
**XVII Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 8-11 marca 2011**

**SYSTEMY GŁOWIC WIELOPRZETWORNIKOWYCH
- PODSTAWY FIZYCZNE**

Marcin LEWANDOWSKI
IPPT PAN, Warszawa, mlew@ippt.gov.pl

1. WSTĘP

Systemy z głowicami fazowymi wkraczają coraz śmielej do zastosowań w badaniach nieniszczących zastępując klasyczne jednoprzetwornikowe systemy i metody. Podobnie jak w latach 1970 głowice liniowe i fazowe zaczęły wypierać głowice mechaniczne w ultrasonografii medycznej [12]. Z drugiej strony wysokie koszty aparatury i głowic a także nowa metodyka badań spowalnia szeroką popularyzację tej techniki.

Na co dzień pracuję w Zakładzie Ultradźwięków IPPT PAN, gdzie zajmuję się ultradźwiękowymi metodami obrazowymi dla diagnostyki medycznej oraz aparaturą ultradźwiękową (w tym wielokanałową). Organizatorzy Seminarium widząc podobieństwo metod i technik obrazowych stosowanych w ultrasonografii oraz badaniach NDT, zaprosili mnie do przedstawienia tych zagadnień. Faktycznie te same podstawy fizyczne techniki ultradźwiękowej oraz podobna instrumentacja sprawiają, że większość reguł z ultrasonografii medycznej działa w badaniach nieniszczących.

W niniejszym referacie pragnę przedstawić możliwości i ograniczenia systemów z głowicami fazowymi wychodząc od podstaw fizycznych ultradźwięków. Należy podkreślić, że sama fizyka zjawiska determinuje możliwości i ograniczenia badań za pomocą głowic fazowych. Dlatego pewnych zjawisk (np. wiązek bocznych) nie da się uniknąć dla danej głowicy i częstotliwości niezależnie od jakości używanego do badania sprzętu! Mając na uwadze audytorium zorientowane na praktyczne zastosowania nie będę zamieszczał rozbudowanych wyprowadzań wzorów, zamiast tego przedstawię wykresy ukazujące zależności pomiędzy geometrią przetworników a charakterystyką generowanego pola.

1.1. Literatura

Polskojęzyczna literatura dot. zastosowań głowic fazowych jest niestety bardzo skromna. Temat ten pojawiał się już na Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów w latach ubiegłych [5], [6], [7]. Podstawowe definicje dot. głowic fazowych zostały przedstawione w referacie [7], dlatego nie będę ich tutaj powtarzał.

Z nowości w 2010 r. została wydana monografia [8] zawierająca szerokie potraktowanie zagadnień szyków liniowych, w tym głowic fazowych w zastosowaniach medycznych. Książka traktuje szeroko zagadnienia kierunkowości dla głowic liniowych i fazowych ze skanowaniem elektronicznym oraz formowania obrazu z odebranych ech ultradźwiękowych metodami beamformingu i syntetycznej apertury.

Z literatury zagranicznej należy polecić publikacje techniczne firmy Olympus NDT [9], [10], [11], które od niedawna są dostępne nieodpłatnie na stronie: <http://www.olympus-ims.com/en/books>.

Dobry przegląd zagadnień głowic fazowych w zastosowaniach NDT można znaleźć w trzech pracach magisterskich obronionych w MIT [2], [4], [13].

2. GŁOWICE FAZOWE W BADANIACH NIENISZCZĄCYCH

Określenie „głowice fazowe” (ang. Phased Arrays) w badaniach NDT dotyczy pewnego konkretnego wycinka zastosowań ultradźwiękowych przetworników wieloelementowych, technologii elektronicznych ich sterowania oraz cyfrowego przetwarzania sygnałów, na które składa się:

- wieloelementowa głowica ultradźwiękowa (domyślnie głowica liniowa),
- elektroniczne sterowanie wiązką nadawczą (tj. przełączanie sygnałów nadawczych do określonych grup przetworników, nadawanie impulsów wysokiego napięcia z zadanymi opóźnieniami),
- elektroniczne wielokanałowe systemy akwizycji ech ultradźwiękowych (tj. układy wzmacniaczy, przetworniki analogowo-cyfrowe, układy pamięci, transmisja danych do dalszych systemów obliczeniowych),
- cyfrowe przetwarzanie sygnałów ech ultradźwiękowych, które służy do uzyskiwania wyników badania (obrazów, defektów, etc.) z zebranych wielokanałowo sygnałów ech,
- oprogramowanie pomiarowo-kontrolne zapewniające programowanie i sterowanie systemu oraz wizualizację wyników,
- oprogramowanie do symulacji pozwalające na zaprojektowanie badania (tj. sekwencji nadawczych, profili opóźnień, parametrów odbiorczych oraz przetwarzania i rekonstrukcji).

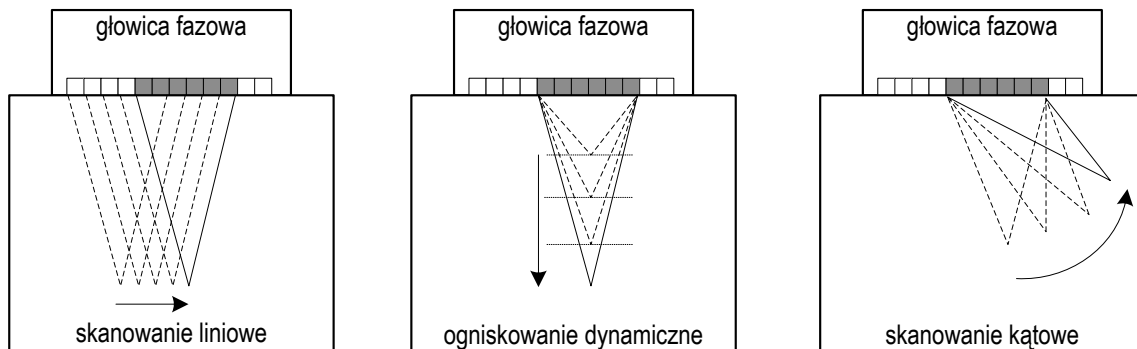
W referacie skupimy się na liniowych głowicach sterowanych fazowo. Teoria takich przetworników (zwanymi także szykami liniowymi) jest dobrze opracowana i stosunkowo łatwa do wyprowadzenia z ogólnych wzorów na pole promieniowania dla pojedynczego elementu. W szczególnych zastosowaniach spotyka się także bardziej egzotyczne układy przetworników, jednak tutaj nie będziemy się nimi zajmować.

2.1. Tryby pracy głowic fazowych

Głowice fazowe NDT są głowicami liniowymi (liniowy układ/szyk przetworników) z możliwością elektronicznego sterowania fazowego sygnałami nadawczymi. Podobnie jak w ultrasonografii głównym zastosowaniem takiej głowicy jest możliwość elektronicznego skanowania badanego obszaru bez konieczności przesuwania głowicy (rys. 1). Ten typ skanowania, zwany liniowym, polega na nadawaniu grupą sąsiadujących elementów zgodnie z zadanym profilem opóźnień, a następnie przesuwaniu (elektronicznie: przełączaniu) grupy o zadaną liczbę elementów. Zastosowanie symetrycznego profilu opóźnień względem elementu środkowego grupy powoduje, że wiązka ultradźwiękowa rozchodzi się po osi wyznaczonej przez element środkowy grupy. Zastosowanie parabolicznego profilu opóźnień pozwala na ogniskowanie wiązki nadawczej na osi w zadanej odległości od przetwornika. Ten typ pracy określa się mianem dynamicznego ogniskowania wiązki nadawczej. Ogniskowanie ma na celu optymalizację rozdzielczości poprzecznej - analogicznie, jak w klasycznych głowicach jednoprzetwornikowych. Możliwość dowolnego sterowania opóźnieniami nadawczymi (niesymetrycznego) pozwala na uzyskanie trzeciego sposobu pracy tzw. skanowania kąтового. W tym przypadku wiązka ultradźwiękowa jest kierowana pod zadanym kątem w stosunku do osi przetwornika.

Wszystkie trzy tryby pracy mogą być ze sobą kombinowane dając w zasadzie nieograniczone możliwości sterowania wiązką ultradźwiękową i skanowania obszaru z jednego przyłożenia głowicy. Możliwości i szybkość sterowania wiązką zależą od posiadanej aparatury, natomiast

kształt uzyskiwanego pola ultradźwiękowego zależy także od badanego materiału, geometrii przetwornika i częstotliwości nadawczej (o czym za chwilę).



Rys. 1. Trzy podstawowe tryby pracy głowic fazowych.

Podsumowując można stwierdzić, że głowica fazowa zachowuje się jak uniwersalna głowica jednoelementowa o następujących cechach:

- Ustalona częstotliwość nadawcza – związana z częstotliwością podstawową głowicy fazowej (dla głowic szerokopasmowych istnieje możliwość pobudzania ich w pewnym zakresie częstotliwości).
- Regulowane ognisko głowicy – w odróżnieniu od głowicy jednoelementowej o ustalonym ognisku głowicę fazową możemy ogniskować na wielu różnych głębokościach (także dynamicznie – tj. w czasie pracy).
- Regulowana apertura (wielkość) przetwornika – zmieniając liczbę przetworników w grupie nadawczej zmieniamy efektywną aperturę przetwornika. Łącząc możliwość zmiany apertury oraz odległości ogniskowej możemy uzyskiwać jednorodne ognisko na różnych głębokościach zachowując stałą liczbę ogniskową (stosunek ogniskowej do apertury).
- Regulowany kąt – możliwość nadawania fali pod zadaniem kątem, zamiast jednego ustalonego jak dla tradycyjnych głowic kątowych.
- Automatyczne skanowanie (przesuwanie) liniowe głowicy w zakresie długości głowicy fazowej.
- Automatyczne skanowanie kątowe.
- Możliwość uwzględnienia/kompensacji niejednorodnej struktury badanej - standardowo zakłada się stałą prędkość fali ultradźwiękowej w badanym ośrodku. Mając do czynienia z obiektami składającymi się z różnych materiałów i znając dokładnie ich wewnętrzny układ możemy obliczyć tak opóźnienia nadawcze żeby uzyskać odpowiedni kształt wiązki w tym heterogenicznym ośrodku.

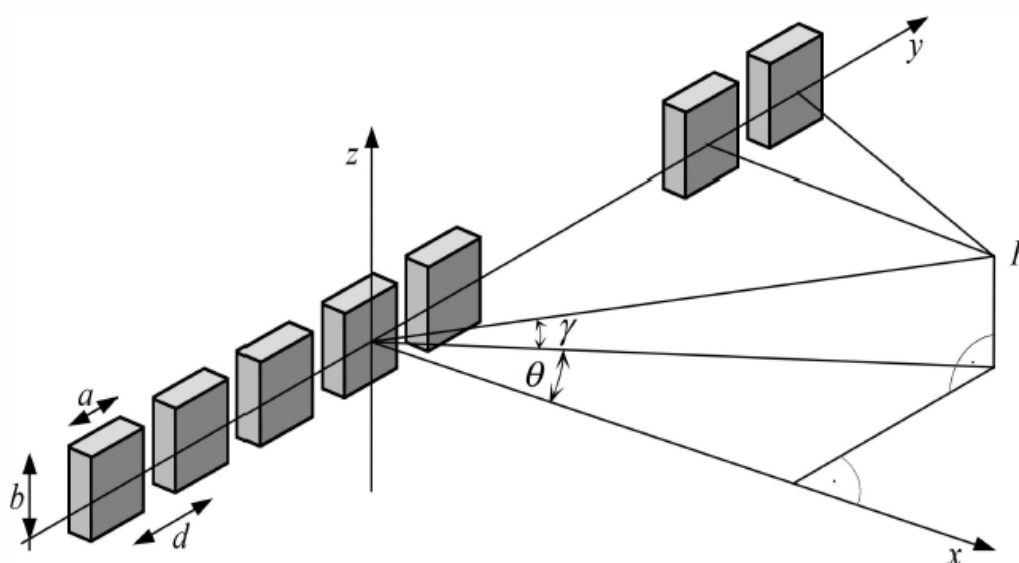
Powyższe cech sprawiają, że systemy z głowicami fazowymi mają następujące przewagi nad systemami z głowicami jednoelementowymi:

- Szybkość i zasięg badania: skanowanie elektroniczne jest wielokrotnie szybsze niż skanowanie mechaniczne. Od jednego przyłożenia głowicy możemy nie tylko przeskanować liniowy obszar pod głowicą, ale także zadany obszar kątowny.
- Elastyczność: elektroniczne sterowanie wiązką powoduje, że system łatwo i szybko można dostosować do określonej geometrii badania. Dodatkowo pojedyncza głowica fazowa dzięki sterowaniu zastępuje wiele różnych głowic jednoelementowych.
- Kąty badania: możliwe są kąty wejścia, które są trudne lub niemożliwe do uzyskania za pomocą standardowych głowic kątowych.

Z drugiej strony należy podkreślić, że klasyczne ograniczenia metod ultradźwiękowych ciągle obowiązują. Możliwość sterowania elektronicznego wiązką ultradźwiękową daje dużą uniwersalność w jej kształtowaniu, ale nie pozwala na ominięcie efektów dyfrakcyjnych (rozbieżności wiązki). Dodatkowo pojawiają się nowe efekty związane z dyskretną naturą przetworników wieloelementowych, które przedstawiono w następnym punkcie.

2.2. Rozkład ciśnienia, kierunkowość dla szyków liniowych

Przedstawione w poprzednim punkcie analogie głowicy fazowej ze sterowaniem elektronicznym do hipotetycznej uniwersalnej głowicy jednoelementowej należy traktować z pewną ostrożnością. Kształt pola ultradźwiękowego od głowic fazowych może istotnie różnić się od odpowiednika jednoprzetwornikowego. Wynika to z faktu, że przetworniki liniowe składają się pojedynczych przetworników rozmieszczonych w pewnych odległościach od siebie (rys. 2).



Rys. 2. Geometria głowicy liniowej (na podstawie [8]).

Taki dyskretny w przestrzeni układ modeluje się jako sumę pól od N pojedynczych elementów o rozmiarach $a \times b$ i odległości między nimi d . Funkcja kierunkowości takiego układu przetworników wyraża się wzorem [8]:

$$(1) \quad D = D_a D_b D_w = \left[\frac{\sin \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}}{\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}} \right] \left[\frac{\sin \frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}}{\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}} \right] \left[\frac{\sin \frac{\pi N d \sin \theta}{\lambda}}{\frac{\pi N d \sin \theta}{\lambda}} \right].$$

Widać, że funkcja ta jest iloczynem funkcji kierunkowości pojedynczego elementu prostokątnego (względem boku a w azymucie i b w elewacji) oraz funkcji kierunkowości całej wielkości głowicy tj. Nd . Periodyczny układ źródeł transformuje się w periodyczny rozkład pola ultradźwiękowego, a liczba i wielkość wiązek zależy od proporcji pomiędzy parametrami geometrycznymi głowicy w stosunku do długości fali. Główna wiązka promieniowania występuje, jak można się domyślać, dla kierunku $\theta=0^\circ$ - tj. na wprost. Kolejne maksima występują gdy D_w przyjmuje wartość 1, czyli:

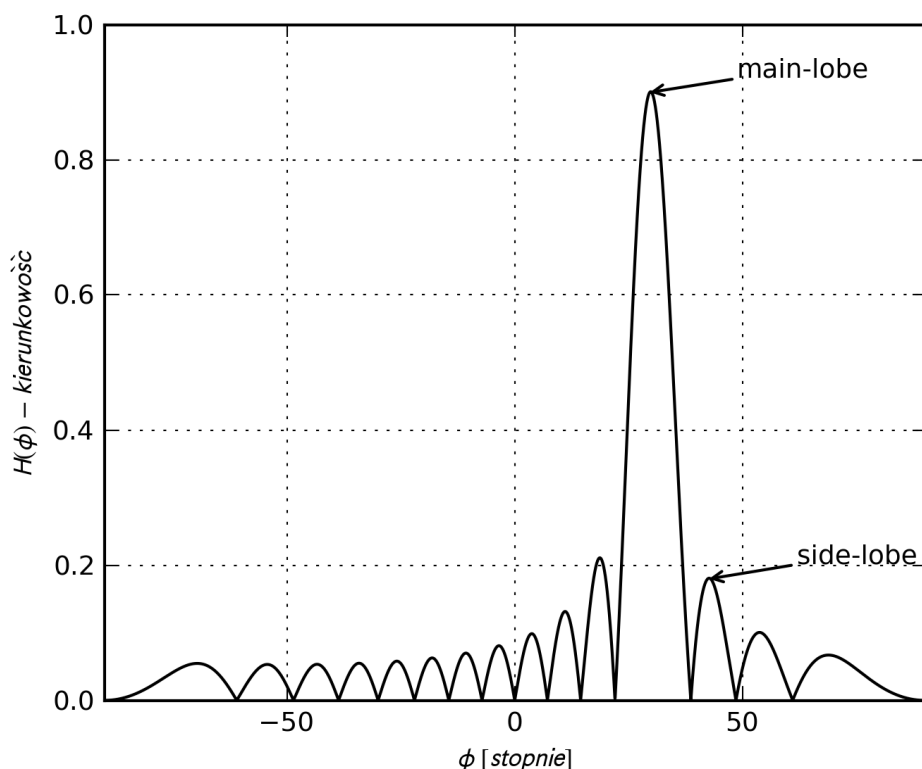
$$(2) \quad \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} = 2\pi n, \quad \sin \theta = \frac{n\lambda}{d}, \quad n = 1, 2, \dots$$

Z powyższego wynika, że jeżeli raster przetworników d jest mniejszy od długości fali λ wiązki boczne nie występują w zakresie kątów $\pm 90^\circ$. W przypadku stosowania odchylenia wiązki warunek (2) musi zostać zastrzony do:

$$(3) \quad d_{kr} = \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{smax}},$$

gdzie θ_{smax} jest maksymalnym zakładanym kątem odchylenia wiązki.

Na rys. 3 i 4 poniżej przedstawiono kształt funkcji kierunkowości w stali dla dwóch głowic fazowych przy odchyleniu elektronicznym wiązki o 30° . Głowice różnią się jedynie odległością między elementową. Dla głowicy spełniającej warunek (3) funkcja kierunkowości wygląda normalnie (rys. 3), natomiast dla głowicy o większym odstępnie między elementami ($d > d_{kr}$) pojawiają się dodatkowe tzw. wiązki boczne (ang. grating lobe) w kącie -30° dla $d = \lambda$ (rys. 4 górny) oraz -10° i -56° dla $d = 1,5\lambda$ (rys. 4 dolny). Należy zrozumieć, że dodatkowo „wygenerowane” wiązki boczne będą brały udział w obrazowaniu przy użyciu tej głowicy. Oznacza to, że nie będziemy w stanie rozróżnić czy wada znajduje się w kącie badania $+30^\circ$, czy w którymś z kątów wiązek bocznych (-30° lub -10° i -56°). Patrząc na wzór wiązek bocznych (rys. 4 dolny) można zauważyć, że ich wielkość i szerokość nie są identyczne z wiązką główną; wiązka boczna na -10° jest nieco większa od wiązki głównej, natomiast ta na -56° jest szersza. Konkretny układ wiązek bocznych będzie zależał nie tylko od parametrów głowicy, ale także od kąta odchylenia wiązki głównej.

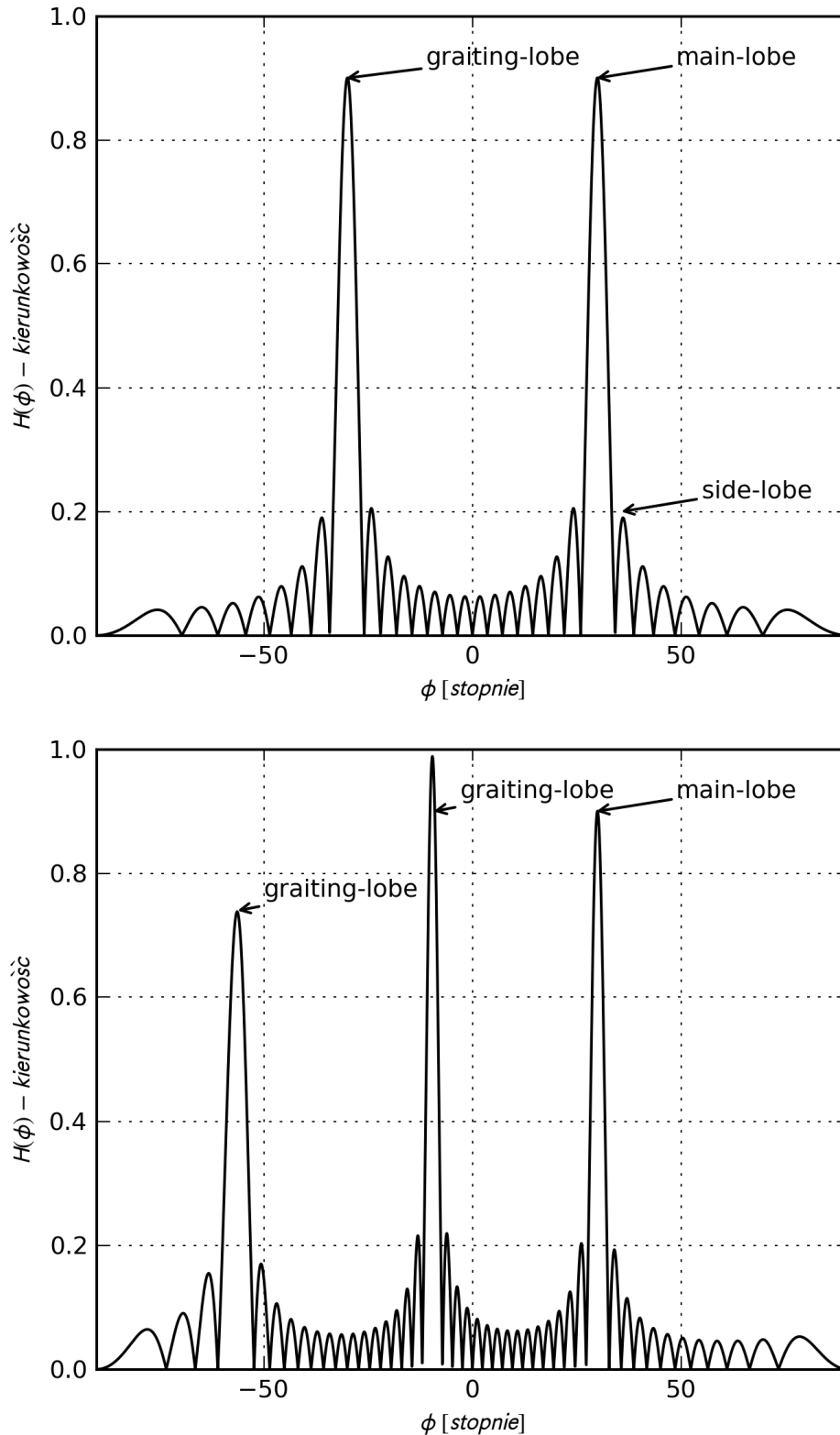


Rys. 3. Funkcja kierunkowości w stali ($c=5850$ m/s) dla 16 elementowej głowicy fazowej:
 $a=\lambda/2$, $d=\lambda/2$, częstotliwość 2 MHz.

Wiązki boczne są nowym fenomenem pojawiającym się w głowicach wieloelementowych i są związane z dyskretną i periodyczną geometrią tych przetworników. Należy podkreślić inną naturę wiązek bocznych od listków bocznych (ang. side lobes), które występują w kształcie pola głowic jednoprzetwornikowych. Listki boczne charakteryzują pole ultradźwiękowe od drgającej przegrody i wynikają z jej kształtu. Dla głowic wieloelementowych na kształt pola

pojedynczego elementu nakłada się kształt efektywnej apertury głowicy (równanie (1)) tworząc pole wynikowe.

Liczba wiązek bocznych pojawiających się w horyzoncie obrazowania zależy od stosunku odległości między elementami do długości fali ultradźwiękowej i może wynosić 0, 1 lub więcej.

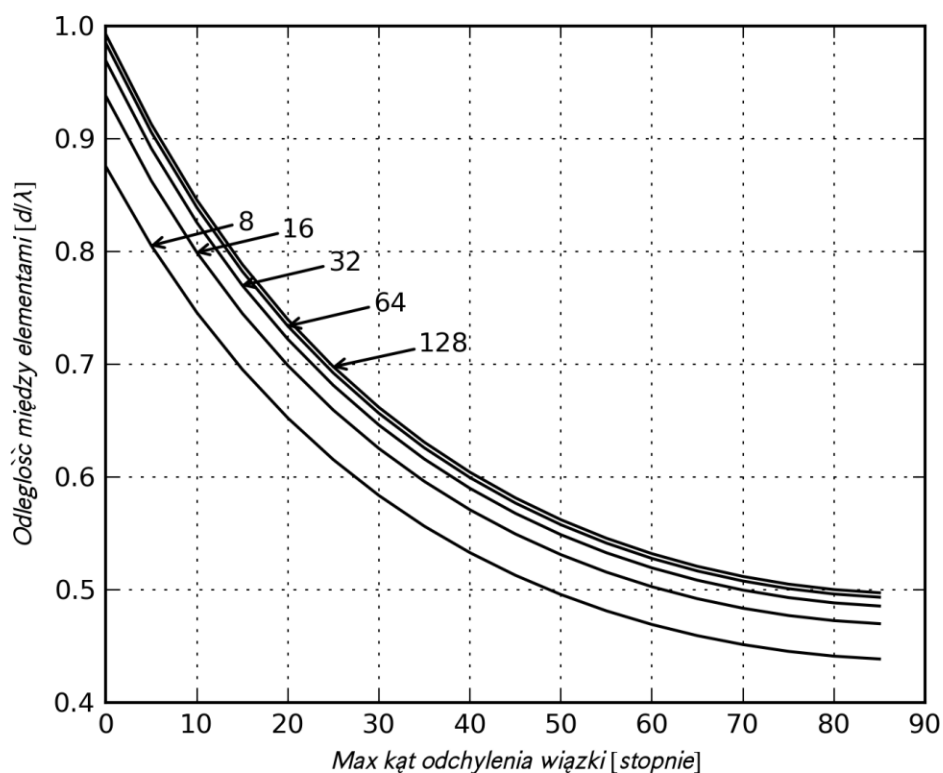


Rys. 4. Funkcja kierunkowości w stali ($c=5850$ m/s) dla 16 elementowej głowicy fazowej o częstotliwości 2 MHz, wiązka odchylona o 30° : (górny) $a=\lambda/2$, $d=\lambda$, (dolny) $a=\lambda/2$, $d=1,5\lambda$.

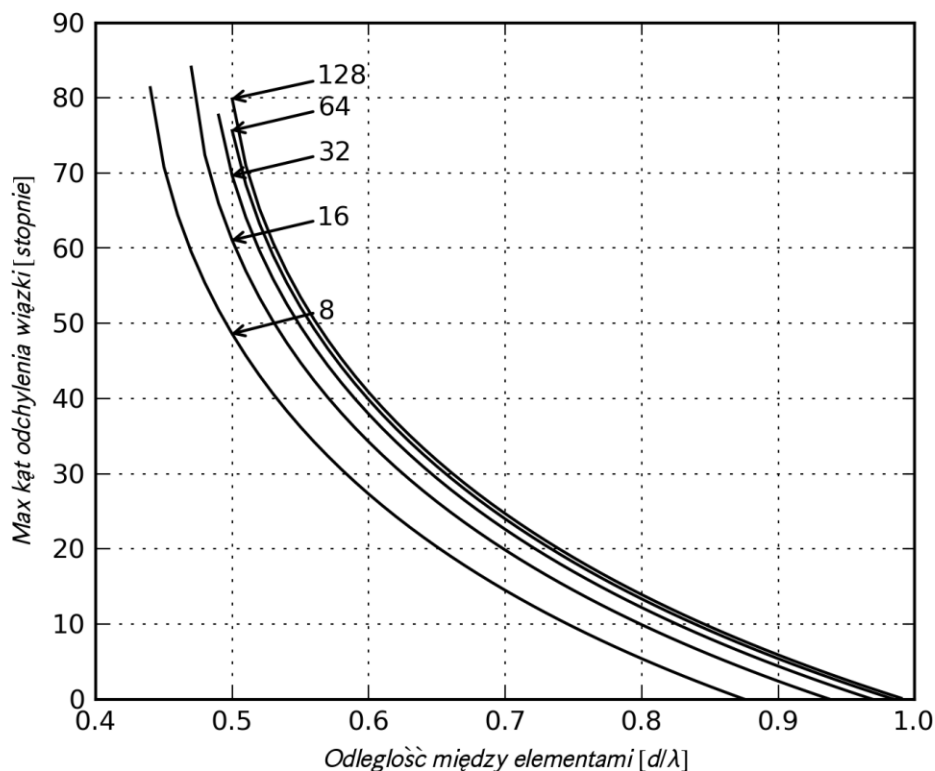
Elektroniczne odchylenie wiązki ma dodatkowy wpływ na kształt uzyskiwanego pola. Jak to już wcześniej powiedziano kształt pola głowic fazowych zależy od odległości między elementami. Intuicyjnie można to zrozumieć patrząc na odległości między przetwornikami widziane przy patrzeniu na sztyk liniowy pod kątem równym odchylonej wiązce.

Na rys 5 przedstawiono wykres zależności krytycznej odległości między elementowej (d_{kr}) w zależności od maksymalnego kąta odchylenia wiązki dla głowic z różną liczbą elementów. Oś pionowa została wyrażona w wielkości bezwymiarowej d_{kr}/λ , czyli krytycznej odległości między elementami liczonej w długościach fali ultradźwięków (ten sposób prezentacji uniezależnia nas od konkretnej prędkości w ośrodku). Z wykresu można odczytać, że krytyczna odległość (tj. taka przy której nie występują wiązki boczne) między elementami głowicy fazowej dla wiązki bez odchylenia (0°) zawiera się w przedziale od ok. $0,85 \lambda$ (dla 8 elementów) do $1,0 \lambda$ (dla 128 elementów). Dla typowej wielkości odchylenia wiązki 70° odległości między elementami muszą już wynosić poniżej $0,5$ długości fali, żeby uniknąć wiązek bocznych. O ile dla stali (5850 m/s) i częstotliwości 1 MHz $\lambda=5,85 \text{ mm}$ wytworzenie głowicy spełniającej te warunki nie jest problemem, to już dla częstotliwości 10 MHz $\lambda=0,585 \text{ mm}$ jest już pewnym wyzwaniem technologicznym.

Wykres na rys 6 prezentuje te same dane, ale z innej perspektywy – przedstawiono zależność maksymalnego kąta odchylenia wiązki przy którym nie obserwujemy wiązek bocznych dla zadanej odległości między elementowej i liczby elementów głowicy.

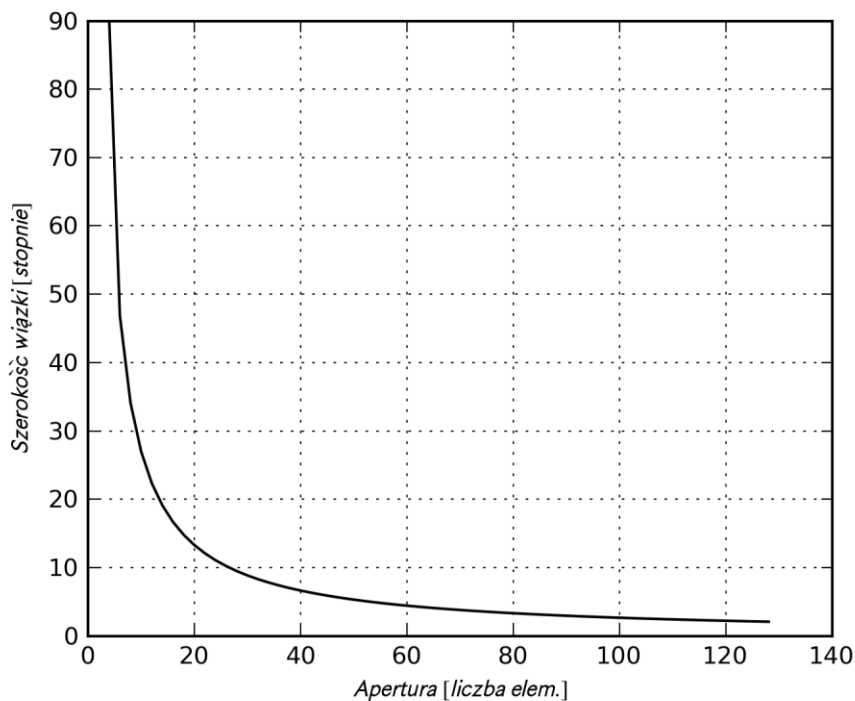


Rys. 5. Wykres maksymalnej odległości między elementami głowicy fazowej w zależności od maksymalnego kąta odchylenia wiązki oraz liczby elementów.



Rys. 6. Wykres maksymalnej kąta odchylenia wiązki w zależności od odległości między elementami oraz liczby elementów głowicy.

Kolejną kwestią jest szerokość wiązki (kierunkowość) uzyskiwana dla głowic fazowych. Na rys. 7 pokazano przykładową zależność szerokości wiązki w stali dla głowicy $a=\lambda/2$, $d=\lambda/2$ o częstotliwości 2 MHz i wiązki odchylonej o 30° .



Rys. 7. Funkcja szerokości wiązki głównej w zależności od liczby elementów nadawczych (apertury): w stali ($c=5850$ m/s) dla głowicy fazowej: $a=\lambda/2$, $d=\lambda/2$, częstotliwość 2 MHz, wiązka odchylona o 30° .

Widoczna jest silna zależność od liczby elementów w zakresie do ok. 16 elementów, dalsze zwiększanie liczby elementów nie skutkuje znaczącym zyskiem – tj. zmniejszeniem szerokości wiązki. Asymptotycznie szerokość wiązki dąży do zera dla nieskończonej liczby elementów, co jest zgodne z teorią przetworników jednoelementowych. Podobnie jak dla klasycznych przetworników jednoelementowych czym większa apertura przetwornika tym węższa wiązka. Zwiększanie liczby przetworników głowicy wiąże się z większymi kosztami samej głowicy oraz aparatury sterującej. Dla ustalonej liczby elementów przetwornika metodą zwiększenia jego apertury (a tym samym zwiększenia kierunkowości) jest zwiększenie odległości między elementami. Z drugiej strony pamiętamy, że zbyt duża ta odległość powoduje pojawienie się wiązek bocznych.

4. PODSUMOWANIE

Metody i aparatura systemów z głowicami fazowymi wcześniej czy później zastąpi klasyczne badania defektoskopowe głowicami jednoprzetwornikowymi. Duże możliwości tych metod idą niestety w parze ze złożonością aparatury i metodologii badań. Zrozumienie podstawowych zasad fizycznych rządzących tworzeniem pola przetworników wieloelementowych jest pierwszym krokiem do świadomego ich stosowania w aplikacjach. Referat miał na celu pokazanie, że z jednej strony głowice fazowe można opisywać terminami znanymi dla głowic jednoelementowych, co ułatwia ich zrozumienie, z drugiej jednak strony pojawiają się nowe zjawiska, które modyfikują funkcje kierunkowości i wprowadzają ograniczenia.

Ogólne zasady dotyczące parametrów przetworników wieloelementowych można podsumować następująco [13]:

- Zwiększanie liczby przetworników głowicy podnosi jakość wytwarzanej wiązki ultradźwiękowej, niestety wiąże się to z kosztem samej głowicy oraz systemu elektronicznego jej sterowania. Głowice 16 elementowe wydają się być dobrym kompromisem pomiędzy jakością a kosztem.
- Zwiększanie odległości między elementami powoduje zwiększanie kierunkowości generowanej wiązki. Należy jednak pamiętać o warunkach na krytyczną odległość powyżej której pojawiają się wiązki boczne. W zastosowaniach z ograniczonymi kątami odchylenia wiązki można stosować głowice o większym rozstawie elementów.
- Dla głowic o liczbie elementów co najmniej 8 z odległością między elementami mniejszą niż $0,45 \lambda$ mamy zagwarantowany brak wiązek bocznych przy sterowaniu wiązką w pełnym zakresie ($\pm 90^\circ$). Dla mniejszych kątów odchylenia warunk ten można osłabić – patrz wykres na rys. 5.
- Pojawienie się wiązek bocznych powoduje niejednoznaczność badania, gdyż poza echemi otrzymanymi z wybranego kierunku badania widzimy jednocześnie echa z kierunku wiązki bocznej. Mogą istnieć jednak sytuacje kiedy obecność wiązek bocznych nie wpływa na badanie – np. gdy wiązka boczna patrzy w kierunku, w którym nie ma żadnych wad. Oprogramowanie do projektowania badań dla systemów z głowicami fazowymi pomaga w zasymulowaniu tego typu przypadków.

Podziękowania

Badania współfinansowane ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, nr projektu: POIG.01.03.01-14-012/08-00.

LITERATURA

- [1] Azar L., Shi Y., Wooh S.C., Beam focusing behavior of linear phased arrays, *NDT&E International* 33:189–198, 2000.
- [2] Azar L., *Ultrasonic Phased Arrays for the Condition Assessment of Concrete Structures*, Massachusetts Institute of Technology Dept. of Civil and Environmental Engineering, 1998.
- [3] Banerjee S. K, Farlow K. A., An Introduction to Beamforming and Spatial Filtering for Radar or Sonar Sensor Arrays, Web: www.duke.edu/~kaf3/works/beamform.ps, 2007.
- [4] Clay A. C., *Development and Experimental Characterization of Ultrasonic Phased Arrays for Nondestructive Evaluation*, Massachusetts Institute of Technology Dept. of Civil and Environmental Engineering, 1998.
- [5] Ignaszak Z., Bobrowski P., Ciesiółka J., Phased Array w odlewnictwie nowe możliwości identyfikacji nieciągłości, XVI Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów Zakopane, 9-12 marca 2010.
- [6] Kopeć A., Bobrowski P., Doświadczenia z wykorzystania ultradźwiękowej techniki phased array w diagnostyce urządzeń energetycznych, XV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 10-13 marca 2009.
- [7] Manaj W., Sychalski W., Kurzydłowski K. J., Wieloprzetwornikowe głowice ultradźwiękowe, XV Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 10-13 marca 2009.
- [8] Nowicki A., *Ultradźwięki w medycynie*, IPPT PAN, 2010.
- [9] Olympus NDT, *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications*, Olympus NDT Advanced Practical NDT Series, 2007.
- [10] Olympus NDT, *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline*”, Olympus NDT, 2004.
- [11] Olympus NDT, *Phased Array Testing: Basic Theory for Industrial Applications*, Olympus NDT, 2010.
- [12] Woo J., A short History of the development of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology, Web: <http://www.ob-ultrasound.net>.
- [13] Yijun S., *Modeling of acoustic waves for linear phased arrays*, Massachusetts Institute of Technology Dept. of Civil and Environmental Engineering, 1998.