałów izolacyjnych do metalicznego podłoża. Zamiast drutu miedzianego stosowane są również przewody wykonane z platyny, wolframu, molibdenu, niobu i stopów niklowo-chromowych [2, 129]. Wykonane w ten sposób cewki przetworników EMA mogą trwale pracować w temperaturze przekraczającej 1000°C [2, 129, 130]. Jeszcze inny sposób zabezpieczenia cewki przed działaniem wysokiej temperatury polega na umieszczeniu jej na miedzianej podkładce odległościowej w sposób pokazany w podrozdziale 4.1 (rys. 4.3); w podkładce tej dodatkowo wykonane są kanaliki, przez które powierzchnia metalu spryskiwana jest wodą [86].

Przetworniki EMA zdolne do pracy w temperaturze sięgającej 1000°C stosowane są przede wszystkim w zakładach metalurgicznych na różnych etapach wytwarzania stali, w walcowniach, w zakładach produkujących rury itp. Jedną z najbardziej udanych i najczęściej wymienianych w literaturze konstrukcji jest system przeznaczony do badania gorących prętów i kęsów o wymiarach poprzecznych sięgających 160 mm, który zainstalowano w latach siedemdziesiątych w jednej z brytyjskich stalowni [160, 201, 202]. System ten, w którym przetwornik pracuje przy wykorzystaniu impulsowej metody echa, pozwala na wykrycie otworu o średnicy 1,5 mm przechodzącego przez środek badanego pręta. Przy użyciu tego systemu przebadano tysiące prętów i w trakcie jego eksploatacji był on poddawany pewnym modyfikacjom; po likwidacji stalowni dalsze prace nad tym systemem zostały jednak zaniechane.

Oryginalną metodę badania kęsów stalowych o temperaturze do 1000°C opisano w pracach [130, 168]. W pracującym metodą przepuszczania przetworniku zastosowano dwie pary cewek nadawczych i odbiorczych, dzięki czemu w badanym materiale wytwarzane są dwie, rozchodzące się równolegle, wiązki fal ultradźwiękowych. Oba tory odbiorcze pracują w układzie różnicowym, który zapewnia szczególnie dużą czułość systemu na małe wady, mieszczące się całkowicie w obrębie jednej z dwóch wiązek. System ten pozwala na wykrycie w kęsach przelotowych otworów o średnicy 4 mm.

Przetwornik EMA przeznaczony do zastosowania na linii ciągłego odlewania stali przedstawiono w pracy [82]. Oprócz opisu konstrukcji przetwornika podano tam jednak wyłącznie wyniki jego wstępnych badań w warunkach laboratoryjnych, a nie wyniki prób eksploatacyjnych na rzeczywistej linii technologicznej.

Kolejnym interesującym zastosowaniem odpornych na wysokie temperatury przetworników EMA jest wykorzystanie ich na linii walcowania kęsów aluminiowych o temperaturze sięgającej 500°C [30, 151]. Podczas walcowania aluminium części zewnętrzne kęsa odkształcają się bardziej niż środkowe, w związku z czym na końcach materiału walcowanego następuje jego rozszczepianie się w płaszczyźnie równoległej do powierzchni walcowanych. Przed dalszą obróbką materiału tak wadliwie uformowane końce należy odciąć i zastosowanie przetwornika EMA pozwala na precyzyjne wyznaczenie wymaganej linii cięcia.

Jednym z ważniejszych zastosowań przetworników EMA przystosowanych do pracy w wysokiej temperaturze jest wykorzystanie ich do pomiaru grubości ścianek gorących rur [86, 207, 208], o czym wspomniano już w poprzednim punkcie tego rozdziału. Do pomiaru grubości wyrobów o wysokiej temperaturze lub do lokalizacji występujących w nich wad wewnętrznych niezbędna jest znajomość prędkości fal ultradźwiękowych w badanym materiale w danej temperaturze. Opublikowane wyniki badań wskazują, że prędkość zarówno podłużnych, jak i poprzecznych fal ultradźwiękowych maleje monotonicznie ze wzrostem temperatury [10, 87, 150, 160]. Dla fal podłużnych w temperaturach poniżej 700°C szybkość spadku prędkości ze wzrostem temperatury zawiera się dla stali różnego rodzaju w granicach od 10 do 20 m/s/°C, natomiast w przedziale temperatur 700 - 800°C szybkość ta może wzrosnąć nawet do 50 m/s/°C [87]. Wzrost temperatury próbki od temperatury pokojowej do 1000°C powoduje zmniejszenie prędkości podłużnych i poprzecznych fal ultradźwiękowych, które może sięgać nawet 20% wartości początkowej [10, 87, 150, 160]. Konsekwencją tego faktu jest konieczność pomiaru temperatury podczas pomiaru grubości gorących wyrobów. Jeżeli, przykładowo, grubość ma być zmierzona z dokładnością  $\pm 1\%$ , to w temperaturze 100°C do-

kładność pomiaru temperatury może wynosić  $\pm 80^{\circ}\text{C}$ , natomiast gdy temperatura badanego obiektu przekracza  $700^{\circ}\text{C}$ , to musi ona być znana z dokładnością  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  [160]. Zależność prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych od temperatury może być wykorzystana do bezstykowego pomiaru temperatury wewnętrznej gorących obiektów przy zastosowaniu metody EMA; w pracy [10] przedstawiono wyniki doświadczeń nad takim zastosowaniem w temperaturach sięgających  $1300^{\circ}\text{C}$ .

### 5.3. Transport kolejowy

Już na początkowym etapie rozwoju metody elektromagnetyczno-akustycznej za jedno z najważniejszych i perspektywicznych jej zastosowań uważane było wykorzystanie przetworników EMA do badania szyn kolejowych - zarówno na linii produkcyjnej w zakładzie metalurgicznym, jak i szyn eksploatowanych już na trasach kolejowych - oraz elementów jezdnych pociągów.

W jednej z pierwszych prac poświęconych takim zastosowaniom metody EMA stwierdzono [205], że stosując przetwornik normalny na fale poprzeczne ze spiralną cewką można wykryć poziome rozwarstwienia (pęknięcia) w główce szyny przy prędkości badania dochodzącej do 70 km/h. Badania prowadzono na jednej z normalnie eksploatowanych radzieckich linii kolejowych, a jako kryterium wystąpienia wady przyjęto spadek amplitudy echa odbitego od dna szyny poniżej zadanego poziomu. Stosując taką samą metodę wykrywania wad oraz podobny przetwornik w pracy [8] opisano wyniki badań laboratoryjnych nad możliwością wykrywania wad w postaci poziomych lub pionowych pęknięć w szyjce oraz poziomych pęknięć w części stopki znajdującej się bezpośrednio pod szyjką szyny. Szczególnie interesująca jest wynikająca z tych badań możliwość wykrywania pionowych pęknięć, które podczas badań prowadzonych przy użyciu konwencjonalnych stykowych głowic na fale podłużne, przyłożonych do powierzchni tocznej szyny, mogą być wykryte tylko dzięki transformacji fal podczas ich odbicia od powierzchni bocznej szyjki szyny. W pracy tej zasygnalizowano również konieczność zastosowania do badania bocznych części głowki szyny przetworników EMA wytwarzających fale ultradźwiękowe rozchodzące się skośnie do powierzchni badanego materiału i opisano próby wykorzystania do tego celu przetwornika z uzwojeniem złożonym z szeregu ramek. Wykorzystanie przetwornika normalnego na fale poprzeczne i zastosowanie metody wykrywania wad opartej na pomiarze spadku amplitudy echa dna do badania szyn w jednym z radzieckich zakładów metalurgicznych wzmiankowano również w pracy [75]. W pracy tej przede wszystkim jednak przeanalizowano wpływ odległości przetwornika od powierzchni szyny oraz jego odchylenia od płaszczyzny symetrii szyny na stałość amplitudy odbieranych ech dna; nie są tam natomiast omawiane rodzaje wykrywanych wad oraz nie są przedstawione żadne doświadczenia związane z eksploatacją urządzenia. Praca ta zwraca uwagę przede wszystkim ze względu na stwierdzenie autorów, że badania prowadzone były przy odległości przetwornika od powierzchni szyny sięgającej 10 mm (!) (jako normalną odległość roboczą podaje się 5 mm), a spadek amplitudy sygnału ze wzrostem tej odległości nie przekraczał 2,5 dB/mm. Wyniki te znacznie odbiegają od wartości powszechnie podawanych w literaturze dotyczącej przetworników EMA (odległość przetwornika od powierzchni metalu sięga najwyżej 2 - 3 mm, spadek amplitudy sygnału wynikający ze wzrostu tej odległości wynosi od kilku

do kilkunastu dB/mm) i trudno jest się do nich ustosunkować nie znając szczegółów technicznych skonstruowanego przez autorów urządzenia.

Prototypowe urządzenia do badania szyn kolejowych skonstruowane zostały także w Stanach Zjednoczonych [1, 2]. W urządzeniach tych zastosowano przetworniki normalne na fale poprzeczne, które pozwalają na wykrywanie pęknięć w szyjce i w główce szyny, oraz przetworniki wytwarzające fale poprzeczne rozchodzące się równoległe do powierzchni tocznej szyny, które umożliwiają wykrycie pęknięć w tym obszarze.

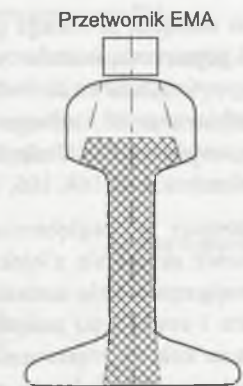
Innym obszarem potencjalnego wykorzystania przetworników EMA w transporcie kolejowym są pomiary naprężeń. W pracach [37, 38] opisano, przykładowo, próby zastosowania przetworników na fale poprzeczne o polaryzacji SH do pomiaru naprężeń powstających w obręczach kół kolejowych wskutek ich lokalnego nagrzewania się podczas hamowania pociągu. Przetworniki takie mogą być też wykorzystane do pomiarów naprężeń w szynach ciągłych, powstających w wyniku znacznych zmian temperatury otoczenia. Specyfikę pomiarów naprężeń przy użyciu przetworników EMA omówiono dokładniej w podrozdziale 5.5.

Prace nad wykorzystaniem przetwornika EMA wytwarzającego normalnie rozchodzące się fale poprzeczne do wykrywania wad w szynach kolejowych prowadzone były również przez autora niniejszej pracy; konstrukcję przeznaczonego do tego celu przetwornika oraz uzyskane przy jego użyciu wyniki przedstawiono w rozdziale 6.

Na podstawie ogólnie dostępnych w literaturze informacji, które są jednak stosunkowo ubogie, a dokładniejsze opisy konstrukcji przetworników przeznaczonych do badania szyn i uzyskiwanych przy ich użyciu wyników są trudno dostępne, gdyż najczęściej są publikowane w postaci raportów z badań lub dokumentacji zakładowej, jak również na podstawie doświadczeń własnych autora można stwierdzić, że zakres wykorzystania przetworników EMA do badania szyn kolejowych jest znacznie węższy od oczekiwanego. Najczęściej wykorzystywana do tego celu konfiguracja to przetwornik normalny na fale poprzeczne, umieszczony przy powierzchni tocznej szyny w płaszczyźnie jej symetrii, jak pokazano na rys. 5.2.

W położeniu takim badaniu podlega jedynie środkowa część głowki szyny, szyjka i część stopki bezpośrednio pod szyjką. Minimalna głębokość, na której można wykryć wady w główce, uwarunkowana jest strefą martwą, która dla przetworników EMA może wynosić kilkanaście i więcej milimetrów. Z powodu tak dużej strefy martwej nie jest również celowe badanie szyjki szyny przy użyciu przetworników normalnych przyłożonych do jej bocznych powierzchni.

Autorowi nie są znane przykłady udanego wykorzystania kątowych przetworników EMA do badania szyn. Wynika to przede wszystkim z przedstawionych w rozdziale 3 wad tego rodzaju



Rys. 5.2. Podstawowe położenie przetwornika EMA względem szyny i obszar jej przekroju, w którym można wykryć wady

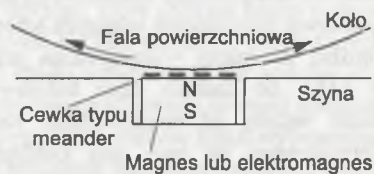
Fig. 5.2. Basic position of an EMA transducer on a railway rail and the area of the cross-section where defects can be detected

przetworników, tzn. trudności wytworzenia fal poprzecznych typu SV rozchodzących się pod kątem większym niż około 30° w stosunku do normalnej oraz małej rozdzielczości takich przetworników, wynikającej z konieczności pobudzania ich impulsami o stosunkowo długim czasie trwania.

Tak więc metoda EMA oferuje jak dotychczas ograniczone możliwości badania defektoskopowego szyn, zwłaszcza w porównaniu z metodami klasycznymi stosowanymi na linii produkcyjnej szyn, gdzie stosuje się kilkanaście lub więcej głowic normalnych i kątowych umieszczonych w różnych położeniach względem badanej szyny [199]. Jak podkreśla się jednak w pracach [1, 2], zastosowanie przetworników EMA może być konkurencyjne w stosunku do metod klasycznych podczas badania szyn już eksploatowanych, zwłaszcza że na niektórych liniach amerykańskich szyny w torach są smarowane w celu zmniejszenia tarcia podczas ruchu pociągu i badanie realizowane przy użyciu głowic klasycznych wymaga uprzedniego bardzo pracochłonnego i kosztownego oczyszczenia powierzchni szyny ze środka smarnego. Podczas badań realizowanych w terenie klasyczne głowice ultradźwiękowe (z przetwornikami na fale podłużne) prowadzone są przede wszystkim w płaszczyźnie symetrii szyny i w takim położeniu pionowe pęknięcia szyny mogą być wykryte tylko dzięki transformacji fal podczas ich odbicia od bocznej powierzchni szyki. Wady takie mogą natomiast łatwo być wykryte przez przetworniki EMA na fale poprzeczne, gdyż fale te rozchodzą się w obecności pęknięć równoległych do kierunku propagacji ulegają silnemu tłumieniu.

Mimo iż niniejsza publikacja poświęcona jest zasadniczo przetwornikom EMA na fale podłużne i poprzeczne, warto w tym miejscu wspomnieć o wykorzystaniu przetworników EMA na fale powierzchniowe do badania powierzchni tocznej kół kolejowych, gdyż jest to jedno z najbardziej znanych i udanych zastosowań metody EMA w praktyce. Metoda badania opracowana została we Fraunhofer-Institut w Saarbrücken i z powodzeniem stosowana jest przez koleje niemieckie [2, 164, 166, 199].

Zamontowany we wgłębieniu w szynie przetwornik składa się z elektromagnesu wytwarzającego w kole normalne pole magnetyczne i cewki typu meander (rys. 5.3). Najechnięcie koła na przetwornik powoduje uruchomienie odpowiedniego przełącznika, w wyniku czego wygenerowane zostają dwie fale powierzchniowe, poruszające się wzdłuż powierzchni tocznej koła w przeciwnych kierunkach. Echa wynikające z ewentualnych wad (pęknięć) wykrywane są przez odpowiednie układy odbiorcze. W celu wyeliminowania wpływu strefy martwej do każdej szyny zamocowane są dwa przetworniki w pewnej odległości od siebie i cały układ jest sterowany mikroprocesorem. Podobny system opracowany został w Stanach Zjednoczonych w National Institute of Standards and Technology w Boulder (Colorado), przy czym do wytworzenia stałego normalnego pola magnetycznego zastosowano tam magnes trwały neodymowo-borowy [170, 172]. Skuteczność przetwornika EMA w takim zastosowaniu jest na tyle



Rys. 5.3. Przetwornik EMA na fale powierzchniowe do badania kół kolejowych zamontowany w szynie [166]

Fig. 5.3. Surface wave EMA transducer mounted in a railroad rail for wheel tread testing [166]

duża, że sygnały obserwowane są nawet po kilkunastokrotnym przejściu fali ultradźwiękowej wokół badanego koła, tzn. po przebyciu drogi wynoszącej kilkadziesiąt metrów.

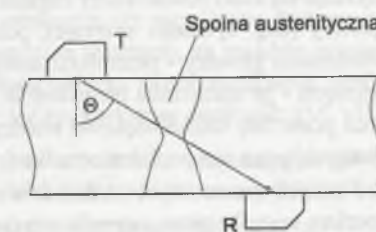
### 5.4. Badanie połączeń spawanych

W konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych połączeń spawanych przede wszystkim używane są głowice skośne na fale poprzeczne (o polaryzacji SV), a do najczęściej badanych należą złącza spawane doczołowe [41, 156]. Fale poprzeczne o polaryzacji SV nie są jednak w praktyce stosowane do badania spoin austenitycznych, gdyż ze względu na anizotropię własności sprężystych materiału spoiny i strukturę ziaren następuje silne zniekształcenie wiązki ultradźwiękowych fal poprzecznych o takiej polaryzacji [156, 102].

Kąt załamania głowicy z przetwornikiem piezoelektrycznym do badania połączeń spawanych dobiera się stosownie do grubości złącza i jest on zazwyczaj większy niż 35°. Wyklucza to praktycznie zastosowanie do takich badań przetworników EMA generujących fale poprzeczne SV, gdyż - jak stwierdzono w rozdziale 3 - skuteczność tych przetworników gwałtownie spada dla kątów propagacji, mierzonych w stosunku do normalnej do powierzchni, przekraczających trzydzieści kilka stopni. Znacznymi zaletami charakteryzuje się natomiast zastosowanie do badania połączeń spawanych przetworników EMA na fale poprzeczne typu SH.

Przetworniki te realizowane są w kilku konfiguracjach, które przedstawiono w rozdziale 3. Do badania połączeń spawanych wykorzystuje się zarówno przetworniki z cewką typu meander i magnesem wytwarzającym styczne pole magnetyczne, którego linie sił są równoległe do dłuższych sekcji uzwojenia [3, 100, 102], jak i przetworniki typu PPM z cewką w kształcie ramki [171] lub cewką typu meander [100].

Do podstawowych zalet poprzecznych fal ultradźwiękowych o polaryzacji SH należy brak transformacji fali padającej na granicę dwóch ośrodków oraz całkowite - niezależne od kąta padania - odbicie od naroża [100]. Podczas przejścia przez spoinę austenityczną wiązka fal typu SH ulega tylko niewielkim zniekształceniom [100, 102]; podobnie niewielkie zniekształcenia występują, gdy fale o polaryzacji SH, a także fale podłużne, przechodzą przez spoinę łącząca elementy wykonane ze stali austenitycznej i ferrytycznej [102]. W pracach [2, 101, 102] podano wyniki pomiarów zależności współczynnika przepuszczania fali SH przez spoinę austenityczną od kąta  $\Theta$ , przeprowadzonych przy użyciu przetworników EMA w układzie pokazanym na rys. 5.4. Stwierdzono, że fale tego typu przechodzą przez spoinę praktycznie bez osłabienia w zakresie kątów  $\Theta$  od 48° do 90°.



Rys. 5.4. Przejście fali SH przez spoinę austenityczną (T - przetwornik nadawczy, R - przetwornik odbiorczy)

Fig. 5.4. Transmission of an SH-wave through an austenitic weld (T - transmitter, R - receiver)

Ocenę możliwości wykorzystania przetworników EMA do wykrywania pęknięć w spoinach przeprowadzono przy użyciu próbek, w których wykonano wzdłuż spoiny nacięcia o różnej długości i głębokości [100, 102]. Dla konkretnego przetwornika nadawczo-odbiorczego używanego w badaniach jako granicę wykrywalności podano wadę podłużną o długości 10 mm i głębokości 2 mm, natomiast dla dwóch odrębnych przetworników (nadawczego i odbiorczego), prowadzonych po obu stronach spoiny i nachylonych do niej pod niewielkim kątem (tzw. układ V), wykryto nacięcie poprzeczne w spoinie o wymiarach odpowiednio 5 i 2 mm [102]. Podkreślono przy tym, że przy użyciu fal SH rozchodzących się równoległe do powierzchni metalu, pęknięcia takie mogą być wykrywane z odległości wynoszącej kilkaset milimetrów. W pracy [100] wykazano również, że przetworniki EMA na fale SH pozwalają wykrywać pęknięcia w powłokach austenitycznych nałożonych na podłoże ferrytyczne, zapewniając w takim przypadku odstęp napięciowy sygnału od szumu większy niż podczas badania przy użyciu głowicy stykowej z przetwornikiem piezoelektrycznym.

Obniżenie progu wykrywalności wad i jednocześnie zwiększenie zdolności precyzyjnej lokalizacji wykrytej wady możliwe jest dzięki ogniskowaniu wiązki ultradźwiękowej generowanej przez przetwornik. Efekt ten można uzyskać w przetwornikach EMA na fale SH, w których zastosowano uzwojenia typu meander z nierównomiernym rozstawem poszczególnych sekcji, o których wspomniano w punkcie 3.5.3. Przy użyciu takiego przetwornika wykryto wykonany w stalowej płycie otwór o średnicy 1,5 mm, który może, na przykład, symulować pęcherz w spoinie [3].

Wykorzystanie nowoczesnych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów do poprawy własności przetworników EMA do badania połączeń spawanych przedstawiono w pracy [171]. Wielokrotne przebiegi napięcia uzyskane z przetwornika po przetworzeniu na postać cyfrową są najpierw uśredniane, dzięki czemu zwiększa się odstęp napięciowy sygnału od szumu. Następnie, dzięki wykonaniu opisanych niżej operacji na odebranych i uśrednionych sygnałach uzyskuje się efekt równoważny zogniskowaniu wiązki. Metoda ta, zwana metodą syntetycznej apertury (ang. synthetic aperture), polega na sumowaniu sygnałów odebranych w różnych położeniach głowicy - przemieszczanej w kierunku najlepiej prostopadłym do wykrywanego pęknięcia - po uprzednim przesunięciu ich w czasie, odpowiednio do różnicy dróg przebywanych przez falę ultradźwiękową między przetwornikiem w rozpatrywanych jego położeniach i interesującym nas punktem ośrodka (ogniskiem). Dzięki wykorzystaniu szybkiej transformaty Fouriera przesuwanie w dziedzinie czasu realizowane jest jako mnożenie transformat Fouriera sygnału przez czynnik  $\exp(i\omega\Delta t)$ , gdzie  $\Delta t$  oznacza wymagane przesunięcie, które wyznacza się na podstawie odpowiednich zależności geometrycznych. W tej samej pracy wykazano również praktycznie możliwość wykorzystania przetworników EMA do oceny wielkości (długości, głębokości) wykrywanych wad w postaci pęknięć (o głębokości przekraczającej 0,5 mm) na podstawie amplitudy odebranego sygnału.

Tak więc zastosowanie przetworników EMA na fale poprzeczne typu SH w połączeniu z cyfrową obróbką odbieranych sygnałów otwiera nowe możliwości w zakresie badania połączeń spawanych i już obecnie przetworniki te w pewnych zastosowaniach mogą tam być konkurencyjne w stosunku do głowic konwencjonalnych.

## 5.5. Pomiary naprężeń

Na podstawie pomiaru prędkości propagacji fal ultradźwiękowych można wyznaczyć wiele własności mechanicznych ciał stałych, np. stałe sprężystości [156]. Fale ultradźwiękowe można również wykorzystać do pośredniego pomiaru naprężeń zarówno własnych, jak i wywołanych przez obciążenie zewnętrzne, gdyż naprężenia powodują zmiany prędkości propagacji fal ultradźwiękowych [156, 199]. W stali naprężenie o wartości 10 MPa powoduje zmianę prędkości fal poprzecznych o około 0,01% [156, 175, 199] i aby taka metoda pomiaru naprężeń mogła mieć znaczenie praktyczne, z co najmniej taką dokładnością, tj. 0,01%, powinna być mierzona prędkość fal.

Przy użyciu przetworników piezoelektrycznych uzyskanie takiej dokładności pomiaru może być trudne wskutek błędów powodowanych przez warstwę sprzęgającą, zwłaszcza gdy do pomiarów wykorzystane zostaną głowice normalne na fale poprzeczne, wymagające zastosowania cieczy sprzęgającej o dużej lepkości. Eliminacja warstwy sprzęgającej dzięki wykorzystaniu do pomiarów prędkości fal przetworników EMA pozwala na zwiększenie powtarzalności wyników pomiaru czasu przejścia fali ultradźwiękowej przez badany ośrodek do poziomu  $\pm(2-3)$  ns [2, 175], a rozrzut wyników wielokrotnych pomiarów wynika głównie ze zmian odległości przetwornika od powierzchni badanego metalu.

Zastosowanie przetworników EMA nie eliminuje jednak kolejnego problemu charakterystycznego dla pomiarów naprężeń metodą ultradźwiękową. Problem ten polega na tym, że inne niż naprężenia czynniki powodujące anizotropię badanego metalu, np. układ jego ziaren (tekstura), mogą wpływać na prędkość fal ultradźwiękowych w stopniu znacznie większym niż naprężenia. (Dzięki temu możliwe stało się wykorzystanie przetworników EMA do pomiaru różnych - charakteryzujących anizotropię - parametrów blach walcowanych dla przemysłu samochodowego [155, 197].) Według pracy [155] w stali tekstura może wpływać na ogólną wielkość anizotropii w stopniu np. 20-krotnie większym niż naprężenia. Podczas pomiarów bezwzględnej wartości naprężenia, a więc i naprężeń własnych, na zasadzie pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej podstawowego znaczenia nabiera zatem możliwość rozróżnienia, czy zmiana prędkości wynika z naprężenia, czy też np. z tekstury metalu [2, 155, 175].

Pomiary naprężeń metodą ultradźwiękową (również przy użyciu konwencjonalnych głowic stykowych) wykonywane są najczęściej przy użyciu tzw. techniki dwójłomności [37, 38, 163, 175, 199], która polega na pomiarze różnicy czasów przejścia przez grubość badanego ośrodka dwóch fal poprzecznych, rozchodzących się w kierunku normalnym do przyłożonego naprężenia, z których jedna spolaryzowana jest równoległe, a druga - prostopadle do kierunku naprężenia. Różnica tych czasów (lub różnica prędkości) jest w przybliżeniu proporcjonalna do przyłożonego naprężenia, przy czym w materiałach anizotropowych pojedynczy pomiar pozwala tylko na wyznaczenie zmiany naprężenia w stosunku do stanu z poprzedniego pomiaru (a nie naprężenia bezwzględnego).

W pomiarach naprężeń do wytworzenia fal poprzecznych rozchodzących się normalnie do powierzchni badanego metalu najczęściej stosowane są przetworniki EMA z uzwojeniem w postaci ramki lub dwóch ramek umieszczonych obok siebie [163, 175]. Jeżeli pomiar wykonywany jest techniką dwójłomności, to niezbędne jest obrócenie przetwornika o 90° w celu przeprowadzenia drugiego pomiaru. Aby zminimalizować powstające podczas tej operacji błędy, można wykonać uzwojenie przetwornika EMA w postaci dwóch ułożonych jedna pod

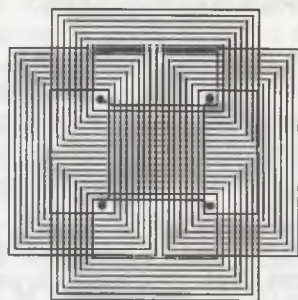
drugą wzajemnie prostopadłych ramek, wykonanych techniką obwodu drukowanego (rys. 5.5), dzięki czemu pomiar można przeprowadzić bez obracania przetwornika. Zastosowanie magnesu Nd-Fe-B umożliwia zbudowanie przetwornika o zwartej konstrukcji, który pozwala na przeprowadzenie pomiarów naprężeń i anizotropii materiału [175].

Inną niż opartą na pomiarze prędkości fal ultradźwiękowych potencjalnie możliwą metodę pomiaru naprężeń zasygnalizowano w pracach [118, 163]. W metodzie tej wykorzystuje się zjawisko magnetostrykcji, które może mieć znaczący udział w procesie przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego w ferromagnetykach przy niezbyt dużych natężeniach przyłożonego z zewnątrz pola magnetycznego. W cytowanych pracach przedstawiono uzyskane doświadczalnie przykładowe zależności amplitudy sygnału odbieranego przez przetwornik EMA od natężenia polaryzującego badaną próbkę pola magnetycznego i wielkości przyłożonych do niej naprężeń. Duża nieliniowość tych zależności, trudność ich przedstawienia w postaci analitycznej oraz jednoczesne występowanie innych mechanizmów przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego powoduje jednak, że praktyczne wykorzystanie tej metody do niezawodnego i dokładnego pomiaru naprężeń nie jest obecnie jeszcze możliwe.

### 5.6. Badanie głowic ultradźwiękowych

Wykorzystanie głowic ultradźwiękowych, a zwłaszcza głowic kątowych, do lokalizacji wad wewnętrznych w badanych wyrobach wymaga znajomości ich własności kierunkowych. W praktyce przemysłowej do pomiaru podstawowych parametrów charakteryzujących własności kierunkowe głowic ultradźwiękowych stosuje się odpowiednie wzorce ultradźwiękowe [41, 156, 161].

Jeżeli wymagana jest znajomość dokładniejszego rozkładu pola akustycznego wytwarzanego przez głowicę - na przykład podczas badania nowo konstruowanych głowic, to pomiary charakterystyk kierunkowych realizuje się najczęściej w sposób zanurzeniowy przy użyciu odpowiednio małych piezoelektrycznych przetworników odbiorczych lub reflektorów w postaci metalowych kulek o małej średnicy [156]. Sposób taki pozwala jednak na badanie tylko głowic na fale podłużne, gdyż fale poprzeczne nie rozchodzą się w cieczach. Pomiary takie wykonywane są również przy użyciu stalowych lub aluminiowych wzorców w postaci połówki walca; badany przetwornik nadawczy (głowica) jest umieszczany w środku krzywizny walca, a przetwornik pomiarowy jest przemieszczany wzdłuż powierzchni walcowej. Takie stanowiska pomiarowe pozwalają na badanie głowic na fale poprzeczne; jeżeli jednak jako przetwornik pomiarowy wykorzystywany jest przetwornik piezoelektryczny na fale poprzeczne, to



Rys. 5.5. Uzwojenie przetwornika EMA do pomiaru naprężeń techniką dwojłomności [175]

Fig. 5.5. Winding of an EMA transducer for stress measurement with the birefringence technique [175]

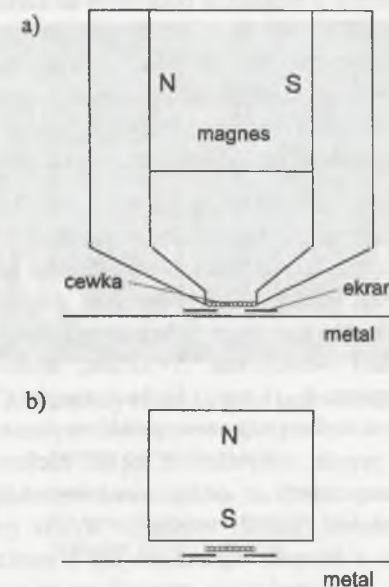
w charakterze ośrodka sprzęgającego należy stosować ciecz o dużej lepkości lub też do powierzchni walcowej należy na stałe przykleić szereg takich przetworników.

Powyższe problemy można łatwo wyeliminować wykorzystując do pomiaru odbiorcze przetworniki elektromagnetyczno-akustyczne; zastosowanie przetworników EMA do takiego celu jest jednym z najstarszych przykładów udanego ich wykorzystania w ultradźwiękowej technice pomiarowej [22, 127]. Dzięki wykorzystaniu silnych magnesów, wykonanych z materiałów zawierających domieszki pierwiastków ziem rzadkich, stosowane obecnie odbiorcze przetworniki EMA charakteryzują się małymi wymiarami i powszechnie stosowane są do badania własności kierunkowych różnych przetworników nadawczych fal ultradźwiękowych, zwłaszcza zaś przetworników EMA i laserowych [27, 42, 51, 92, 96].

Typową konstrukcją przetworników odbiorczych EMA do badania charakterystyk kierunkowych źródeł fal ultradźwiękowych przedstawia rys. 5.6. W przetworniku na fale podłużne cewka odbiorcza umieszczona jest w obszarze składowej stycznej stałego pola magnetycznego, natomiast cewka przetwornika na fale poprzeczne znajduje się w obszarze składowej normalnej pola magnetycznego wytwarzanego przez przetwornik na powierzchni metalowej próbki. W celu zmniejszenia aktywnej strefy odbioru od strony próbki cewka jest zazwyczaj ekranowana przy użyciu cienkiej blaszki miedzianej z wykonanym w niej małym otworem lub szczeliną o powierzchni wynoszącej kilka mm<sup>2</sup>.

W porównaniu z innymi bezstykowymi przetwornikami odbiorczymi fal ultradźwiękowych stosowanymi w ultradźwiękowej technice pomiarowej, tj. interferometrami optycznymi i przetwornikami pojemnościowymi, przetworniki EMA zapewniają uzyskanie sygnału elektrycznego o największej amplitudzie, charakteryzując się jednocześnie najmniejszym odstępem napięciowym sygnału od szumu i największym pasmem przenoszenia, które może jednak sięgać kilku, czy nawet kilkunastu MHz [42].

Przetworniki odbiorcze EMA (z magnesami odlanymi ze stopu Alnico 400B) do badania charakterystyk kierunkowych głowic ultradźwiękowych na fale podłużne i poprzeczne wraz z odpowiednim stanowiskiem pomiarowym skonstruowane zostały również przez autora niniejszej pracy. Przedstawiono je w rozdziale 6.



Rys. 5.6. Przetworniki odbiorcze EMA na fale podłużne (a) i poprzeczne (b) do badania charakterystyk kierunkowych głowic ultradźwiękowych

Fig. 5.6. Longitudinal (a) and transverse (b) wave EMA receivers for measuring directivity patterns of ultrasonic probes



## 6. PRZEGLĄD PRAC WŁASNYCH AUTORA

Prace nad elektromagnetyczno-akustyczną metodą wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych podjęte zostały w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej w Gliwicach na początku lat osiemdziesiątych. Wstępna analiza dostępnej literatury na ten temat skłoniła autora niniejszej monografii do zainteresowania się w pierwszej kolejności przetwornikami ze spiralną cewką na fale podłużne. Za podjęciem prac nad takimi właśnie przetwornikami przemawiał przede wszystkim fakt, że działając w sposób bezstykowy przetworniki te wytwarzają pole akustyczne o rozkładzie podobnym do rozkładu pola akustycznego wytwarzanego przez konwencjonalne głowice z przetwornikami piezoelektrycznymi w postaci okrągłej tarczy, powszechnie stosowane w badaniach ultradźwiękowych. Dodatkowo na korzyść przetworników EMA o takiej konfiguracji przemawia fakt, że do badań prowadzonych przy ich użyciu można wykorzystać konwencjonalne defektoskopy ultradźwiękowe - uzupełnione o pewne, stosunkowo proste układy elektroniczne - oraz konwencjonalne metody badań.

Własności tych przetworników badane były przez autora przy użyciu elektromagnesu z wymiennymi nabiegownikami, do których mocowano kilkanaście wymiennych, płaskich, spiralnych cewek o różnych wymiarach (średnica wewnętrzna: 5 - 13 mm, średnica zewnętrzna: 8 - 16 mm) i liczbach zwojów (5 - 40), a wykorzystywane próbki wykonane były przede wszystkim z metali nieferromagnetycznych o różnej konduktywności (aluminium, miedź, mosiądz). Wyniki tych badań, o których wspomniano już w punkcie 3.4.1, przedstawione są szczegółowo w pracy doktorskiej autora [60] oraz w innych publikacjach [57, 58, 59, 72, 144]. W rezultacie prowadzonych prac wykonany został między innymi przetwornik małogabarytowy z magnesem trwałym (średnica 60 mm, wysokość 60 mm), odlanym ze stopu Alnico 400B, przeznaczony do bezstykowego badania metali kolorowych przy użyciu fal podłużnych, który pokazano na rys. 6.1. Przetwornik ten zawiera dwie odrębne cewki: nadawczą i odbiorczą,



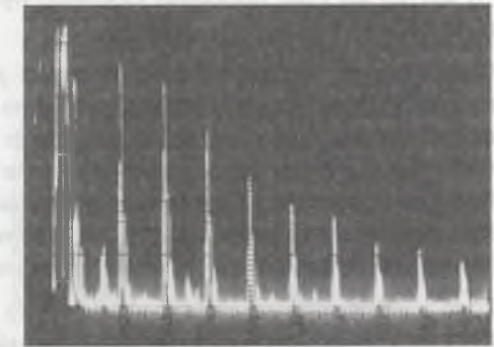
Rys. 6.1. Małogabarytowy przetwornik EMA z magnesem trwałym na fale podłużne

Fig. 6.1. Small-sized EMA transducer with a permanent magnet for longitudinal waves

których liczba zwojów wynosi odpowiednio 8 i 32. Cewki te umieszczono pomiędzy koncentrycznymi nabiegownikami przetwornika w szczelinie o szerokości 2,5 mm. Indukcja stałego pola magnetycznego w tej szczelinie wynosi 0,8 T. W celu zilustrowania niektórych własności przetworników EMA poniżej przedstawiono przykładowe oscylogramy uzyskane przy użyciu tego przetwornika dla częstotliwości fali ultradźwiękowej wynoszącej około 2 MHz.

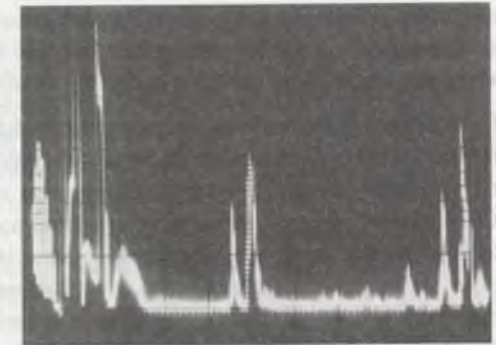
Rys. 6.2 przedstawia oscylogram impulsów uzyskanych podczas badania przy użyciu tego przetwornika próbki aluminiowej bez wad o grubości 25 mm. Porównanie tego oscylogramu z oscylogramem uzyskanym przy użyciu głowicy z ceramicznym przetwornikiem piezoelektrycznym na częstotliwość 2 MHz wykazało, że dla przetwornika EMA amplituda kolejnych echa dna maleje wolniej. Wynika to z bardzo małej skuteczności przetwarzania EMA; podczas odbicia fali ultradźwiękowej od powierzchni metalu, do której jest zbliżony przetwornik EMA, jedynie znikoma część energii tej fali jest pobierana przez przetwornik - inaczej zatem niż ma to miejsce w przypadku przetworników piezoelektrycznych. Współczynnik odbicia fali ultradźwiękowej od obu powierzchni granicznych płaskorównoległej próbki jest praktycznie równy 1 (granica metal - powietrze)

i zmniejszanie się amplitudy kolejnych echa dna wynika praktycznie tylko z tłumienia fal ultradźwiękowych w metalu i z rozbieżności wiązki ultradźwiękowej. Dzięki temu pomiar współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych w ośrodkach metalicznych może być łatwiejszy do przeprowadzenia i dokładniejszy przy użyciu przetworników EMA. Na rys. 6.3 pokazano impulsy odebrane podczas badania próbki aluminiowej o grubości 50 mm, w której wykonano płaskodenny otwór o średnicy 4 mm i głębokości 5 mm. Oba oscylogramy ilustrują możliwości wykorzystania przetworników EMA zarówno w ultradźwiękowej technice pomiarowej (np. do pomiaru grubości, prędkości fal ultradźwiękowych i ich tłumienia), jak i w defektoskopii ultradźwiękowej; odstęp napięciowy sygnału od szumu, który dla pierwszego echa dna (odbieranego z próbki o grubości 25 mm) sięga dla rozpatrywanego przetwornika 30 -



Rys. 6.2. Impulsy odbierane z aluminiowej próbki o grubości 25 mm (wzmocnienie całkowite: 89 dB)

Fig. 6.2. Pulses received from a 25 mm thick aluminium sample (total gain: 89 dB)



Rys. 6.3. Impulsy odebrane przez przetwornik EMA z próbki aluminiowej z płaskodennym otworem o średnicy 4 mm

Fig. 6.3. Pulses received by the EMA transducer from an aluminium sample with a 4 mm diameter flat-bottom hole

40 dB, jest dla wielu zastosowań całkowicie wystarczający, a ponadto przetwornik ten charakteryzuje się wysoką rozdzielczością.

Oscylogramy te obrazują jednocześnie pewne problemy związane z zastosowaniem przetworników EMA. Jednym z nich jest stosunkowo duża, bo wynosząca najczęściej kilkanaście milimetrów, strefa martwa, co wynika przede wszystkim ze znacznego przesterowania wzmacniacza odbiorczego impulsem nadawczym o amplitudzie wynoszącej typowo 1 - 2 kV. Innym niekorzystnym zjawiskiem jest wytwarzanie oprócz pożądanej fali podłużnej również fali poprzecznej - o mniejszej amplitudzie, która w pewnych przypadkach może utrudniać interpretację oscylogramów; o efekcie tym wspomniano w punkcie 3.4.1 niniejszej pracy.

Prace z wykorzystaniem skonstruowanego przez autora przetwornika małowymiarowego na fale podłużne kontynuowane były również po zakończeniu pracy doktorskiej. W szczególności w ramach prac nad nadajnikami impulsów z wysokonapięciowymi zasilaczami impulsowymi wykonana została nasadka na ten przetwornik, w której umieszczono zasadnicze elementy nadajnika impulsów, tj. kondensator ładowany do wysokiego napięcia oraz klucz tyristorowy, za pośrednictwem którego kondensator ten rozładowuje się przez cewkę nadawczą przetwornika [36]. Celem takiego rozwiązania było skrócenie do minimum połączeń nadajnika impulsów z przetwornikiem, aby zmniejszyć wpływ długiego kabla łączącego na pracę nadajnika. Przetwornik ten wykorzystywano także w pracach dotyczących kompensacji zjawiska unoszenia, które omówiono w podrozdziale 4.5. Może on także współpracować z omówionym w dalszej części tego rozdziału grubościomierzem EMA [49].

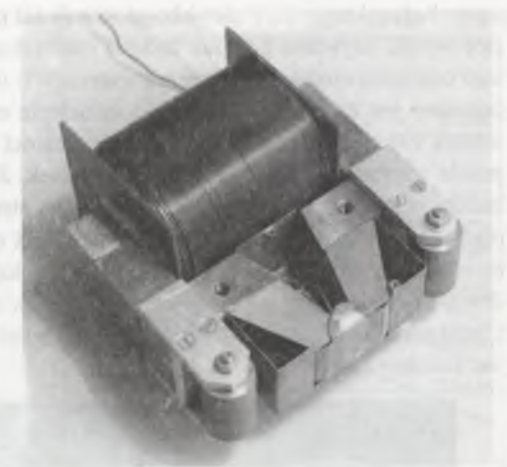
Do badania wyrobów ze stali, która stanowi podstawowy materiał konstrukcyjny w wielu gałęziach przemysłu, stosowane są przede wszystkim przetworniki EMA na fale poprzeczne, o ile badanie realizowane jest w temperaturze znacznie mniejszej od temperatury punktu Curie. Prace nad tego rodzaju przetwornikami podjęte zostały w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej w drugiej połowie lat osiemdziesiątych w oparciu o doświadczenia nabyte przez autora podczas realizacji jego pracy doktorskiej. Głównym przedmiotem zainteresowania autora były przetworniki przeznaczone do badania dużych elementów stalowych, wytwarzające fale ultradźwiękowe o polaryzacji SV i rozchodzące się normalnie do powierzchni badanego materiału. Po szczegółowej analizie dostępnej literatury jako najbardziej odpowiednią do tego celu konfigurację przetwornika EMA przyjęto strukturę pokazaną na rys. 1.3.c, w której wykorzystuje się cewki typu ramka. Budowę jednego z pierwszych skonstruowanych przez autora przetworników tego typu, przeznaczonego do wstępnych badań laboratoryjnych, przedstawia rys. 6.4 [145]. Dzięki zastosowaniu elektromagnesu do wytwarzania stałego, skierowanego normalnie do powierzchni badanego metalu pola magnetycznego, przetwornik ten pozwala na wytworzenie pola o indukcji sięgającej 1,6 - 1,7 T w szczelnie o szerokości 0,5 mm. Podobnie jak w przypadku badań realizowanych w ramach pracy doktorskiej autora, do przetwornika tego wykonano kilkanaście wymiennych cewek o różnej liczbie zwojów i różnych wymiarach.

Podstawowe własności tego przetwornika badano mierzając do jego nabiegunków różne cewki i zmieniając częstotliwość wytwarzanej fali ultradźwiękowej (poprzez wymianę kondensatora w nadajniku impulsów) w zakresie 1 - 4 MHz; pełne wyniki tych badań zawarto w pracy [145]. W szczególności stwierdzono, że częstotliwość pracy przetwornika (w podanym wyżej zakresie) nie ma zauważalnego wpływu na szybkość zmian amplitudy odbieranego sygnału podczas oddalania przetwornika od powierzchni badanego obiektu (efekt unosze-

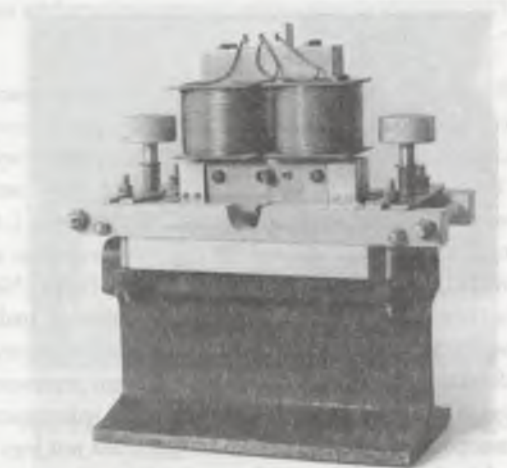
nia). W odróżnieniu od przetworników na fale podłużne, wykorzystywanych do badania metali nieferromagnetycznych, w przetwornikach rozpatrywanego rodzaju nie stwierdzono również znaczącego wpływu odległości przetwornika od powierzchni ferromagnetycznego ośrodka na częstotliwość generowanej w tym ośrodku fali ultradźwiękowej. Potwierdzono także możliwość dobrania na drodze eksperymentalnej optymalnej dla danej częstotliwości pracy liczby zwojów cewki nadawczej i odbiorczej, przy których amplituda odbieranego sygnału jest największa.

Konstrukcja przetwornika została następnie zmodyfikowana, a zamierzonymi obszarami jego zastosowania było wykorzystanie przede wszystkim do badania szyn kolejowych, jak również kęsów hutniczych. Podstawowe zmiany konstrukcyjne dotyczyły przede wszystkim nabiegunków; zostały one wykonane z odizolowanych od siebie cienkich (0,05 mm) blach typu Anizoperm. Nabiegunki wykonane z litego materiału oddziałują na cewki przetwornika w podobny sposób jak badany materiał, co powoduje obniżenie skuteczności przetwornika oraz występowanie ech zakłócających, wynikających z generacji fal ultradźwiękowych nie tylko w badanym materiale, lecz również w samych nabiegunkach. Po przeprowadzeniu badań skuteczności przetwornika przy użyciu kilkunastu cewek o różnych liczbach zwojów ostatecznie w przetworniku tym zastosowano dwie odrębne cewki: nadawczą i odbiorczą, których liczby zwojów dobrano odpowiednio jako 8 i 30. Przyjęto, że przetwornik zasadniczo będzie pracować przy częstotliwości wynoszącej 2 MHz. Bezpośrednio do przetwornika - w pobliżu cewki odbiorczej - zamocowano również wstępny wzmacniacz odbiorczy. Przetwornik ten pokazano na rys. 6.5.

Wstępne badania tego przetwornika, współpracującego z nadajnikiem impulsów o wartości szczytowej sięgającej 2 kV oraz defektoskopem ultradźwiękowym DI-23P, przeprowadzono przy użyciu wzorca W1 [145]. Stwierdzono, że strefa martwa przetwornika wynosi 15 - 20 mm, a maksymalny zasięg badania - przy zachowaniu odstępów napięciowego sygnału od szumu na poziomie 6 dB - jest nie mniejszy niż 2 m. Współ-

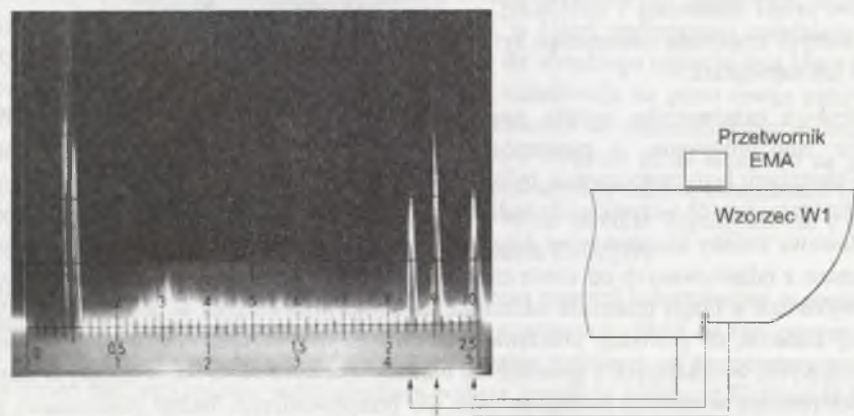


Rys. 6.4. Przetwornik EMA na fale poprzeczne  
Fig. 6.4. EMA transducer for transverse waves



Rys. 6.5. Przetwornik EMA do badania szyn kolejowych  
Fig. 6.5. EMA transducer for testing railway rails

czynnik charakteryzujący zjawisko unoszenia nie przekracza 10 dB/mm. Szczególnie interesujące wyniki uzyskano podczas badania rozdzielczości tego przetwornika, wykorzystując do tego celu odpowiednią szczelinę we wzorcu W1. Oscylogram ilustrujący wyniki tego badania pokazany jest na rys. 6.6. Wyraźne rozdzielenie ech odbitych od odpowiednich powierzchni wzorca świadczy o bardzo dobrej rozdzielczości przetwornika. Rozdzielczość taka wynika przede wszystkim z małej dobroci jego cewek. Zbliżenie cewki nadawczej do powierzchni badanego metalu powoduje powstanie w niej strat, wynikających z indukowania w metalu prądów wirowych, wskutek czego dobroć cewki obniża się aż do 2 - 3. Przy tak niskiej dobroci drgania elektryczne w cewce szybko zanikają i generowane w ośrodku impulsy ultradźwiękowe charakteryzują się krótkim czasem trwania. Rozdzielczość typowych głowic z przetwornikami piezoelektrycznymi, pracujących przy takiej samej częstotliwości (2 MHz), jest znacznie gorsza.

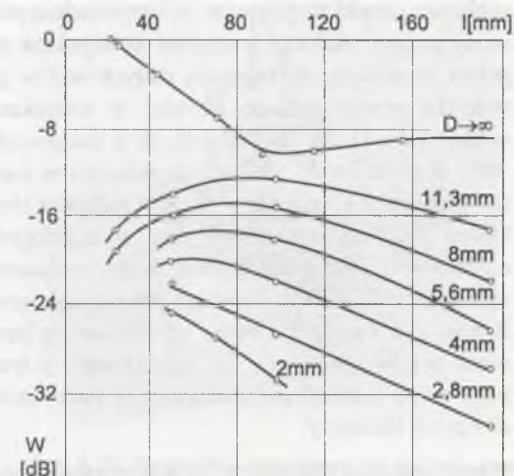


Rys. 6.6. Echa odbierane podczas badania rozdzielczości przetwornika EMA przy użyciu wzorca W1  
Fig. 6.6. Echoes received in the examination of the transducer's resolution with the use of the IIV reference block

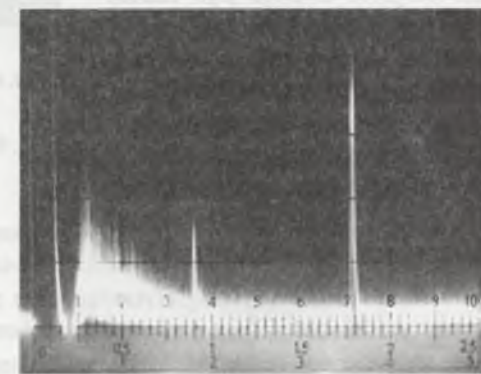
Biorąc pod uwagę zamiar wykorzystania omawianego przetwornika do wykrywania i oceny wielkości wad wewnętrznych w elementach stalowych, przeprowadzono następnie przy jego użyciu badania mające na celu wyznaczenie wykresu OWR (Odległość - Wzmocnienie - Rozmiar), tj. zależności wiążącej poziom odbieranego echa wady w postaci płaskiego, kołowego reflektora od jego średnicy  $D$  i głębokości  $l$ , na jakiej ten reflektor znajduje się w badanym materiale. W badaniach tych wykorzystano szereg wzorców stalowych ze sztucznymi wadami, udostępnionych przez Zakład Badań Nieniszczących Instytutu Metalurgii Żelaza w Gliwicach. Wzorce te mają postać walców o średnicy 50 mm i różnej wysokości, w których wykonano usytuowane osiowo płaskodenne otwory o różnej średnicy. Uzyskane przy użyciu defektoskopu DI-40 wyniki dla badanego przetwornika EMA na fale poprzeczne przedstawia rys. 6.7 [64, 145]. Wykres ten wykazuje jednoznaczne uzależnienie amplitudy sygnału odbieranego przez przetwornik EMA (gdy stała jest jego odległość od powierzchni badanej próbki) od średnicy reflektora i jego odległości od powierzchni metalu, jednak występują na nim istotne odchylenia od teoretycznego wykresu OWR. Na linii reflektora dużego ( $D \rightarrow \infty$ ) występuje nieoczekiwane minimum, które można uzasadnić wpływem efektów elektronicznych, zwłaszcza zaś zmieniającą się w funkcji czasu czułości wzmacniacza odbiorczego po jego

przesterowaniu przez impuls nadawczy. Linie reflektorów małych w polu dalekim powinny opadać o 12 dB przy dwukrotnym zwiększeniu odległości reflektora od powierzchni próbki, podczas gdy na uzyskanym wykresie spadek ten wynosi tylko 6 - 7 dB. Przy ustalonej odległości reflektora od powierzchni próbki dwukrotne zwiększenie jego średnicy powinno spowodować zwiększenie amplitudy odbieranego sygnału o 12 dB (w polu dalekim), natomiast dla uzyskanych wyników jest to wzrost tylko o 7 - 8 dB. Tak więc wiele spraw wiążących się z odpowiedzią akustyczną materiału, zarówno bez wad (linia reflektora dużego), jak i z wadami (linie reflektorów małych) wymaga bardziej precyzyjnego zbadania, jeśli przetworniki EMA mają być stosowane nie tylko do wykrywania wad, lecz również oceny ich wielkości. Rozważenia wymaga też kwestia wpływu efektu unoszenia na przebieg tych wykresów, a także kwestia powtarzalności wyników. Należy w tym miejscu nadmienić, że badania mające na celu wyznaczenie wykresu OWR dla przetworników EMA na fale poprzeczne nie były wcześniej sygnalizowane w znanych autorowi pracach dotyczących metody EMA.

Kolejne badania przetwornika EMA z rys. 6.5 w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono przy użyciu odcinków szyn kolejowych zarówno bez wad, jak i z wadami sztucznymi w postaci otworów przelotowych wykonanych w szyjce szyny. Przetwornik przemieszczano wzdłuż powierzchni tocznej szyny w sposób pokazany na rys. 6.5. Rys. 6.8 przedstawia oscylogram impulsów odbieranych z szyny, w której w szyjce - w połowie wysokości szyny - wykonano otwór przelotowy o średnicy 2 mm. Rysunek ten ilustruje możliwości wykorzystania przetwornika EMA o rozpatrywanej konfiguracji do wykrywania nawet stosunkowo małych wad w szyjce szyny oraz



Rys. 6.7. Wyniki pomiaru wykresu OWR dla przetwornika EMA na fale poprzeczne  
Fig. 6.7. Results of measurement of the DGS (Distance-Gain-Size) diagram for the EMA transverse wave transducer



Rys. 6.8. Impulsy odbierane z szyny, w której w szyjce wykonano otwór przelotowy o średnicy 2 mm  
Fig. 6.8. Pulses received from a railway rail containing a 2 mm diameter through hole in its neck

w obszarze stopki znajdującym się bezpośrednio pod szyjką. Widoczny na tym rysunku zwiększony poziom zakłóceń (szumów) za impulsem nadawczym w istotnym stopniu ogranicza jednak możliwości wykrywania małych wad w główce szyny. Badania omawianego przetwornika przeprowadzono również w warunkach przemysłowych w Hucie Kościuszko w Chorzowie [145]. Stwierdzono, że w warunkach takich czułość przetwornika spada o 20-40% w stosunku do czułości uzyskiwanej w warunkach laboratoryjnych. Zwiększenie poziomu szumów i zakłóceń w hucie wynikało z obecności różnych przemysłowych źródeł zakłóceń elektromagnetycznych oraz występujących na powierzchni szyny zanieczyszczeń o własnościach ferromagnetycznych (np. produktów korozji). Oczyszczenie powierzchni szyny przy użyciu papieru ściernego powodowało zmniejszenie poziomu szumów o około 50%. Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki należy stwierdzić, że skonstruowany przetwornik może być wykorzystany do badania szyn jedynie w bardzo ograniczonym zakresie, co potwierdza wnioski przedstawione w podrozdziale 5.3 i wysnute na podstawie studiów dostępnej literatury.

Przeprowadzono również próby wykorzystania omawianego przetwornika do badania kęsów hutniczych w temperaturze pokojowej. Stwierdzono możliwość łatwego wykrywania jam usadowych w kęsach o przekroju 120 x 120 mm nawet wtedy, gdy powierzchnia kęsa nie była w żaden sposób czyszczona przed badaniem.

W celu zmniejszenia wymiarów przetwornika został on także wykonany w wersji z magnesem trwałym, odlanym ze stopu Alnico 400B [145]. Przetwornik ten, pokazany na rys. 6.9, charakteryzuje się podobnymi własnościami jak omówiony wyżej przetwornik z elektromagnesem. Ze względu na zastosowanie magnesu trwałego jego czułość jest jednak mniejsza i przy zachowaniu odstępów napięciowego sygnału od szumu na poziomie 6 dB maksymalny zasięg badania wynosi około 1 m.

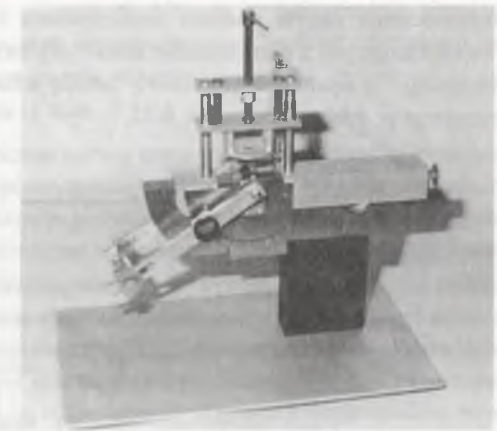


Rys. 6.9. Przetwornik EMA na fale poprzeczne z magnesem trwałym

Fig. 6.9. EMA transducer for transverse waves with a permanent magnet

Radykalne zmniejszenie wymiarów konstruowanych przez autora przetworników EMA stało się możliwe dopiero po uzyskaniu dostępu do nowoczesnych materiałów magnetycznych, zawierających domieszki pierwiastków ziem rzadkich. Wykorzystując do wytworzenia stałego pola magnetycznego dwie płytki magnesu neodymowego (Nd-Fe-B) o wymiarach 25 x 10 x 3 mm wykonano przetwornik normalny na fale poprzeczne, którego obwód magnetyczny (magnesy i wykonane ze sklejonych cienkich blaszek nabiegunniki) charakteryzuje się wymiarami 32 x 22 x 10 mm [70]. Jeżeli szerokość szczeliny pomiędzy tym przetwornikiem i powierzchnią stalowej próbki nie przekracza 0,3 mm, to wytwarza on w próbce normalne pole magnetyczne o indukcji przekraczającej 1 T. Dla pierwszego echa dna odbieranego z próbki stalowej o grubości 25 mm pozwala to na uzyskanie odstępów napięciowego sygnału od szumu na poziomie 30 dB.

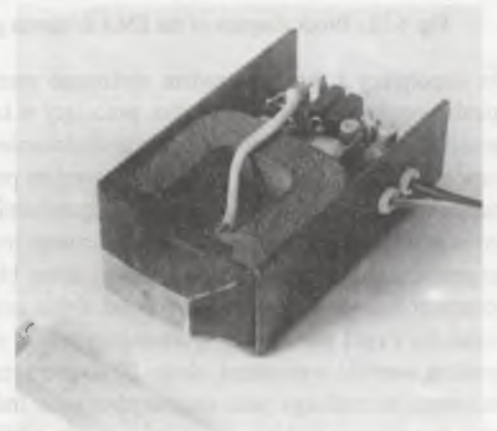
Oprócz przetworników nadawczo-odbiorczych EMA skonstruowane zostały również pomiarowe przetworniki odbiorcze, służące do badania charakterystyk kierunkowych głowic nadawczych fal ultradźwiękowych. Jeszcze w ramach pracy doktorskiej autora [60] oraz prowadzonej równolegle pracy [144] wykonano stanowisko do pomiaru tych charakterystyk, pokazane na rys. 6.10. Badana głowica umieszczana jest w środku krzywizny walcowej części wzorca wykonanego ze stali lub aluminium. Wzdłuż poboczniczy walca przemieszczany jest odbiorczy przetwornik pomiarowy, a jego położenie odczytywane jest na odpowiedniej podziałce kątovej. Na rys. 6.11 przedstawiono widok przetwornika odbiorczego na fale podłużne [60, 144], w którym cewka odbiorcza została nawinięta pomiędzy nabiegunnikami, tj. w obszarze składowej stycznej stałego pola magnetycznego. Poprzez osłonięcie cewki odbiorczej miedzianym ekranem z wykonanym w nim otworkiem czynna strefa odbioru została ograniczona do obszaru o powierzchni około 2 mm<sup>2</sup>. Na bazie konstrukcji pokazanej na rys. 6.11 wykonany został także przetwornik odbiorczy na fale poprzeczne, w którym cewka odbiorcza umieszczona jest na powierzchni czołowej jednego z nabiegunników [61, 145]. W charakterze uzupełnienia omówionego wyżej zestawu pomiarowego wykonany został również układ cyfrowego pomiaru amplitudy impulsów odbieranych przez przetwornik EMA [176].



Rys. 6.10. Stanowisko pomiarowe do badania charakterystyk kierunkowych głowic ultradźwiękowych

Fig. 6.10. Stand for the measurement of directivity patterns of ultrasonic probes

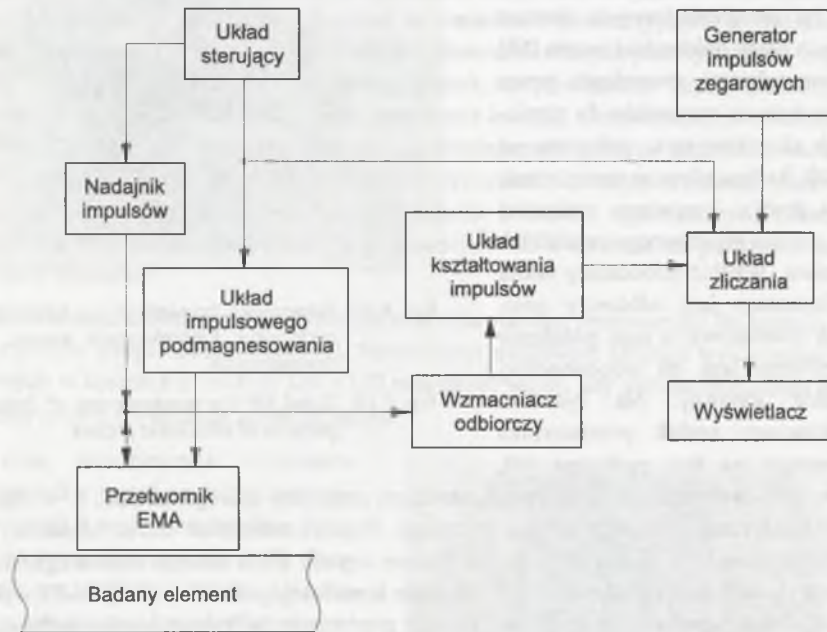
Równoległe z pracami nad konstrukcją nowych przetworników EMA, badaniem ich własności i próbami wykorzystania do konkretnych zadań defektoskopii ultradźwiękowej i ultradźwiękowej techniki pomiarowej prowadzono prace związane z konstrukcją układów elektronicznych współpracujących z przetwornikami - zwłaszcza układów nadajników impulsów. Zagadnieniom tym, które szczegółowo omówiono w pracach [36, 68, 144, 145, 206], poświęcona jest znaczna część rozdziału 4 niniejszej monografii.



Rys. 6.11. Odbiorczy przetwornik EMA do badania charakterystyk kierunkowych głowic ultradźwiękowych na fale podłużne

Fig. 6.11. EMA receiver for the measurement of directivity patterns of ultrasonic probes for longitudinal waves

Doświadczenia nabyte podczas konstruowania i badania różnych przetworników EMA i współpracujących z nimi układów zostały wykorzystane do budowy grubościomierza EMA pracującego w oparciu o impulsową metodę echa [49, 71]. Schemat blokowy tego grubościomierza przedstawiono na rys. 6.12.



Rys. 6.12. Schemat blokowy grubościomierza EMA

Fig. 6.12. Block diagram of the EMA thickness gauge

Do współpracy z tym przyrządem wykonano przetwornik EMA na fale poprzeczne z jedną spiralną cewką nadawczo-odbiorczą, pracujący w konfiguracji pokazanej na rys. 1.3.b. W celu zmniejszenia mocy pobieranej przez grubościomierz przetwornik EMA pracuje w przyjętym rozwiązaniu z impulsowym podmagnesowaniem powierzchni badanego wyrobu, co osiąga się rozładując w sposób aperiodyczny odpowiedni kondensator przez uzwojenie elektromagnesu przetwornika. Taki sposób dynamicznego magnesowania wymagał wykonania obwodu magnetycznego przetwornika ze zwiniętej taśmy blachy Anizoperm o grubości 0,1 mm, której poszczególne warstwy odizolowano od siebie przy użyciu żywicy epoksydowej. Nadajnik impulsów i cykl pomiarowy uruchamiany jest w chwili, gdy prąd magnesujący osiąga maksymalną wartość wynoszącą około 20 A, która zapewnia uzyskanie w badanym elemencie stalowym normalnego pola magnetycznego o indukcji sięgającej 1 T. Przetwornik pracuje przy stosunkowo niskiej, wynoszącej około 1 MHz, częstotliwości wytwarzanej fali ultradźwiękowej, którą dobrano w sposób eksperymentalny tak, aby amplituda odbieranych impulsów była jak największa.

Grubościomierz realizuje pomiar wykorzystując impuls nadawczy i pierwszy lub piąty impuls echa lub też - w celu zmniejszenia ograniczeń wynikających ze strefy martwej, zwłaszcza podczas pomiaru małych grubości - pierwszy i drugi lub szósty impuls echa. Umożliwia on

miar grubości wyrobów stalowych w zakresie 5 - 100 mm z dokładnością sięgającą  $\pm 0,1$  mm. Do pomiarów grubości wyrobów nieferromagnetycznych bardziej odpowiedni jest przetwornik EMA na fale podłużne, np. przetwornik pokazany na rys. 6.1, jednak wtedy minimalna mierzona grubość wzrasta do około 10 mm.

Na początku lat dziewięćdziesiątych rozpoczęte zostały prace nad wykorzystaniem przetworników EMA do badań prowadzonych w podwyższonej temperaturze [146]. Ze względu na szczupłe możliwości materiałowe i wykonawcze pierwsze próby ograniczyły się do temperatur sięgających 200 - 300°C, choć, jak stwierdzono w punktach 2.2.2 i 5.2, najbardziej interesujące własności przetworniki EMA przejawiają wtedy, gdy wykorzystuje się je do badania wyrobów ferromagnetycznych o temperaturze zbliżonej do temperatury punktu Curie materiału. Prace te zostały jednak przerwane na etapie wstępnym, co z jednej strony wynikało z braku źródeł ich finansowania, a z drugiej strony uzasadnione było tendencjami obserwowanymi w literaturze. W publikowanych od końca lat osiemdziesiątych pracach coraz rzadziej mówi się o wykorzystaniu przetworników EMA do wytwarzania fal ultradźwiękowych - zwłaszcza w znacznie podwyższonej temperaturze - proponując w zamian wykorzystanie do tego celu znacznie efektywniejszych źródeł fal ultradźwiękowych w postaci laserów, współpracujących z elektromagnetyczno-akustycznymi przetwornikami odbiorczymi. Zagadnienia te, zasygnalizowane już w podrozdziale 1.2, szerzej przedstawiono w następnym rozdziale.

## 7. PERSPEKTYWY ROZWOJU PRZETWORNIKÓW EMA

### 7.1. Wykorzystanie laserów do wytwarzania fal ultradźwiękowych

Na przeszkodzie w szerszym upowszechnieniu przetworników EMA w przemyśle stoi przede wszystkim ich bardzo mała skuteczność; amplituda sygnału odbieranego przez nadawczo-odbiorczy przetwornik EMA jest co najmniej o 40 - 50 dB mniejsza niż w przypadku pracującej w podobnych warunkach głowicy z przetwornikiem piezoelektrycznym. Wynikająca z tego konieczność pobudzania cewki nadawczej impulsami o wartości szczytowej sięgającej kilowoltów oraz silne przenikanie tych impulsów do cewki odbiorczej powodują z kolei, że strefa martwa tych przetworników jest stosunkowo duża - przez co najmniej kilka mikrosekund nie jest możliwy odbiór żadnych ech, co znacznie ogranicza możliwości zastosowania tych przetworników. Dlatego też od wielu lat prowadzone są również badania nad innymi metodami bezstykowego wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych, których krótki przegląd przedstawiono już w rozdziale 1 tego opracowania.

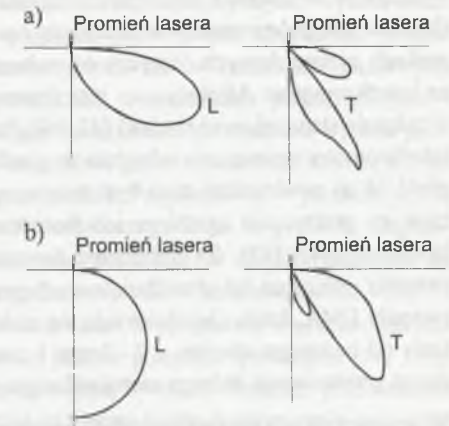
Najbardziej efektywnym i perspektywicznym obecnie sposobem bezstykowego wytwarzania fal ultradźwiękowych jest wykorzystanie do tego celu lasera. Wiązka światła laserowego padając na powierzchnię badanego materiału powoduje generację fal ultradźwiękowych wskutek naprężeń wynikających z lokalnego, gwałtownego wzrostu temperatury tej powierzchni (zakres termoelastyczny) lub z odparowania cienkiej powierzchniowej warstwy materiału (zakres ablacji lub plazmy) (aby zmniejszyć powstające przy tym uszkodzenia powierzchni, można wykorzystać np. odparowanie warstwy oleju, pokrywającego powierzchnię obiektu) [4, 51, 52, 94, 96, 134, 154, 173]. W pierwszym przypadku wynikające z dużego gradientu temperatury naprężenia są styczne do powierzchni materiału i radialnie skierowane (gdy wiązka światła laserowego ma kołowy przekrój). W ich wyniku w ośrodku generowane są przede wszystkim skośnie rozchodzące się względem powierzchni fale poprzeczne, a pod stosunkowo dużym kątem w stosunku do normalnej rozchodzą się również fale podłużne (wytwarzane są także fale powierzchniowe). Podczas gwałtownego odparowania powierzchni materiału (zakres ablacji) na powierzchnię tę działa siła normalna, w wyniku której w ośrodku generowana jest przede wszystkim fala podłużna, rozchodząca się prostopadle do jego powierzchni granicznej; pod pewnym kątem do normalnej rozchodzi się także fala poprzeczna, której obecność wynika zarówno z odpowiednich charakterystyk promieniowania źródła w postaci normalnej siły, jak i z naprężeń stycznych, występujących również w tym zakresie z powodu dużego gradientu temperatury. Na rys. 7.1 przedstawiono wyznaczone teoretycznie przykładowe charakterystyki kierunkowe dla fal ultradźwiękowych generowanych w aluminium za pośrednictwem obu mechanizmów; w zakresie termoelastycznym kierunek maksy-

malnego promieniowania tworzy z normalną kąt wynoszący około 30°, a dla fal podłużnych kąt ten jest równy około 55°; w zakresie ablacji fale poprzeczne rozchodzą się pod kątem równym w przybliżeniu 45° [134]. Szczegółowe omówienie wytwarzania fal ultradźwiękowych przy użyciu lasera znaleźć można np. w pracach [94, 154, 173] i w wielu innych, które ukazały się na ten temat w ostatnich latach.

Do generacji fal ultradźwiękowych najczęściej stosowane są lasery impulsowe o modulowanej dobroci typu Nd:YAG (lasery, w których substancją roboczą jest szkło neodymowe domieszkowane granatem itrowoalumiiniowym) [4, 42, 51, 52, 157] lub lasery rubinowe [91, 96, 97]. Lasery te wytwarzają impulsy światła o czasie trwania wynoszącym od kilkunastu do kilkudziesięciu nanosekund i energii nie przekraczającej na ogół 1 J, co odpowiada jednak średniej mocy promieniowania w czasie trwania impulsu na poziomie dziesiątek megawatów.

Wykorzystanie promieniowania laserowego jako źródła fal ultradźwiękowych charakteryzuje się szeregiem zalet w stosunku do przetworników nadawczych EMA [94, 96, 173]. Przede wszystkim, laser może być umieszczony w praktycznie dowolnej odległości od obiektu, w którym mają być wytworzone fale ultradźwiękowe. Lasery nie stawiają praktycznie żadnych wymagań odnośnie do materiału, z którego wykonany jest badany obiekt (pod warunkiem że jest on nieprzezroczysty dla światła), oraz stanu jego powierzchni. Przy użyciu laserów można generować fale ultradźwiękowe o znacznie większej amplitudzie niż w przypadku przetworników EMA; jeżeli generacja zachodzi na zasadzie ablacji, to amplituda fali ultradźwiękowej jest zbliżona do osiąganey przy użyciu przetworników piezoelektrycznych [154]. Dzięki małemu czasowi narastania i trwania impulsów ultradźwiękowych generowanych przez lasery impulsy te charakteryzują się bardzo szerokim, sięgającym co najmniej dziesiątek MHz widmem. Widmo to różni się zatem zasadniczo od widma częstotliwościowego impulsów generowanych przez przetworniki EMA, które jest stosunkowo wąskie i skupione wokół wynoszącej kilkaset kHz lub kilka MHz częstotliwości podstawowej.

Do bezstykowego odbioru fal ultradźwiękowych generowanych przez lasery można wykorzystać interferometrię optyczną, przetworniki pojemnościowe i przetworniki EMA. Szczegółową analizę wad i zalet tych trzech metod odbioru przeprowadzono np. w pracach [42, 154]; o zagadnieniach tych wspomniano już również w rozdziale 1 tej monografii. Pod względem pasma przenoszonych częstotliwości i możliwości umieszczenia układu odbiorczego w znacznej odległości od badanego obiektu najbardziej odpowiednie do zastosowania ze źródłami laserowymi są interferometrię; jednak ze względu na ich bardzo wysoki koszt i duże



Rys. 7.1. Charakterystyki kierunkowe źródła laserowego: a) zakres termoelastyczny, b) zakres ablacji (L - fale podłużne, T - fale poprzeczne) [134]

Fig. 7.1. Directivity patterns of a laser source: a) thermoelastic regime, b) ablation regime (L - longitudinal waves, T - transverse waves) [134]

wymagania w zakresie zdolności odbijania światła przez powierzchnię badanego obiektu (konieczność polerowania) nie nadają się one do rutynowych badań ultradźwiękowych w warunkach przemysłowych (dotyczy to zwłaszcza optycznych układów odbiorczych opartych na interferometrze Michelsona; interferometr Fabry-Perota stawia mniejsze wymagania w zakresie stanu tej powierzchni) [42, 96]. Przetworniki pojemnościowe stawiają podobne jak interferometry wymagania odnośnie do gładkości powierzchni badanego obiektu, a ich odległość od tej powierzchni musi być utrzymywana na poziomie kilku lub kilkunastu mikrometrów, co praktycznie ogranicza ich zastosowanie do precyzyjnych pomiarów w warunkach laboratoryjnych [42]. Za optymalne do zastosowania w warunkach przemysłowych przetworniki odbiorcze fal ultradźwiękowych generowanych przez lasery uważa się zatem przetworniki EMA, które charakteryzują się niskim kosztem, prostą budową, możliwością oddalenia od badanego obiektu o 2 - 3 mm i pracą przy zanieczyszczonej powierzchni oraz pasmem przenoszenia, którego szerokość może sięgać kilku MHz [42, 95, 96, 98, 99].

W przetwornikach odbiorczych EMA przeznaczonych do współpracy ze źródłami laserowymi do wytworzenia stałego pola magnetycznego stosuje się przede wszystkim magnesy z domieszkami pierwiastków ziem rzadkich [42, 51, 52, 91, 96, 97, 157], dzięki czemu przetworniki te cechują się zwartą budową i małymi wymiarami. Zastosowanie światłowodów pozwala na zintegrowanie źródła laserowego z przetwornikiem EMA. W opisaney w pracy [52] konstrukcji tego typu światło lasera doprowadzane jest do powierzchni badanego obiektu za pośrednictwem włókien optycznych, przechodzących przez otwór wykonany w magnesie przetwornika. Energia doprowadzona w jednym impulsie do końca światłowodu wynosi w tej konstrukcji 6 - 7 mJ, a gęstość powierzchniowa mocy doprowadzanej do powierzchni materiału sięga 160 GW/m<sup>2</sup>. Zapewnia to generację fal ultradźwiękowych w zakresie termoelastycznym, a amplituda sygnału odbieranego z próbek aluminiowych i stalowych o grubości do 25 mm osiąga dziesiątki miliwoltów.

Istotnym problemem związanym z zastosowaniem lasera jako źródła fal ultradźwiękowych i przetwornika odbiorczego EMA jest znaczne niedopasowanie charakterystyk widmowych obu rodzajów przetworników. Jak wspomniano wcześniej, lasery wytwarzają bardzo krótkie impulsy ultradźwiękowe o widmie, którego szerokość sięga dziesiątek MHz, podczas gdy przetworniki EMA są zasadniczo przetwornikami wąskopasmowymi, zwłaszcza gdy są one dostrajane do częstotliwości odbieranej fali ultradźwiękowej przy użyciu odpowiedniego kondensatora. Selektywny charakter przetworników EMA jest szczególnie wyraźny w przypadku przetworników kątowych, dla których kąt, pod jakim rozchodzi się w stosunku do normalnej do powierzchni ośrodka fala ultradźwiękowa odbierana z maksymalną czułością, bezpośrednio zależy od częstotliwości tej fali. Zmniejszenie tego niedopasowania można uzyskać rozszerzając pasmo przenoszenia przetwornika EMA, co z reguły wiąże się jednak z obniżeniem jego czułości. Inne podejście do tego problemu zaproponowano i zweryfikowano praktycznie w pracy [157]. Przedstawione tam rozwiązanie polega na dopasowaniu widmowym źródła laserowego do przetwornika odbiorczego EMA poprzez naświetlanie powierzchni badanego materiału nie pojedynczym impulsem, lecz ciągiem kilku impulsów (maksymalnie dziesięciu), powtarzanych z częstotliwością równą częstotliwości pracy stosowanego przetwornika odbiorczego EMA i generowanych przez specjalnie skonstruowany wielokomorowy (wielonękowy) laser neodymowy (Nd:YAG); impulsy te doprowadzane są w to samo miejsce na powierzchni materiału za pośrednictwem odpowiedniego układu zwierciadeł.

Mimo wielu zalet laserów, jako efektywnych źródeł fal ultradźwiękowych, ich wysoki koszt powoduje jednak, że jak dotychczas są one wykorzystywane w tym charakterze przede wszystkim w specjalizowanych pomiarach laboratoryjnych lub w badaniach naukowych [154]. Prowadzone są również próby wykorzystania ich w warunkach przemysłowych - przede wszystkim do badania gorących wyrobów, gdy uszkodzenia powierzchni wyrobu podczas pracy w zakresie ablacji nie mają większego znaczenia, gdyż badanie realizowane jest na jednym z początkowych etapów przeróbki danego materiału. Przykładowo, w pracach [4, 10, 11] opisano wyniki prób użycia lasera i przetwornika odbiorczego EMA do pomiaru temperatury wewnętrznej (na zasadzie wykorzystania zależności prędkości fal ultradźwiękowych od temperatury) i grubości materiału na linii ciągłego odlewania stali w temperaturze do 1300°C. W innym zweryfikowanym praktycznie zastosowaniu laser w połączeniu z przetwornikiem odbiorczym EMA wykorzystywany jest do badania jakości połączeń spawanych [34, 110]. Spaw jest badany tuż za automatyczną głowicą spawającą i wyniki badania, przetworzone w odpowiednim systemie komputerowym, pozwalają na bieżącą kontrolę parametrów spawania. Prowadzone są także próby wykorzystania przetworników laserowo-elektromagnetycznych w tomografii ultradźwiękowej, w której na podstawie szeregu przebiegów uzyskanych podczas przemieszczania przetwornika po powierzchni badanego obiektu (zobrazowanie typu A) dokonuje się rekonstrukcji obrazu, przedstawiającego wybrany cienki przekrój tego obiektu [91, 97].

Rozwój techniki konstrukcji laserów i ciągły spadek kosztów ich wytwarzania stwarza nadzieję na bliskie zastosowanie techniczne przedstawionych wyżej metod badania. W dalszej perspektywie przetworniki złożone z lasera, jako źródła fal ultradźwiękowych, i przetwornika odbiorczego EMA mogą stanowić optymalne narzędzie podczas nieniszczących badań ultradźwiękowych realizowanych w przestrzeni kosmicznej.

długim czasie trwania - charakteryzują się małą rozdzielczością. Przetworniki EMA z uzwojeniem typu meander znalazły natomiast wiele zastosowań w badaniach prowadzonych przy użyciu fal powierzchniowych i płytowych.

Podstawową wadą przetworników EMA jest ich mała sprawność energetyczna. W celu uzyskania wystarczająco dużego odstepu napięciowego sygnału od szumu przetworniki nadawcze muszą być zasilane impulsami o znacznie większej amplitudzie niż wymagana przez przetworniki piezoelektryczne. Znaczną poprawę skuteczności przetwarzania można by uzyskać poprzez zastosowanie magnesów nadprzewodzących do wytworzenia w badanym metalu silnego pola magnetycznego. Rozwiązanie takie nie eliminuje jednak kolejnej wady przetworników EMA, jaką jest stosunkowo duża, sięgająca często kilkunastu czy nawet kilkudziesięciu milimetrów, strefa martwa.

Dlatego też obecnie znacznie większe oczekiwania wiąże się z zastosowaniem laserów jako efektywnych źródeł fal ultradźwiękowych, współpracujących z elektromagnetycznymi przetwornikami odbiorczymi. Duże możliwości w zakresie poprawy odstepu napięciowego sygnału od szumu oferuje także coraz szersze wykorzystanie w ultradźwiękowych badaniach nieniszczących cyfrowych metod przetwarzania sygnału.

Biorąc pod uwagę własności różnych rozwiązań przetworników EMA i przykłady zweryfikowanych praktycznie do tej pory zastosowań, których przeglądowi poświęcona jest duża część tej pracy, można oczekiwać, że poza zastosowaniami laboratoryjnymi, w których przetworniki odbiorcze EMA umożliwiają łatwe przeprowadzenie bezstykowych pomiarów o dobrej powtarzalności, w najbliższych latach wykorzystanie przetworników EMA ograniczy się jednak przede wszystkim do jednostkowych przypadków badania różnych obiektów (np. rurociągi, zbiorniki, szyny kolejowe itp.) w warunkach znacznie utrudniających użycie ciekłego ośrodka sprzęgającego lub obiektów, których powierzchnia jest zanieczyszczona lub skorodowana w stopniu uniemożliwiającym zastosowanie przetworników piezoelektrycznych bez jej uprzedniego oczyszczenia. Nie należy spodziewać się, że w najbliższej przyszłości przetworniki EMA zastąpią przetworniki piezoelektryczne w tych dziedzinach ultradźwiękowych badań nieniszczących, w których te ostatnie są z powodzeniem stosowane od lat.

## 8.2. Zakończenie

Praca poświęcona jest przetwornikom przeznaczonym do bezstykowego wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych metodą elektromagnetyczno-akustyczną (EMA). Celem autora było systematyczne przedstawienie na podstawie zebranej literatury najważniejszych wyników prac nad przetwornikami EMA, prowadzonych na świecie na przestrzeni blisko 30 lat, wyciągnięcie wniosków z nagromadzonej wiedzy i omówienie na tym tle najważniejszych wyników prowadzonych przez kilkanaście lat własnych badań i prac konstrukcyjnych.

Praca podzielona jest na kilka zasadniczych części. W części teoretycznej, która obejmuje rozdziały 2 i 3, przedstawiono podstawy teoretyczne wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych metodą EMA, poczynając od modelu matematycznego, w którym zakłada się, że źródłem fali ultradźwiękowej jest płaska fala elektromagnetyczna. Następnie szczegółowo omówiono modele matematyczne realnych przetworników, pracujących w konfiguracjach,

## 8. PODSUMOWANIE

### 8.1. Uwagi końcowe

Wyniki prowadzonych na świecie od około trzydziestu lat prac nad przetwornikami elektromagnetyczno-akustycznymi wskazują, że przetworniki te mogą stanowić cenne uzupełnienie głowic piezoelektrycznych. Obok źródeł laserowych i pracujących ze szczeliną powietrzną głowic z przetwornikami piezoelektrycznymi są one uważane obecnie za mające największe znaczenie praktyczne bezstykowe przetworniki ultradźwiękowe [158]. Z bezstykowego sposobu wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych wynikają możliwości zastosowania przetworników EMA do badania różnych wyrobów metalowych w szerokim zakresie temperatur - od temperatur znacznie poniżej 0°C aż po temperatury sięgające 1000°C i więcej, badania wyrobów o skorodowanej lub w inny sposób zanieczyszczonej powierzchni lub też badań realizowanych z dużą prędkością przesuwu głowicy względem powierzchni badanego obiektu.

Jako jedna z największych zalet przetworników EMA powszechnie wymieniana jest łatwość, z jaką można przy ich użyciu generować i odbierać fale ultradźwiękowe różnych rodzajów i o różnej polaryzacji (fale poprzeczne). Przegląd dotychczasowych zastosowań przetworników EMA wskazuje jednak, że tylko kilka spośród całej gamy możliwych konfiguracji przetworników na fale podłużne i poprzeczne ma znaczenie praktyczne. Przetworniki ze spiralną cewką na fale podłużne znajdują zastosowanie do badania wyrobów wykonanych z metali nieferromagnetycznych o dużej konduktywności - głównie aluminium; są one również stosowane do badania wyrobów ze stali węglowych w temperaturze zbliżonej do temperatury punktu Curie i wyższej. Przetworniki normalne na fale poprzeczne z uzwojeniem w postaci spirali lub ramki wykorzystywane są przede wszystkim do pomiarów grubości oraz innych badań wyrobów wykonanych z metali ferromagnetycznych w temperaturze poniżej temperatury punktu Curie. Spośród przetworników kątowych największe znaczenie praktyczne mają przetworniki typu PPM na fale poprzeczne o polaryzacji SH - głównie dzięki unikalnym własnościom fal o takiej polaryzacji oraz skutecznej generacji w szerokim zakresie kątów względem normalnej do powierzchni ośrodka. Mniejsze znaczenie mają natomiast przetworniki kątowe z uzwojeniem typu meander, pracujące w stycznym lub normalnym polu magnetycznym o równomiernym rozkładzie; mimo iż pozwalają one na elektroniczne sterowanie kątem wejścia fali ultradźwiękowej do ośrodka, to jednak zakres kątów, w jakim generacja jest wystarczająco skuteczna - zwłaszcza w odniesieniu do fal poprzecznych SV - nie odpowiada na ogół typowym potrzebom defektoskopii ultradźwiękowej. Poza tym przetworniki takie - pobudzane impulsami o stosunkowo



które podano we wprowadzeniu do pracy. Krytyczna analiza tych modeli uzupełniona jest przeglądem opublikowanych prac, których celem była weryfikacja doświadczalna wynikających z modeli matematycznych prawidłowości. W tej części pracy przedstawiono również opracowany przez autora model matematyczny przetwornika nadawczego na fale podłużne (podrozdział 3.3). Dzięki przyjętym uproszczeniom - w szczególności polegającym na założeniu, że badany metal jest idealnym przewodnikiem, wyprowadzono wzór opisujący charakterystykę kierunkową przetwornika w polu dalekim. Autor przeprowadził również weryfikację doświadczalną tej zależności. W zakresie badania podstawowych własności przetworników szczególną uwagę zwrócił autor na zjawisko unoszenia. W punkcie 3.4.4 omówione są wyniki doświadczeń autora, których celem była weryfikacja podawanych w literaturze zależności opisujących to zjawisko. W końcowej części rozdziału 3 (punkt 3.5.5) zwrócono uwagę na całkowicie pomijane w literaturze poważne ograniczenie przetworników EMA przeznaczonych do wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych rozchodzących się ukośnie do powierzchni badanego materiału. Ograniczenie to, polegające na bardzo małej rozdzielczości takich przetworników, w naturalny sposób wynika z zasady ich działania, tj. wykorzystania interferencji fal wytwarzanych przez poszczególne sekcje przetwornika.

Kolejna część pracy poświęcona jest zagadnieniom dotyczącym konstrukcji przetworników EMA oraz współpracujących z nimi układów elektronicznych i w znacznej mierze powstała ona na podstawie doświadczeń własnych autora. Szczególną uwagę zwrócił autor na nadajniki impulsów, które - obok zastosowania silnych magnesów lub elektromagnesów - odgrywają kluczową rolę w zapewnieniu wystarczającej skuteczności przetwarzania energii elektrycznej na ultradźwiękową w metodzie EMA. W podrozdziale 4.3 przedstawiona jest zwyfikowana praktycznie - oryginalna koncepcja nadajnika z przetwornicą impulsową. Oryginalny charakter mają też przedstawione w podrozdziale 4.5 rozważania dotyczące sposobów kompensacji zjawiska unoszenia, które to zjawisko stanowi istotne ograniczenie metody EMA. W rozważaniach tych wykorzystano wyniki prac autora nad modelem elektrycznym cewki nadawczej przetwornika, opisane w podrozdziale 4.1.

Rozdział 5 zawiera przegląd dotychczasowych, znanych z literatury, zastosowań metody EMA. Przedstawiono w nich te rozwiązania praktyczne, w których przetworniki EMA już są lub mogą być konkurencyjne w stosunku do głowic z przetwornikami piezoelektrycznymi. Dla każdego konkretnego zastosowania podano zalety wynikające z zastosowania przetworników EMA, ich ograniczenia, a także uzyskiwane wyniki.

Ostatnią zasadniczą część pracy stanowi rozdział 6, który w całości poświęcony jest przeglądowi konstrukcji opracowanych przez autora i przedstawieniu uzyskiwanych przy ich użyciu wyników. Zrealizowane przez autora przetworniki nadawczo-odbiorcze na fale podłużne i poprzeczne, rozchodzące się prostopadle do powierzchni badanego materiału, cechują się odstępem napięciowym sygnału od szumu sięgającym 30 - 40 dB, który jest wystarczający do przeprowadzenia wielu pomiarów i badań ultradźwiękowych, a najmniejsze wykrywane przy ich użyciu wady miały średnicę sięgającą 2 mm. Ponadto przetworniki te cechują się bardzo dobrą rozdzielczością, znacznie lepszą niż dla konwencjonalnych głowic ultradźwiękowych o zbliżonej częstotliwości pracy (rys. 6.6). Jeden z tych przetworników wykorzystano w grubościomierzu EMA, którego parametry nie ustępują większości tego typu konstrukcji znanych z literatury.

Na koniec autor wyraża nadzieję, że zebrane przez niego w tej monografii najważniejsze wyniki prac prowadzonych na świecie nad przetwornikami EMA, wnioski wynikające z ich analizy oraz z badań własnych, zaproponowane rozwiązania układów elektronicznych współpracujących z przetwornikami EMA, a także konstrukcje własne przetworników i uzyskane przy ich użyciu rezultaty stanowią pewien wkład w rozwój nowych metod wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych dla celów badań nieniszczących i ultradźwiękowej techniki pomiarowej.

## LITERATURA

1. Alers G.A., Burns L.R.: *EMAT Designs for Special Applications*. Materials Evaluation, Vol. 45, Nr 10, October 1987, s. 1184 - 1189, 1194.
2. Alers G.A., Hübschen G., Maxfield B.W., Repplinger W., Salzburger J., Thompson R.B., Wilbrand A.: *Electromagnetic Acoustic Transducers*. Nondestructive Testing Handbook, Vol. 7, American Society for Nondestructive Testing, 1991, s. 326 - 340.
3. Alers G.A., MacLauchlan D.T.: *High Frequency, Angle Beam EMATs for Weld Inspection*. Review of Progress in Quantitative Non-Destructive Evaluation, Vol. 2A, 1983, s. 271 - 281.
4. Alers G.A., Wadley H.N.G.: *A Pulsed Laser/Electromagnetic Acoustic Transducer Approach to Ultrasonic Sensor Needs for Steel Processing*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 6A, 1987, s. 627 - 638.
5. Blessing G.V., Eitzen D.G., Henning J.F., Clark A.V., Schramm R.E.: *Precision Ultrasonic Thickness Measurements of Thin Steel Disks*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 7B, 1988, s. 1563 - 1571.
6. Bojko M.S., Guriewicz S.Ju., Umaniec W.N.: *EMA priobrazowatel dla prijoma ultrazwukowych kolebanij*. Diefiektoskopija, Nr 5, 1989, s. 90 - 91.
7. Bojko M.S., Pietrow Ju.W.: *Gienierator korotkich elektriczeskich impulsow bolszoi moszcznosti dla EMA wozbuzdzenija ultrazwuka*. Diefiektoskopija, Nr 9, 1982, s. 92 - 93.
8. Bołdyriew Ju.P., Pietrow Ju.W.: *Kontrol kaczestwa relsow s pomoszcziu elektromagnitno-akusticzeskich priobrazowatelej*. Diefiektoskopija, Nr 4, 1975, s. 32 - 37.
9. Bołtaczew W.D., Prawdin L.S., Kulejew W.G., Jakowlew S.G.: *Elektromagnitno-akusticzekoje wozbuzdzenije w fierromagnitnych trubach krugowego sieczenija*. Diefiektoskopija, Nr 6, 1989, s. 57 - 63.
10. Boyd D.M., Sperline P.D.: *Noncontact Temperature Measurements of Hot Steel Bodies Using an Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT)*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 7B, 1988, s. 1669 - 1676.
11. Boyd D.M., Sperline P.D., Droney B.D., Jackson J.F., Cook J.R.: *In-Plant Demonstration of High-Temperature EMAT System on Continuous Caster Strand*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 8A, 1989, s. 1091 - 1097.
12. Böttger W., Repplinger W., Weingarten W., Wilbrand A.: *EMA Angle Probe Prototype Tests Steel Tubes On-Line*. Steel Times, Vol. 215, Nr 8, August 1987, s. 402.
13. Böttger W., Schneider H., Weingarten W.: *Tube Inspection with an EMAT System Using Guided Ultrasonic Waves*. NDT, Proceedings of the 4th European Conference, London, September 1987, s. 2305 - 2313.
14. Budienkow G.A., Biedow S.N., Maskajew A.F.: *Opriedielenije koefficientow priobrazowanija elektromagnitno-akusticzeskich daczikow*. Diefiektoskopija, Nr 5, 1972, s. 113 - 115.
15. Budienkow G.A., Gołowaczewa Z.D.: *Rasczot ugłowego raspriedielenija smieszczenij i opriedielenije charaktiera polarizacji uprugich wołn, wozbuzdajemych EMA sposobom*. Diefiektoskopija, Nr 6, 1973, s. 95 - 101.
16. Budienkow G.A., Gołowaczewa Z.D., Pietrow Ju.W.: *Riegrastracyja naklonnych ultrazwukowych wołn elektromagnitno-akusticzeskim sposobom*. Diefiektoskopija, Nr 2, 1974, s. 62 - 70.
17. Budienkow G.A., Gołowaczewa Z.D., Pietrow Ju.W.: *Elektromagnitno-akusticzeskij sposob prijoma ultrazwukowych wołn*. Diefiektoskopija, Nr 4, 1974, s. 20 - 23.
18. Budienkow G.A., Guriewicz S.Ju.: *Sowriemiennoje sostojanije bieskontaktnych metodow i sriedstw ultrazwukowo kontrola (obzor)*. Diefiektoskopija, Nr 5, 1981, s. 5 - 33.
19. Budienkow G.A., Guriewicz S.Ju., Kaunow A.D., Akimow A.W.: *Ustanowka dla awtomatizirowanogo bieskontaktного ultrazwukowo kontrola kaczestwa listowego prokata*. Diefiektoskopija, Nr 6, 1983, s. 72 - 76.
20. Budienkow G.A., Kwiatkowskij W.N., Pietrow Ju.W.: *Naklonnoje izluczenije ultrazwuka elektromagnitno-akusticzeskim sposobom*. Diefiektoskopija, Nr 1, 1973, s. 57 - 66.
21. Budienkow G.A., Kwiatkowskij W.N., Pietrow Ju.W.: *Elektromagnitno-akusticzeskije dacziki dla naklonnogo izluczenija ultrazwukowych wołn*. Diefiektoskopija, Nr 1, 1974, s. 38 - 44.
22. Budienkow G.A., Kwiatkowskij W.N., Pietrow Ju.W., Sidielnikowa N.W.: *Issledowanije diagrammy naprawlennosti elektromagnitno-akusticzeskogo izluczatiela*. Diefiektoskopija, Nr 4, 1971, s. 87 - 91.
23. Budienkow G.A., Maskajew A.F.: *Wozmoznost' kontrola stalnych izdelij elektromagnitno-akusticzeskim mietodom bez udalenija okaliny*. Diefiektoskopija, Nr 5, 1972, s. 83 - 87.
24. Budienkow G.A., Maskajew A.F.: *Miechanizm wozbuzdzenija i riegrastracyi ultrazwukowych wołn w zelezie i zelezo-nikielewom splawie w rajonie tiempieratury Kiuri*. Diefiektoskopija, Nr 1, 1973, s. 109 - 115.
25. Budienkow G.A., Maskajew A.F.: *Elektromagnitnoje wozbuzdzenije ultrazwuka w uglirodistych stalach pri wysokich tiempieraturach*. Diefiektoskopija, Nr 4, 1979, s. 66 - 70.
26. Budienkow G.A., Maskajew A.F., Guriewicz S.Ju.: *K rasczotu uprugich smieszczenij w prodolnoj wołnie, wozbuzdajemoj w fierromagnitnych matierialach*. Diefiektoskopija, Nr 3, 1974, s. 79 - 83.
27. Budienkow G.A., Pietrow Ju.W.: *Stiend dla opriedielenija diagrammy naprawlennosti ultrazwukowych iskatielej*. Diefiektoskopija, Nr 1, 1981, s. 76 - 81.
28. Budienkow W.A., Budienkow G.A., Głuchow N.A., Bieńko A.M.: *Bieskontaktnyj wwod i prijom ultrazwuka*. Diefiektoskopija, Nr 1, 1969, s. 121 - 123.
29. Budienkow W.A., Budienkow G.A., Szapowałow P.F., Popowa L.A.: *Powyszenije koefficienta priobrazowanija pri elektromagnitnom sposobie wozbuzdzenija i prijoma uprugich kolebanij*. Diefiektoskopija, Nr 6, 1969, s. 108 - 110.
30. Burns L.R., Alers G.A., MacLauchlan D.T.: *A Compact Receiver for Ultrasonic Testing at Elevated Temperatures*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 7B, 1988, s. 1677 - 1684.
31. Butenko A.I., Ermolov I.N., Shkarlet Y.M.: *Electromagneto-Acoustic Non-Destructive Testing in the Soviet Union*. Non-Destructive Testing, Vol 5, June 1972, s. 154 - 159.
32. Butienko A.I., Malinka A.W., Stiefanow W.I., Szkarlet Ju.M.: *Tołszcziniometrija trub impulsnym elektromagnitno-akusticzeskim mietodom*. Diefiektoskopija, Nr 3, 1973, s. 7 - 12.
33. Butienko A.I., Russkiewicz Ju.N., Szkarlet Ju. M.: *Issledowanije akusticzeskogo pola w mietalliczeskom połuprostranstwie pri impulsnom elektromagnitnom wozbuzdzenii*. Diefiektoskopija, Nr 2, 1971, s. 83 - 88.
34. Carlson N.M., Johnson J.A., Lott L.A., Kunerth D.C.: *Ultrasonic NDT Methods for Weld Sensing*. Materials Evaluation, Vol. 50, Nr 11, November 1992, s. 1338 - 1343.
35. Charitonow A.W.: *Razwitije i problemy teorii normalnych wołn w ultrazwukowej diefiektoskopii*. Diefiektoskopija, Nr 7, 1979, s. 59 - 67.

36. Cholewa A.: *Generator mikrosekundowych impulsów mocy do pobudzenia bezstykowych głowic nadawczych fal ultradźwiękowych*. Praca dyplomowa magisterska. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1985.
37. Clark A.V., Fukuoka H., Mitrakovic D.V., Moulder J.C.: *Characterization of Residual Stress and Texture in Cast Steel Railroad Wheels*. Ultrasonics, Vol. 24, Nr 5, September 1986, s. 281 - 288.
38. Clark A.V., Fukuoka H., Mitrakovic D.V., Moulder J.C.: *Acoustoelastic Measurements Pertaining to the Nondestructive Characterization of Residual Stress in a Heat-Treated Steel Railroad Wheel*. Materials Evaluation, Vol. 47, Nr 7, July 1989, s. 835 - 841.
39. Clark A.V., Moulder J.C.: *Residual Stress Determination in Aluminium Using Electromagnetic Acoustic Transducers*. Ultrasonics, Vol. 23, Nr 6, November 1985, s. 253 - 259.
40. Czerniakowa L.E., Ostapczuk W.K., Srokin W.I., Gazow W.I., Chodorowska A.D.: *Wlijanije mikrostruktury i sostojanija powierchnosti rielsowej stali na urowień ultradźwiękowego signala pri kontrole EMA mietodom*. Diefiektoskopija, Nr 10, 1985, s. 3 - 7.
41. Deputat J.: *Badania ultradźwiękowe. Podstawy*. ODKKiS MH, Gliwice - Chorzów 1980.
42. Dewhurst R.J., Edwards C.E., McKie A.D.W., Palmer S.B.: *Comparative Study of Wide-Band Ultrasonic Transducers*. Ultrasonics, Vol. 25, Nr 6, November 1987, s. 315 - 321.
43. Dixon S., Edwards C., Reed J., Palmer S.B.: *Using EMATs to Measure the Wall Thickness of Hot Galvanizing Kettles*. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 37, Nr 5, May 1995, s. 368 - 370.
44. Dobbs E.R.: *Electromagnetic Generation of Ultrasonic Waves in Metals*. Journal of Physics and Chemistry of Solids, Vol. 31, Nr 8, 1970, s. 1657 - 1667.
45. Dobbs E.R.: *Electromagnetic Generation of Ultrasound*. Research Techniques in Nondestructive Testing, Vol. 2, Academic Press London and New York 1973, s. 419 - 441.
46. Dobbs E.R.: *Electromagnetic Generation of Ultrasonic Waves*. Physical Acoustics, Vol. 10, Academic Press New York and London, 1973, s. 127 - 191.
47. Dobbs E.R., Llewellyn: *Generation of Ultrasonic Waves without Using a Transducer*. Non-Destructive Testing, Vol. 4, Nr 2, 1971, s. 49 - 56.
48. Duchanin A.M., Braźnikow N.I., Kasojew W.G.: *Razwitije elektromagnitno-akusticzeskich mietodow i sriedstw kontrola*. Diefiektoskopija, Nr 2, 1974, s. 70 - 73.
49. Duda D., Wolny Z.: *Ultradźwiękowy przyrząd do bezstykowego pomiaru grubości*. Praca dyplomowa magisterska. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1990.
50. Duncumb A.C., Keighley D.M.: *Inspection of Titanium Tubing Using Ultrasonic Lamb Waves Generated by an Electromagnetic Acoustic Transducer*. NDT, Proceedings of the 4th European Conference, London, September 1987, s. 2228 - 2236.
51. Edwards C., Palmer S.B.: *Wideband Electromagnetic Acoustic Transducers Utilising Neodymium Iron Boron Permanent Magnets*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 6, Nr 5, September 1990, s. 2080 - 2084.
52. Edwards C., Nurse G., Palmer S.B., Dewhurst R.J.: *An Integrated Optical Fibre-EMAT Device for Applications in Ultrasonic NDT*. British Journal of NDT, Vol. 32, Nr 2, February 1990, s. 76 - 78.
53. Ejczina W.G., Kesler N.A.: *Wlijanije magnitnogo pola na zatuchanije ultradźwiękowych kolebanij*. Diefiektoskopija, Nr 3, 1973, s. 53 - 58.
54. *Elektromagnetisch-Akustischer Wandler EMAT (EROT)*. Katalog firmy NUKEM GmbH, 1984.

55. Filimonow S.A.: *Bieskontaktnyj kontrol tolszcziny s pomoszczu ultradźwiękowych i elektromagnitnych wołn*. Diefiektoskopija, Nr 5, 1976, s. 29 - 33.
56. Filipczyński L., Pawłowski Z., Wehr J.: *Ultradźwiękowe metody badania materiałów*. WNT, Warszawa 1963.
57. Filus Z.: *Wprowadzenie do elektromagnetyczno-akustycznej metody wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl., Automatyka, Zeszyt 66, Gliwice 1983, 165 - 178.
58. Filus Z.: *Elektromagnetyczno-akustyczna metoda wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych w zastosowaniu do defektoskopii*. Materiały XVI Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów, Lublin 1983, s. 212 - 217.
59. Filus Z.: *Niektóre własności elektromagnetyczno-akustycznego przetwornika fal ultradźwiękowych*. Materiały XIII Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Porąbka-Kozubnik 1984, s. 47 - 48.
60. 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.
61. Filus Z.: *Bezstykowy pomiar charakterystyk kierunkowych głowic ultradźwiękowych*. Materiały XIX Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów, Rzeszów 1987, s. 81 - 84.
62. Filus Z.: *O możliwości defektoskopowego badania metali kolorowych metodą elektromagnetyczno-akustyczną*. Zeszyt Naukowy IV Sympozjum "Kierunki rozwoju metrologii elektrycznej", Warszawa 1987, s. 128 - 134.
63. Filus Z.: *O możliwości stosowania metody elektromagnetyczno-akustycznej w badaniach ultradźwiękowych*. Sympozjum Metrologia '89: Metrologia wielkości mechanicznych i kontrola jakości produkcji, Warszawa 1989, s. 451 - 458.
64. Filus Z.: *Wykrywanie i ocena wielkości wad w wyrobach stalowych metodą elektromagnetyczno-akustyczną*. Materiały XVIII Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Szczyrk 1989.
65. Filus Z.: *Wytwarzanie i odbiór fal ultradźwiękowych metodą bezstykową*. Materiały sesji naukowej nt. "Problemy współczesnej elektroniki", Gliwice 1992, s. 101 - 110.
66. Filus Z.: *Metoda elektromagnetyczno-akustyczna - przykład zastosowania prądów wirowych do defektoskopii ultradźwiękowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl., Automatyka, Zeszyt 111, Gliwice 1993, s. 197 - 215.
67. Filus Z.: *The effect of tuning of bulk wave EMATs on their lift-off*. Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 11, 1994, s. 1 - 8.
68. Filus Z.: *An efficient driver for electromagnetic transducers with a switch-mode high voltage supply*. Ultrasonics, Vol. 32, Nr 4, 1994, s. 271 - 274.
69. Filus Z.: *Wykorzystanie prądów wirowych w technice ultradźwiękowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śl., Elektronika, Zeszyt 3, Gliwice 1994, s. 27 - 40.
70. Filus Z.: *Malogabarytowe przetworniki elektromagnetyczno-akustyczne*. Materiały XXIII Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Szczyrk 1994, s. 137 - 140.
71. Filus Z.: *Bezstykowy ultradźwiękowy pomiar grubości wyrobów metalowych*. Materiały XXIV Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących, Poznań - Kiekrz 1995, s. 39 - 48.
72. Filus Z., Malzacher S.: *Non-contact transducer for generation and reception of ultrasonic longitudinal waves*. The 11th Triennial World Congress of IMEKO, Houston, USA, 1988, s. 449 - 470.

73. Frost H.M.: *Electromagnetic - Ultrasound Transducers: Principles, Practice and Applications*. Physical Acoustics, Vol. 14, Academic Press New York San Francisco London, 1979, s. 179 - 275.
74. Gaertner M.R., Wallace W.D., Maxfield B.W.: *Experiments Relating to the Theory of Magnetic Direct Generation of Ultrasound in Metals*. Physical Review, Vol. 184, Nr 3, 1969, s. 702 - 704.
75. Gałkawyj W.W., Suczkow G.M.: *Triebowanija k slediaszczemu ustrojstvu ustanowki EMA diefektoskopii relsow*. Diefektoskopija, Nr 5, 1988, s. 19 - 22.
76. Gierasimow N.Ju., Olszanskij W.P.: *Portatiwnyj EMA tolszczinomieter UWT-03*. Diefektoskopija, Nr 6, 1990, s. 80 - 82.
77. Głuchow N.A.: *O naprawlenosti elektromagnitnogo akusticzeskogo daczika sdwigowych kolebanij*. Diefektoskopija, Nr 1, 1971, s. 13 - 19.
78. Głuchow N.A.: *Niekotoryje paramietry elektromagnitnogo daczika sdwigowych ultrazwukowych kolebanij w tokoprowodiaszczich materialach*. Diefektoskopija, Nr 4, 1971, s. 69 - 74.
79. Głuchow N.A., Kołmogorow W.N.: *Opriedielenije optimalnych paramietrow elektromagnitno-akusticzeskich prieobrazowatelej dla kontrola ferromagnitnych listow*. Diefektoskopija, Nr 1, 1973, s. 74 - 81.
80. Grubin H.L.: *Direct Electromagnetic Generation of Compressional Waves in Metals in Static Magnetic Fields*. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-17, Nr 4, October 1970, s. 227 - 229.
81. Guriewicz S.Ju.: *K teorii elektromagnitnoj gienieracyi akusticzeskich wołn w ferromagnitnoj sriedie pri vysokoj tiempieraturie*. Diefektoskopija, Nr 3, 1993, s. 37 - 50.
82. Guriewicz S.Ju., Galcew Ju.G.: *O wozmożnosti ultrazwukowej diefektoskopii goriaczego nieprierywnolitoego slitka*. Diefektoskopija, Nr 2, 1990, s. 94 - 96.
83. Guriewicz S.Ju., Galcew Ju.G.: *Wysokotiempieraturnoje EMA prieobrazowanije w zaewtiektoidnoj stali*. Diefektoskopija, Nr 11, 1990, s. 19 - 21.
84. Guriewicz S.Ju., Galcew Ju.G.: *Stiend dla opriedielenija charakteristik naprawlenosti bieskontaktnych izluczatelej ultrazwuka*. Diefektoskopija, Nr 12, 1991, s. 23 - 27.
85. Guriewicz S.Ju., Galcew Ju.G.: *Ekspierimentalnyje charakteristiki naprawlenosti EMA prieobrazowatelej dla wysokotiempieraturnogo ultrazwukowego kontrola mietallow*. Diefektoskopija, Nr 11, 1992, s. 24 - 30.
86. Guriewicz S.Ju., Galcew Ju.G., Kaunow A.D.: *Sistiema dla bieskontaktного ultrazwukowego kontrola trub pri wysokich tiempieraturach*. Diefektoskopija, Nr 3, 1986, s. 35 - 41.
87. Guriewicz S.Ju., Galcew Ju.G., Kaunow A.D., Karipow R.S.: *Tiempieraturnyje zawisimosti skorosti rasprostrianienija prodolnych ultrazwukowych wołn w stalach*. Diefektoskopija, Nr 2, 1987, s. 47 - 51.
88. Holler P., Salzburger H.J., Wilbrand A.: *Electromagnetic Ultrasonic Transducers and Systems for In-Service Inspection of Gas Pipelines*. IEE Proceedings, Vol. 134, Part A, Nr 3, March 1987, s. 279 - 282.
89. Honjoh K., Sudoh Y., Masuda J.: *Electromagnetic Acoustic Technique for Measuring Thickness of Thin Steel Plates*. Journal of JSNDI, Vol. 41, Nr 1, January 1992, s. 11 - 17.
90. Houck J.R., Bohm H.V., Maxfield B.W., Wilkins J.W.: *Direct Electromagnetic Generation of Acoustic Waves*. Physical Review Letters, Vol. 19, Nr 5, 1967, s. 24 - 227.

91. Hu J.K., Hutchins D.A., Ungar J., Zhang Q.L., Mak D.K.: *Noncontact Ultrasonic Reflection Tomography*. Materials Evaluation, Vol. 47, Nr 6, June 1989, s. 736 - 740.
92. Hu J.K., Zhang Q.L., Hutchins D.A.: *Directional Characteristics of Electromagnetic Acoustic Transducers*. Ultrasonics, Vol. 26, Nr 1, January 1988, s. 5 - 13.
93. Hussein A.M.: *Current Distribution and Input Impedance of a Finite Electromagnetic Acoustic Transducer*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, Nr 5, September 1991, s. 4258 - 4261.
94. Hutchins D.A.: *Ultrasonic Generation by Pulsed Lasers*. Physical Acoustics, Vol. 28, Academic Press, New York, 1988, s. 21 - 123.
95. Hutchins D.A., Hauser F., Bresse L.F.: *Non-Contact Ultrasonic Measurements in Aluminium with Transducers of Finite Size*. Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 5, Nr 1, 1989, s. 17 - 25.
96. Hutchins D.A., Hu J.K., Lundgren K.: *A Comparison of Laser and EMAT Techniques for Noncontact Ultrasonics*. Materials Evaluation, Vol.44, Nr 10, September 1986, s. 244 - 1253.
97. Hutchins D.A., Hu J.K., Young R.P., Stoner R., Jansen D., Zhang Q.L.: *Ultrasonic Tomography of Metals Using Noncontact Transduction*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 85, Nr 2, February 1989, s. 747 - 752.
98. Hutchins D.A., Moles M.D.C., Taylor G.S., Palmer S.B.: *Non-Contact Ultrasonic Inspection of Diffusion Bonds in Titanium*. Ultrasonics, Vol. 29, Nr 4, July 1991, s. 294 - 301.
99. Hutchins D.A., Saleh C., Moles M., Farahbakhsh B.: *Ultrasonic NDE Using a Concentric Laser/EMAT System*. Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 9, Nr 4, 1990, s. 247 - 261.
100. Hübschen G.: *UT with SH-Waves and Electromagnetic Ultrasonic (EMUS) Transducers*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 9A, 1990, s. 815 - 822.
101. Hübschen G., Salzburger H.J.: *UT of Austenitic Welds and Cladding Using Electromagnetically Excited SH-Waves*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 5B, 1986, s. 1687 - 1695.
102. Hübschen G., Salzburger H.J.: *Inspection of Dissimilar Metal Welds Using Horizontally Polarized Shear (SH-) Waves and Electromagnetic (EMUS) Probes*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 39, Nr 4, 1989, s. 331 - 344.
103. Iljasow R.S., Komarow W.A.: *Topografija elektromagnitnogo pola na granice ferromagnetik - wozduch, obusłowlennogo objomnymi sdwigowymi wołnami*. Diefektoskopija, Nr 10, 1982, s. 49 - 54.
104. Iljasow R.S., Komarow W.A.: *Elektromagnitno-akusticzekoje prieobrazowanije objomnych wołn w ferromagnietikach nakladnymi prieobrazowatelami. I. Ekspierimentalnoje izuczenije osnovnych zakonomiernostiej*. Diefektoskopija, Nr 11, 1983, s. 53 - 60.
105. Iljasow R.S., Mierzliakow W.W.: *Elektromagnitno-akusticzekoje prieobrazowanije objomnych wołn w oblasti paraprocesa. I. Wołnowyje zakonomiernosti*. Diefektoskopija, Nr 8, 1992, s. 39 - 48.
106. Iljasow R.S., Mierzliakow W.W.: *Elektromagnitno-akusticzekoje prieobrazowanije objomnych wołn w oblasti paraprocesa. II. Zakonomiernosti w okriestnostii toczki Kjuri*. Diefektoskopija, Nr 9, 1992, s. 52 - 60.
107. Iljin I.W.: *K woprosu o wozbużdienii objomnych wołn w ferromagnitnych mietallow elektromagnitno-akusticzeskim prieobrazowatelem*. Diefektoskopija, Nr 12, 1987, s. 13 - 21.
108. Iljin I.W., Charitonow A.W.: *K teorii EMA mietoda prijoma wołn Releja dla ferromagnitnych materialow*. Diefektoskopija, Nr 7, 1980, s. 86 - 93.

109. Iljin I.W., Charitonow A.W.: *Osnownyje zakonomiernosti elektromagnitno-akusticzeskogo metoda prijoma wołn Releja w ferromagnitnych mietallach*. Diefiektoskopija, Nr 7, 1982, s. 23 - 28.
110. Johnson J.A., Carlson N.M.: *A Laser/EMAT Concurrent Weld Inspection System*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 10B, 1991, s. 2097 - 2104.
111. Kawashima K.: *Quantitative Calculation and Measurement of Longitudinal and Transverse Ultrasonic Wave Pulses in Solids*. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-31, Nr 2, March 1984, s. 83 - 93.
112. Kawashima K., McClung R.W.: *Electromagnetic Ultrasonic Transducer for Generating and Detecting Longitudinal Waves (with a Small Amount of Radially Polarized Transverse Wave)*. Materials Evaluation, Vol. 34, Nr 4, April 1976, s. 81 - 90.
113. Kilcullen M.B.: *Measurement of Residual Thickness of Cor-Ten Steel Using an E.M.A. Probe*. British Journal of NDT, Vol. 23, Nr 3, May 1981, s. 138 - 139.
114. Klujew W.W., Szubajew S.N., Muzyckij W.F.: *Opyt ekspluatacji elektromagnitno-akusticzeskogo tolszcziniometra UT-80B*. Diefiektoskopija, Nr 9, 1982, s. 37 - 43.
115. Komarow W.A.: *Prieobrazowanie uprugich wołn w elektromagnitnyje pola w ferromagnitnych prowadzszczych cylindrach. I. Analityczeskije izuczenije jawlenija. Prodolnyje wołny w krugowych cylindrach*. Diefiektoskopija, Nr 9, 1979, s. 60 - 67.
116. Komarow W.A., Badkin S.E., Iljasow R.S.: *EMA prieobrazowanie wołn gorizontalfno polarizacji w magnitoprugich materialach*. Diefiektoskopija, Nr 2, 1993, s. 11 - 17.
117. Komarow W.A., Iljasow R.S.: *Izuczenije topografii elektromagnitno-akusticzeskogo pola induktiwnych izluczatelej*. Diefiektoskopija, Nr 4, 1980, s. 31 - 39.
118. Komarow W.A., Iljasow R.S., Rubcow W.I.: *Elektromagnitno-akusticzeskije prieobrazowanie w monokristallach kriemnistogo železa, podwiernutych rastiazeniju*. Diefiektoskopija, Nr 11, 1981, s. 101 - 104.
119. Komarow W.A., Iljasow R.S., Szakszyn N.I.: *Prieobrazowanie uprugich objomnych wołn w elektromagnitnoje pole na granice ferromagnitnego poluprostranstwa*. Diefiektoskopija, Nr 5, 1982, s. 30 - 35.
120. Komarow W.A., Iljasow R.S., Szakszyn N.I.: *Issledowanie zakonomiernostiej wozbuźdzenija objomnych akusticzeskich wołn w ferromagnitkach kwazistacionarnym elektromagnitnym polem*. Diefiektoskopija, Nr 4, 1983, s. 83 - 92.
121. Komarow W.A., Kononow P.S.: *Izuczenije priamogo i obratnogo elektromagnitno-akusticzeskogo prieobrazowania w ferromagnitnych stierżniach*. Diefiektoskopija, Nr 5, 1978, s. 20 - 27.
122. Komarow W.A., Kulejew W.G.: *Wozbuźdzenie i riegistracyja ultrazwukowych kolebanij w magnitopolarizowanych nieferromagnitnych mietallach posredstwom elektromagnitnych polej. I. Dispersionnoje urawnienie*. Diefiektoskopija, Nr 2, 1976, s. 58 - 67.
123. Komarow W.A., Kulejew W.G.: *Wozbuźdzenie i riegistracyja ultrazwukowych kolebanij w magnitopolarizowanych nieferromagnitnych mietallach posredstwom elektromagnitnych polej. II. Wyczislenie uprugich smieszczzenij w mietallie*. Diefiektoskopija, Nr 2, 1976, s. 67 - 76.
124. Komarow W.A., Riewina N.A., Wopszyna Je.W.: *EMA prieobrazowanie w ferromagnitnych cylindrach s pokrytijami*. Diefiektoskopija, Nr 11, 1990, s. 13 - 18.
125. Komarow W.A., Szulgin W.A.: *Issledowanie zakonomiernostiej wozbuźdzenija uprugich wołn w nieferromagnitnych mietallach elektromagnitnym sposobom s pomoszczu modielej induktiwnych izluczatelej. I. Postanowka zadaczi; akusticzeskije pole witka s tokom w bliźniej zonie izluczenia*. Diefiektoskopija, Nr 11, 1980, s. 77 - 86.

126. Komarow W.A., Zwieriew N.N., Łomajewa W.P.: *Zakonomiernosti EMA transformacji objomnych wołn, wozbuźdajemych w mietallach nakładnymi prieobrazowatelami. I. Priamoje EMA prieobrazowanie*. Diefiektoskopija, Nr 10, 1987, s. 73 - 81.
127. Krautkrämer J.: *Unconventional Methods of Generating, Receiving and Coupling of Ultrasonic Waves for Testing Materials*. British Journal of NDT, Vol. 15, Nr 3, May 1973, s. 76 - 82.
128. Krautkrämer J., Krautkrämer H.: *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York, 1983, s. 150 - 172.
129. Krugłow L.D., Szkarlet Ju.M., Wertman A.A., Sznyriew G.D.: *Wozbuźdzenie ultrazwukowych kolebanij w mietallach pri wysokich tiempieraturach elektromagnitno-akusticzskim prieobrazowatelem*. Diefiektoskopija, Nr 4, 1972, s. 31 - 37.
130. Kubota J., Sasaki S., Sato I., Ito S., Kadowaki T., Yamaguchi H., Fujisawa K., Murayama R.: *An Improved Electromagnetic Ultrasonic Testing Technique for Flaw Detection for Hot Steel*. Materials Evaluation, Vol. 46, Nr 4, March 1988, s. 523 - 526.
131. Kulejew W.G., Kononow P.S., Tieliegina I.A.: *Wlijanie rastiagiwajuszczich nagruzok na elektromagnitno-akusticzeskije prieobrazowanie w nikielie*. Diefiektoskopija, Nr 4, 1980, s. 39 - 49.
132. Kulejew W.G., Kononow P.S., Tieliegina I.A.: *EMA wozbuźdzenie uprugich prodolnych cylindriczeskich wołn w ferromagnitnych stierżniach*. Diefiektoskopija, Nr 9, 1983, s. 41 - 51.
133. Larsen P.K., Saermark K.: *Helicon Excitation of Acoustic Waves in Aluminium*. Physics Letters, Vol. 24A, March 1967, s. 374 - 375 i 668 - 669.
134. Le Brun A., Pons F.: *Non-Contact Ultrasonic Testing: Applications to Metrology and Non-Destructive Testing*. Proceedings of the 4th European Conference on Non-Destructive Testing, Vol. 3, London, 13-17 September 1987, s. 1593 - 1602.
135. Legg K.O., Meredith D.J.: *Flaw Detection in Metals Using Electromagnetic Sound Generation*. Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 3, 1970, s. 61 - 63.
136. Leszczenko N.G., Szapowałow P.F.: *Małogabaritnyj EMA tolszcziniometr EMAT-I*. Diefiektoskopija, Nr 10, 1993, s. 95 - 96.
137. Ludwig R.: *Theoretical Basis for a Unified Conservation Law Description of the Electromagnetic Acoustic Transduction Process*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 39, Nr 4, July 1992, s. 476 - 480.
138. Ludwig R.: *Numerical Implementation and Model Predictions of a Unified Conservation Law Description of the Electromagnetic Acoustic Transduction Process*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 39, Nr 4, July 1992, s. 481 - 488.
139. Ludwig R., Dai X.W.: *Numerical Simulation of Electromagnetic Acoustic Transducer in the Time Domain*. Journal of Applied Physics, Vol. 69, Nr 1, January 1991, s. 89 - 98.
140. Ludwig R., Dai X.W., Palanisamy R.: *Numerical Modeling of Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) Phenomena*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 10A, 1991, s. 845 - 852.
141. MacLauchlan D.T., Burns L.R., Alers G.A.: *Measurement of Stress in Steel Structures with SH Wave EMATs*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 7B, 1988, s. 1399 - 1404.
142. Malecki I.: *Teoria fal i układów akustycznych*. PWN, Warszawa, 1964.
143. Malinka A.W.: *Izluczenie i prijom ultrazwukowych kolebanij pod zadannym ugłom pri elektromagnitno-akusticzskom mietodie*. Diefiektoskopija, Nr 5, 1970, s. 16 - 20.
144. Malzacher S., Filus Z. i inni: *Opracowanie podstaw techniki wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych metodą elektromagnetyczną*. Praca węzłowa 02.1/P2-05-00. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1981 - 1985.

145. Malzacher S., Filus Z. i inni: *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.
146. Malzacher S., Filus Z. i inni: *Metody oceny jakości badanego obiektu na podstawie wieloparametrowej analizy sygnałów w wiroprowadzonych badaniach nieniszczących*. Projekt badawczy KBN Nr 3 1300 91 01. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1991-1993.
147. Maskajew A.F., Guriewicz S.Ju.: *Issledowanije elektromagnitnogo pola, wozbuzhdajemogo w wakuumie uprugoj wolnoj w magnitostrikyonnom prowadiaszczem połuprostranstwie*. Diefiektoskopija, Nr 3, 1975, s. 83 - 90.
148. Maskajew A.F., Guriewicz S.Ju.: *Elektromagnitnoje wozbuzhdienije i riegistracyja ultrazwukowych kolebanij w chromistoj stali*. Diefiektoskopija, Nr 4, 1979, s. 106 - 108.
149. Maxfield B.W., Fortunko C.M.: *The Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers (EMATs)*. Materials Evaluation, Vol. 41, Nr 12, November 1983, s. 399 - 1408.
150. Maxfield B.W., Kuramoto A., Hulbert J.K.: *Using EMATs for High Temperature Ultrasonics*. The 11th World Conference on Nondestructive Testing, WCNDT '85, Las Vegas, s. 917 - 924.
151. Maxfield B.W., Kuramoto A., Hulbert J.K.: *Evaluating EMAT Designs for Selected Applications*. Materials Evaluation, Vol. 45, Nr 10, October 1987, s. 1166 - 1183.
152. Meredith D.J., Watts-Tobin R.J., Dobbs E.R.: *Electromagnetic Generation of Ultrasonic Waves in Metals*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 45, Nr 6, 1969, s. 1393 - 1401.
153. Miller F., Pursey H.: *The Field and Radiation Impedance of Mechanical Radiators on the Free Surface of a Semi-Infinite Isotropic Solid*. Proceedings of the Royal Society of London, Vol. A-223, 1954, s. 521 - 541.
154. Monchalín J.P., Wagner J.W.: *Optical Generation and Detection of Ultrasound*. Nondestructive Testing Handbook, Vol. 7, American Society for Nondestructive Testing, 1991, s. 313 - 319.
155. Nikiforienko Ž.G.: *Izmierittiel swojstw listowego prokata*. Diefiektoskopija, Nr 6, 1973, s. 86 - 95.
156. Obraz J.: *Ultradźwięki w technice pomiarowej*. WNT, Warszawa 1983.
157. Oursler D.A., Wagner J.W.: *Narrow-Band Hybrid Pulsed Laser/EMAT System for Noncontact Ultrasonic Inspection Using Angled Shear Waves*. Materials Evaluation, Vol. 53, Nr 5, May 1995, s. 593 - 597.
158. Palmer S.B.: *Non-Contact NDE*. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 37, Nr 5, May 1995, s. 366 - 367.
159. Pardee W.J., Thompson R.B.: *Half-Space Radiation by EMATs*. Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 1, Nr 3, 1980, s. 157 - 181.
160. Parkinson G.J., Wilson D.M.: *Non-Contact Ultrasonics*. British Journal of NDT, Vol. 19, Nr 4, July 1977, s. 178 - 184.
161. Pawłowski Z.: *Badania nieniszczące. Poradnik*. ODK SIMP, Warszawa 1984.
162. Riemiezow W.B., Szkarlet Ju.M.: *Wozbuzhdienije ultrazwuka w prowadiaszczich sriedach pieriemiennymi elektromagnitnymi polami dwuch razlicznych czastot*. Diefiektoskopija, Nr 8, 1979, s. 57 - 63.
163. Salzburger H.J.: *Potential of EMATs for High - Temperature NDT*. Proceedings of a CEC Workshop, London, Elsevier Science Publishers, 1986, s. 231 - 239.

164. Salzburger H.J.: *Recent Results in Nondestructive Testing with Electromagnetic Ultrasonic Transducers*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 5A, 1986, s. 615 - 623.
165. Salzburger H.J.: *A New Design of the RF-Part of Electromagnetic-Ultrasonic (EMUS) Transducers*. NDT, Proceedings of the 4th European Conference, London, September 1987, s. 2321 - 2327.
166. Salzburger H.J., Repplinger W.: *Automatic In-Motion Inspection of the Head of Railway Wheels by E.M.A. Excited Rayleigh Waves*. Conference Proceedings of Ultrasonics International, London, 1983, s. 497 - 501.
167. Salzburger H.J., Repplinger W.: *Thickness Measurements of Sheets and Plates with Horizontally Polarized Guided Plate Waves (SH-Modes) and Electromagnetic Ultrasonic (EMUS-) Transducers*. NDT, Proceedings of the 4th European Conference, London, September 1987, s. 2314 - 2320.
168. Sasaki S., Sato I., Kubota J., Ito S., Kadowaki T., Yamaguchi H., Fujisawa K., Murayama R.: *An Improved Electromagnetic Ultrasonic Testing Technique for Flaw Detection of Hot Steels*. 11th World Conference on Nondestructive Testing, Las Vegas, Nevada, USA, 3-8 November 1985, Vol. 2, s. 1181 - 1186.
169. Sazonow Ju.I., Szkarlet Ju.M.: *Issledowanije bieskontaktnych mietodow wozbuzhdienija i riegistracyi ultrazwukowych kolebanij*. Diefiektoskopija, Nr 5, 1969, s. 1 - 12.
170. Schramm R.E., Clark A.V., Mitrovic D.V., Shull P.J.: *Flaw Detection in Railroad Wheels Using Rayleigh-Wave EMATs*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 7B, 1988, s. 1661 - 1668.
171. Schramm R.E., Fortunko C.M., Moulder J.C.: *Advanced Methods for Noncontact Inspection of Welds Using Electromagnetic - Acoustic Transducers*. Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 3B, 1984, s. 1425 - 1432.
172. Schramm R.E., Shull P.J., Clark A.V., Mitrovic D.V.: *EMATs for Roll-by Crack Inspection of Railroad Wheels*. Review of Progress in NDE, Vol. 8A, 1989, s. 1083 - 1089.
173. Scruby C.B., Dewhurst R.J., Hutchins D.A., Palmer S.B.: *Laser Generation of Ultrasound in Metals*. Research Techniques in Nondestructive Testing, Vol. 5, Academic Press, New York, 1982, s. 281 - 327.
174. Silk M.G.: *Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing*. Adam Hilger Ltd, Bristol, 1984, s. 111 - 119.
175. Slesenger T.A.: *EMAT Development at the National Nondestructive Testing Centre*. Nondestructive Testing and Evaluation, Vol. 5, Nr 2-3, 1990, s. 213 - 226.
176. Słomski P.: *Przyrząd do badania charakterystyk kierunkowych głowic ultradźwiękowych*. Praca dyplomowa magisterska. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1992.
177. Sobolew W., Szkarlet Ju.M.: *Nakładnyje i ekrannyje datcziki*. Izdatielstwo Nauka, Moskwa 1967.
178. Stiepanow S.K.: *Gienierator elektriczeskich signalow dla pitanija elektromagnitno-akusticzeskich prieobrazowatelej s pieriodiczeskim podmagniczijawuszczim polem*. Diefiektoskopija, Nr 6, 1981, s. 105 - 107.
179. Szilard J.: *Ultrasonic Testing. Non-Conventional Testing Techniques*. John Wiley & Sons, 1982, s. 381 - 409.
180. Szkarlet Ju.M.: *O teorieticzeskich osnovach elektromagnitnych i elektromagnitno-akusticzeskich mietodow nierazruszajuszczego kontrola*. Diefiektoskopija, Nr 1, 1974, s. 11 - 18.

181. Szkarlet Ju.M.: *Osnovy obszcznej tieorii wozbuźdzenija akusticzeskich kolebanij garmoniczeskimi polami sil.* Diefiektoskopija, Nr 3, 1974, s. 84 - 92.
182. Szkarlet Ju.M.: *Wozbuźdzenije akusticzeskogo pola płoskim elektromagnitnym polem.* Diefiektoskopija, Nr 3, 1974, s. 92 - 99.
183. Szkarlet Ju.M.: *Zakonomiernosti wozbuźdzenija akusticzeskich powierchnostnych wołn elektromagnitnym polem.* Diefiektoskopija, Nr 4, 1974, s. 12 - 20.
184. Szkarlet Ju.M., Łokszyna N.N.: *Issledowanije elektromagnitno-akusticzeskogo priebrazowatiela sdwigowych kolebanij.* Diefiektoskopija, Nr 3, 1970, s. 3 - 12.
185. Szubajew S.N.: *Wozbuźdzenije uprugich wołn w mietalliczeskom połuprostranstwie elektromagnitnym mietodom.* Diefiektoskopija, Nr 2, 1974, s. 45 - 55.
186. Szubajew S.N.: *Analiz akusticzeskogo pola, wozbuźdajemogo elektromagnitnym mietodom.* Diefiektoskopija, Nr 3, 1974, s. 100 - 109.
187. Szubajew S.N.: *Elektromagnitno-akusticzeskoje priebrazowanije w płoskoj mietalliczeskoj płastinie.* Diefiektoskopija, Nr 6, 1975, s. 32 - 43.
188. Szubajew S.N., Szkarlet Ju.M.: *Obszczije zakonomiernosti elektromagnitnogo mietoda prijoma wołn Releja i Łemba.* Diefiektoskopija, Nr 5, 1972, s. 63 - 72.
189. Szubajew S.N., Szkarlet Ju.M.: *Pieriemiennyje pola, woznikajuszczije pri elektromagnitnom mietodie prijoma wołn Releja i Łemba.* Diefiektoskopija, Nr 6, 1972, s. 62 - 68.
190. Szubajew S.N., Szkarlet Ju.M.: *Rasczot daczikow, primienijajemych pri elektromagnitnom mietodie prijoma wołn Releja i Łemba.* Diefiektoskopija, Nr 1, 1973, s. 81 - 89.
191. Szulgin W.A.: *Wozbuźdzenije elektromagnitno-akusticzeskim mietodom izgibnych normalnych wołn w magnitopolarizowanych niefierromagnitnych stierźniach.* Diefiektoskopija, Nr 7, 1982, s. 29 - 40.
192. Szulgin W.A.: *Bieskontaktnaja riegistracyja izgibnych normalnych wołn w mietalliczeskich stierźniach.* Diefiektoskopija, Nr 7, 1983, s. 42 - 53.
193. Szulgin W.A.: *Bieskontaktnaja riegistracyja ultrazwukowych impulsow w stierźniach.* Diefiektoskopija, Nr 7, 1984, s. 68 - 79.
194. Szulgin W.A., Kulejew W.G.: *Elektromagnitno-akusticzeskoje wozbuźdzenije biegunzczich uprugich wołn w mietalliczeskich stierźniach.* Diefiektoskopija, Nr 1, 1982, s. 28 - 37.
195. Szulgin W.A., Kulejew W.G.: *Effiektiwnost' elektromagnitno-akusticzeskogo wozbuźdzenija radialnych riezonansow w mietalliczeskich stierźniach daczikami koniecznych razmierow.* Diefiektoskopija, Nr 6, 1983, s. 77 - 87.
196. Thompson R.B.: *Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers.* Physical Acoustics, Vol. 19, Academic Press, 1990, s. 157 - 200.
197. Thompson R.B.: *Ultrasonic Characterization of Texture and Formability of Rolled Metal Sheets.* Materials Evaluation, Vol. 51, Nr 10, October 1993, s. 1162 - 1165.
198. Trigubowicz B.W., Domorod N.E.: *K tieorii elektromagnitnogo wozbuźdzenija ultrazwuka w fierromagnietikach w rajonie tiempieratury Kiuri.* Diefiektoskopija, Nr 7, 1984, s. 57 - 64.
199. *Ultradźwiękowe badania materiałów.* Materiały seminarium szkoleniowego zorganizowanego przez IPPT PAN i Biuro Gamma, Zakopane 1986.
200. Van den Berg W.H., Homs M.H., Hoff A.B.M.: *Development of an Electromagnetic Acoustic Transducer for Inspecting the Wall Thickness of Offshore Risers from the Inside.* Ultrasonics, Vol. 26, Nr 1, January 1988, s. 14 - 22.
201. Whittington K.R.: *Ultrasonic Inspection of Hot Steel.* British Journal of NDT, Vol. 20, Nr 5, September 1978, s. 242 - 247.

202. Whittington K.R.: *Electrodynamic Probes - Principles, Performance and Applications.* British Journal of NDT, Vol. 23, Nr 3, May 1981, s. 127 - 132.
203. Whittington K.R.: *EMAT-Generated Lamb Waves Applied to Hot Aluminium Strip Profile Measurement with Temperature Compensation.* British Journal of NDT, Vol. 31, Nr 3, March 1989, s. 140 - 144.
204. Wilbrand A.: *Quantitative Modeling and Experimental Analysis of the Physical Properties of Electromagnetic-Ultrasonic Transducers.* Review of Progress in Quantitative NDE, Vol. 7A, 1987, s. 671 - 680.
205. Własow W.W., Łonczak W.A., Głuchow N.A., Iwanow I.W., Runow I.N.: *Ultrazwukowyj kontrol żeleznodoroznyh relsow, ułożennyh w put', s ispolzowanijem elektromagnitno-akusticzeskich priebrazowatielej.* Diefiektoskopija, Nr 3, 1971, s. 94 - 98.
206. Wypior T.: *Układ kompensacji zmian amplitudy sygnału z elektromagnetycznego przetwornika fal ultradźwiękowych.* Praca dyplomowa magisterska. Instytut Elektroniki Politechniki Śl., Gliwice 1994.
207. Yamaguchi H., Fujisawa K., Murayama R., Hashimoto K., Nakanishi R., Kato A., Ishikawa H., Kadowaki T., Sato I.: *Development of the Wall Thickness Measuring System Using the Electromagnetic Acoustic Transducer for Hot Seamless Steel Tubes and Pipes.* The 11th World Conference on Nondestructive Testing, WCNDT '85, Las Vegas, s. 734 - 740.
208. Yamaguchi H., Fujisawa K., Murayama R., Hashimoto K., Nakanishi R., Kato A., Ishikawa H., Kadowaki T., Sato I.: *Development of Hot Seamless Tube Wall Thickness Gauge by Electromagnetic Acoustic Transducer.* Transactions ISIJ, Vol 26, 1986, s. 61 - 68.
209. Żukow W.K., Olszanski W.P.: *Elektromagnitno-akusticzeskij priebrazowatielnyj modul.* Diefiektoskopija, Nr 12, 1985, s. 74 - 76.
210. Żukow W.K., Olszanski W.P.: *Elektromagnitno-akusticzeskaja ustanowka UWT-01N dla kontrola tołszcziny stienki burilnych trub.* Diefiektoskopija, Nr 2, 1986, s. 8 - 13.
211. Żukow W.K., Surkowa N.W.: *Otstrojka ot wlijanija zazora mieźdu priebrazowatielem i obiektem kontrola na wieliczinu formirujemych signalow.* Diefiektoskopija, Nr 4, 1990, s. 20 - 25.

## PRZETWORNIKI ELEKTROMAGNETYCZNO-AKUSTYCZNE TEORIA I ZASTOSOWANIA

### Streszczenie

Monografia ta poświęcona jest metodzie bezstykowego wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych, zwanej metodą elektromagnetyczno-akustyczną (EMA), i opracowana została w oparciu o studia literaturowe oraz własne prace badawcze i konstrukcyjne autora. W metodzie tej sprzężenie pomiędzy ultradźwiękowym przetwornikiem nadawczym lub odbiorczym i badanym obiektem realizowane jest za pośrednictwem pola elektromagnetycznego, w związku z czym - w odróżnieniu od konwencjonalnych głowic ultradźwiękowych - nie jest wymagane stosowanie żadnego materialnego ośrodka sprzęgającego. Przetwarzanie energii pola elektrycznego na energię pola akustycznego lub odwrotnie odbywa się dzięki wykorzystaniu siły Lorentza, sił magnetycznych lub w oparciu o zjawisko magnetostrykcji.

W początkowej części pracy omówiono krótko metody bezstykowego wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych, a następnie przedstawiono podstawowe konfiguracje przetworników EMA i wytwarzane w nich rodzaje fal ultradźwiękowych. W dalszych częściach pracy skoncentrowano się na własnościach przetworników na fale podłużne i poprzeczne, gdyż są one najczęściej stosowane w ultradźwiękowych badaniach nieniszczących i w ultradźwiękowej technice pomiarowej.

Rozdział 2 stanowi wprowadzenie do zagadnień związanych z modelowaniem teoretycznym przetwarzania elektromagnetyczno-akustycznego. Omówiono tam podstawowe własności metody EMA, przy założeniu że źródłem fali ultradźwiękowej jest płaska fala elektromagnetyczna padająca na powierzchnię metalu. Podejście takie pozwala na wyznaczenie zależności skuteczności przetwarzania od własności fizycznych badanego materiału, temperatury i częstotliwości. Zwrócono szczególną uwagę na zjawisko znacznego wzrostu amplitudy fal podłużnych generowanych w materiałach ferromagnetycznych w temperaturze zbliżonej do temperatury punktu Curie. W końcowej części tego rozdziału omówiono teorię odbioru płaskich fal ultradźwiękowych metodą EMA.

Rozdział 3 poświęcony jest omówieniu modeli teoretycznych i własności realnych przetworników EMA, które składają się ze źródła stałego silnego pola magnetycznego i uzwojenia w postaci prostoliniowego przewodu, taśmy, pojedynczego kołowego zwoju, spiralnej cewki, ramki lub cewki typu meander. Szczególną uwagę zwrócono na skuteczność przetwarzania, własności kierunkowe przetworników oraz zjawisko unoszenia, tzn. zależność amplitudy wytwarzanej fali ultradźwiękowej lub odbieranego sygnału elektrycznego od odległości przetwornika od powierzchni badanego wyrobu. Odrębna część tego rozdziału jest poświęcona przetwornikom pracującym w konfiguracji PPM, które pozwalają na generację fal poprzecznych o polaryzacji SH, rozchodzących się w szerokim zakresie kątów w stosunku do normalnej do powierzchni ośrodka.

W rozdziale 4 przedstawione są zagadnienia związane z konstrukcją przetworników EMA i niezbędnych dla ich działania układów elektronicznych. Rozważania te w dużej części oparte są na doświadczeniach wynikających z prac własnych autora, zwłaszcza w częściach dotyczących nadajników impulsów i kompensacji zjawiska unoszenia.

Przegląd najważniejszych zastosowań przetworników EMA zawarty jest w rozdziale 5. Zastosowania te obejmują: bezstykowy pomiar grubości wyrobów metalowych, badania nieniszczące realizowane w wysokiej temperaturze (do ok. 1000°C), badania szyn i kół kolejowych, badania połączeń spawanych, pomiary naprężeń i pomiary charakterystyk kierunkowych głowic ultradźwiękowych.

W rozdziale 6 przedstawione są niektóre konstrukcje przetworników EMA zrealizowanych przez autora. W szczególności są to: przetwornik małogabarytowy na fale podłużne do badania metali nieferromagnetycznych, przetwornik na fale poprzeczne do badania wyrobów stalowych i przetworniki odbiorcze do badania charakterystyk kierunkowych. Zamieszczone tam przykładowe oscylogramy ilustrują podstawowe własności przetworników EMA, takie jak czułość, rozdzielczość, strefa martwa oraz przydatność do wykrywania, lokalizacji i oceny wielkości wad.

Rozdział 7 poświęcony jest przede wszystkim krótkiemu omówieniu wykorzystania laserów do wytwarzania fal ultradźwiękowych. Połączenie źródła laserowego z przetwornikiem odbiorczym EMA jest obecnie uważane za najbardziej perspektywiczny system do bezstykowego wytwarzania i odbioru fal ultradźwiękowych dla celów defektoskopii ultradźwiękowej i ultradźwiękowej techniki pomiarowej.



## ELECTROMAGNETO-ACOUSTIC TRANSDUCERS THEORY AND APPLICATIONS

### Abstract

This monograph deals with a method of noncontact generation and reception of ultrasonic waves, which is called "ElectroMagneto-Acoustic" (EMA), and has been compiled as a result of both literature studies and the author's research and design work. In this method, the coupling between a transmitter or a receiver transducer and an object under test is realized by means of an electromagnetic field, thanks to which no material coupling medium is required - in contrast to conventional ultrasonic probes. The energy of the electromagnetic field is converted to the acoustic energy by means of Lorentz force, magnetic force or the effect of magnetostriction.

The introductory part of this work briefly describes methods of noncontact generation and reception of ultrasonic waves. Then the basic configurations of EMA transducers and the types of ultrasonic waves they can generate are presented. Further parts of the monograph concentrate on the properties of transducers for longitudinal and transverse waves, which are the most commonly used transducers in ultrasonic nondestructive testing and in ultrasonic measurements.

Chapter 2 is an introduction to the issues that relate to theoretical modelling of the electromagneto-acoustic transduction. The basic features of the EMA method are discussed on the assumption that an ultrasonic wave is generated by a plane electromagnetic wave incident onto a metal surface. Such an approach makes it possible to determine the dependence of the transduction efficiency on the physical properties of the material under test, temperature and frequency. Particular attention is given to the effect of substantial increase in the amplitude of longitudinal waves generated in ferromagnetic materials at a temperature near the Curie point. The final part of this chapter presents the theory of EMA reception of plane ultrasonic waves.

Chapter 3 is devoted to the discussion of theoretical models and properties of real EMA transducers, which are composed of a source of a strong steady magnetic field and a winding in the shape of a straight wire, strip, single circular coil, frame, or a meander coil. Particular attention is paid to the transduction efficiency, directivity patterns of the transducers and the lift-off effect, i.e. the dependence of the generated ultrasonic wave amplitude or the received electric signal on the distance between the transducer and the surface of the object under test. A separate part of this chapter deals with the PPM (Periodic Permanent Magnet) transducers, which are capable of generating SH waves that can propagate in a wide range of angle to the normal to the medium surface.

Chapter 4 presents the issues connected with the design of EMA transducers and the electronic systems that are necessary for their operation. The problems discussed in this chapter are mainly based upon the experiences resulting from the author's own work, especially in the sections dealing with pulse transmitters and lift-off compensation.

An overview of the most important applications of EMA transducers is presented in Chapter 5. These applications include noncontact thickness measurement of metal products, nondestructive testing at a high temperature (up to about 1000°C), testing of railway rails and wheels, testing of welds, stress measurement and the measurement of directivity patterns of ultrasonic probes.

Some EMA transducers designed by the author are described in Chapter 6. They include, in particular, a small-size longitudinal wave transducer for testing of nonferromagnetic metals, a transverse wave transducer for testing of steel objects and receiver transducers for directivity pattern measurements. The oscillograms presented in this chapter illustrate the basic features of EMA transducers such as sensitivity, resolution, dead zone and the capability of detecting, locating and sizing of flaws.

Chapter 7 is devoted, most of all, to a short description of the application of lasers to the generation of ultrasonic waves. A hybrid transducer, composed of a laser source and an EMA receiver, is regarded now as the most prospective system for noncontact generation and reception of ultrasonic waves for nondestructive testing of materials and ultrasonic measurements.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA  
Politechniki Śląskiej

P.4474/97/8

Druk. Drukarnia Gliwice, ul. Zwycięstwa 27, tel. 230 49 55