

dr Yuriy Tasinkevych

Autoreferat  
**dorobek i osiągnięcia naukowe**

### **1) Imię i Nazwisko**

Yuriy Tasinkevych (Jurij Tasinkiewicz)

### **2) Posiadane dyplomy, stopnie naukowe oraz tytuł rozprawy doktorskiej**

- 1999 rok – tytuł zawodowy magistra elektroniki i telekomunikacji na Wydziale Radiotechniki Uniwersytetu Państwowego „Politechnika Lwowska”; tytuł pracy magisterskiej „Modelowanie pól defektów powierzchniowych materiałów przewodzących w rekonstrukcji obrazów defektoskopowych”; promotor pracy magisterskiej doc. Y. G. Prytulyak.
- 2004 rok – stopień doktora nauk technicznych, dyscyplina informatyka, uzyskany w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk; tytuł rozprawy doktorskiej „Efektywność numeryczna metod obliczania widma ładunku przetworników międzypalczastych”; promotor dysertacji prof. dr hab. inż. Eugeniusz Danicki.

### **3) Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych**

- 2000-2003 doktorant w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie
- 2003-2004 asystent w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie
- Od 2004 adiunkt w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie

### **4) Osiągnięcia wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz 595 z późn. zm.)**

#### **a) autor, rok wydania, tytuł publikacji, nazwa wydawnictwa**

Y. Tasinkevych, Electrostatic methods in analysis of acoustic beam-forming structures, IPPT reports on fundamental Technological Research, 3/2012, Warszawa, ISSN 2299-3657, ISBN 978-83-89687-78-4

#### **b) omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

### **Wprowadzenie**

Zagadnienia generacji i rozpraszania fal akustycznych poprzez planarne układy przetworników akustycznych mają istotne znaczenie techniczne w elementach funkcjonalnych z falą powierzchniową dla radioelektroniki (z zakresu piezoelektroniki i techniki mikrofalowej), diagnostyki ultradźwiękowej oraz nieniszczących badań ultradźwiękowych. Stąd zasadnicze znaczenie ma dogłębna analiza oraz modelowanie zjawisk falowych bezpośrednio dotyczących nowoczesnych metod formowania wiązki (ang. beam-forming), które wykorzystywane są w wielu zastosowaniach technicznych, między innymi w systemach radarowych, sonarach, czy, jak wspomniano wyżej, w diagnostyce medycznej oraz, według

współczesnych trendów, w badaniach nieniszczących materiałów i konstrukcji. W ultrasonografii do kształtowania wiązki akustycznej szeroko stosowane są systemy w postaci różnorodnych szyków przetworników jedno lub dwuwymiarowych. Ze względu na swoje pożądane własności, którymi są możliwości szybkiego i precyzyjnego sterowania i dynamicznego ogniskowania wiązki ultradźwiękowej poprzez zadanie odpowiednich amplitud i faz sygnałów sterujących poszczególne elementy, szyki te znajdują coraz szersze zastosowania w porównaniu do zwykłych jednoelementowych przetworników. Oprócz tego, zastosowanie szyków przetworników wraz z dynamicznie rozwijającymi się w ostatnich latach technikami oraz algorytmami przetwarzania i obróbki sygnałów pozwala uzyskiwać wysokiej jakości obrazowanie obiektów badań w czasie rzeczywistym. Tu należy nadmienić zwłaszcza metody syntetycznej apertury które są coraz częściej stosowane w połączeniu z takimi przetwornikami wieloelementowymi do uzyskania obrazowania wysokiej rozdzielczości. Ogromne możliwości tej techniki przyciągają duże zainteresowanie naukowe o czym świadczy znaczna liczba publikacji w czasopiśmie naukowych i materiałach konferencyjnych.

W literaturze wśród dużej ilości metod modelowania wieloelementowych przetworników ultradźwiękowych można wyróżnić dwa najczęściej stosowane, w pewnym sensie pokrewne, aczkolwiek zasadniczo różniące się podejścia. Do pierwszej grupy należą metody skupiające się na modelowaniu charakterystyki kierunkowości szyków przetworników [1,2] wychodząc z teorii sygnałów przestrzennych wytworzonych przez przetwornik w aproksymacji bez analizy drgań i teorii pola. Na przykład, w pracy [1] autorzy stosują wzór dla ciśnienia źródła punktowego oraz zasadę Huygensa do wyznaczenia promieniowania pojedynczego elementu o skończonej szerokości dla przypadku jednowymiarowego szyku liniowego. Wyniki obliczeń charakterystyki kierunkowości są stosowane przez autorów do opracowania sterowania elementami przetwornika. Z kolei w pracy [2] autorzy stosują tak zwaną metodę rozłożonych źródeł punktowych do modelowania ciśnienia akustycznego pola ultradźwiękowego przez fazowany szyk liniowy przetworników. Metoda polega na dyskretyzacji aktywnej powierzchni przetwornika i przedstawieniu jej w postaci szyku źródeł punktowych, z których każde nadaje sygnał o zadanej amplitudzie i fazie. Sygnał sumaryczny jest superpozycją sygnałów poszczególnych źródeł punktowych. Takie metody określimy nazwą „teorio-sygnałową”.

Metoda modelowania charakterystyki kierunkowości, jak sama nazwa mówi, pozwala obliczać kształt akustycznego pola falowego szyku przetworników ultradźwiękowych, w ogólnym zarysie ujmując zagadnienie listków bocznych oraz szerokości głównego listka funkcji kierunkowości, która służy do oceny poprzecznej rozdzielczości całego systemu zobrazowania. Jednak metoda ta nie jest w stanie obliczyć ilościowy wpływ rzeczywistych modów drgań przetworników na końcowy syntezy obraz, ani ująć zależności energetycznych, np. skuteczności przetwarzania wpływającej na poziom szumów.

Odmiana tej metody modelowania, którą można określić metodą optyki geometrycznej, bazuje się na analizie funkcji rozmycia punktowego (ang. Point Spread Function, skrót PSF) [3,4] dla systemu zobrazowania (układ gromadzenia danych oraz algorytm rekonstrukcji w nim zaimplementowany), która jest odpowiedzią systemu na działanie punktowego rozpraszacza. Na przykład, w pracy [3] autorzy wyprowadzają analityczny wzór na funkcję rozmycia punktowego i stosują go do optymalnego wyboru wag elementów szyku liniowego z uwzględnieniem kryterium maksymalnego stosunku sygnał-szum. Z kolei w pracy [4] opracowano dyskretny model w dziedzinie czasowej systemu zobrazowania ultrasonograficznego z zastosowaniem metody syntetycznej apertury i uwzględnieniem skończonych wymiarów elementów szyku. Na podstawie tego modelu opracowano również algorytm pozwalający na uwzględnienie i kompensację poprzez dekonwolucję (ang. deconvolution) funkcji rozmycia punktowego

dla danego systemu. Algorytm polega na zastosowaniu czasoprzestrzennej filtracji sygnału dla każdego punktu obrazowania przy czym charakterystyka filtra jest dopasowana do funkcji rozmycia, która powinna być zadana a priori dla danego kształtu elementu szyku liniowego.

Przy modelowaniu działania sytemu zobrazowania, bez względu na metodę, konieczna jest analiza promieniowania pojedynczego elementu szyku. Istnieje wiele metod modelowania pojedynczego przetwornika spośród których warto wymienić najczęściej stosowane, bazujące się na metodzie elementów skończonych (MES) [5] czy zasadzie Huygensa [6]. Pierwsza grupa metod pozwala przeprowadzać symulacje numeryczne zarówno efektów elektro-mechanicznych w samym elemencie jak i promieniowanego przez niego pola akustycznego w otaczającym ośrodku. Na przykład w pracy [7] autorzy stosując metodę MES przeprowadzają obliczenia pola w ośrodku akustycznym generowanego poprzez zadane napięcia elektryczne na powierzchni przetwornika piezokompozytowego. Z reguły metody oparte o MES są bardzo czasochłonne, jednak pozwalają modelować przetworniki o dowolnej konfiguracji geometrycznej, jak również pozwalają uzyskać rozkłady pola w polu bliskim przetwornika oraz modelować efekty przesłuchu między elementami szyku. W metodach stosujących zasadę Huygensa pole akustyczne przetwornika jest superpozycją działania źródeł punktowych (w przypadku modelowania 3-D) lub liniowych (w przypadku 2-D) rozłożonych na powierzchni przetwornika. W tej metodzie istotna jest znajomość rozkładu źródeł na powierzchni elementu. Zazwyczaj, przy modelowaniu szyków przetwornikowych często przyjmuje się iż rozmiar elementu jest dostatecznie mały i obliczanie rozkładu pola akustycznego przeprowadza się dla strefy dalekiej. Wtedy dla przypadków przetworników o prostych kształtach w łatwy sposób można wyprowadzić wyrażenie dla pola promieniowania w postaci analitycznej. W przypadku 3-D pojedyncze przetworniki są modelowane w postaci okrągłych lub prostokątnych źródeł promieniowania, z kolei w przypadku 2-D stosowane są źródła w postaci nieskończenie długich pasków. Za pomocą funkcji kierunkowości wtedy wyznacza się zależność intensywności pola akustycznego od kąta obserwacji w strefie dalekiej. W rzeczywistości złożoność obliczeń jest tak ogromna, że dotąd nie przedstawiono zadowalających rezultatów dla większych, praktycznych struktur.

Wspólną cechą wspomnianych wyżej metod jest to iż opisują one działania szyków przetworników ultradźwiękowych w ujęciu teorio-sygnałowym. Bez wątpienia, wzajemne oddziaływanie elementów szyku liniowego oraz rozpraszanie braggowskie (znane w radiolokacyjnych szykach antenowych), które w takich strukturach występuje, w pewien sposób będą zniekształcać odpowiedź szyku liniowego w przypadku detekcji fali padającej. Dlatego istotne jest opracowanie nowych metod modelowania szyków przetworników akustycznych, które pozwoliły by rozwiązać powyższych trudności.

Głównym celem rozprawy habilitacyjnej jest przede wszystkim rozwinięcie i uogólnienie metod stosowanych w elektrostatyce układów planarnych do analizy zagadnień teorii generacji i detekcji fal akustycznych – zagadnień formowania wiązek falowych z zastosowaniem liniowych szyków przetwornikowych. W szczególności, omawiane metody pozwalają na pełnofalową analizę mieszanego zagadnienia brzegowego dla periodycznego oraz nieperiodycznego (o skończonej ilości elementów) liniowego szyku przetworników akustycznych, które są powszechnie stosowane w liniowych głowicach ultradźwiękowych. Cechą niezwykle ważną opracowanych metod jest to iż pozwalają one uzyskać rozwiązanie zagadnienia brzegowego bezpośrednio w dziedzinie widma przestrzennego (mianowicie, rozwiązanie dla przestrzennego widmo rozkładu ciśnienia akustycznego w płaszczyźnie elementów promieniujących/detekujących), dalej pozwala obliczyć funkcję kierunkowości dla analizowanych struktur kształtujących wiązkę akustyczną.

Oprócz tego, uogólnienie i skuteczne zastosowanie metod elektrostatyki do analizy zagadnień teorii rozpraszania fal elektromagnetycznych na periodycznych strukturach falowodowych jest innym ważnym celem szczegółowo omówionym w pracy habilitacyjnej, co pokazuje uniwersalność oraz przydatność owych metod elektrostatyki do modelowania szerokiego wachlarza zjawisk falowych różnej natury fizycznej.

### **Metody elektrostatyki**

Rozdział 2 przedstawionej monografii zawiera szczegółowy opis metod elektrostatyki planarnych układów przewodzących elektrod o infinitezymalnej grubości (tak zwane przewodzące paski), które to metody są w dalszej części pracy uogólniane i rozwijane do celów modelowania struktur kształtujących wiązkę akustyczną. W przypadku periodycznych układów pasków o dowolnym zadanym pobudzeniu (potencjał elektrycznych poszczególnych pasków lub rozkład ładunku na paskach) rozwiązanie dla przestrzennego widma rozkładu ładunku elektrycznego w płaszczyźnie elektrod uzyskuje się poprzez stosowanie tak zwanej metody rozkładu BIS (skrót od nazwisk autorów - **B**lotekjoer, **I**ngebrigtsen oraz **S**keie) [8]. Metoda ta była stosowana po raz pierwszy w analizie zagadnienia elektrostatyki periodycznych elektrod na powierzchni półprzestrzeni piezoelektrycznej, które jest elementem teorii przetworników międzypalczastych szeroko stosowanych w urządzeniach z akustyczną falą powierzchniową. Polega ona na odpowiedniej reprezentacji składowych pola elektrycznego w płaszczyźnie elektrod przez pewien szybko zbieżny szereg Fouriera ze współczynnikami wyrażonymi poprzez odpowiednio dobrane wielomiany Legendre'a, opisującymi odpowiednie osobliwości pola na brzegach pasków. W efekcie końcowym, stosując przybliżenie rozkładu BIS, polegające na tym iż przenikalność dielektryczna jako funkcją zmiennej widma przestrzennego dąży do pewnej wartości granicznej, zagadnienie sprowadza się do rozwiązywania skończonego układu równań liniowych dla nieznanymi współczynników rozkładu BIS.

W przypadku nieperiodycznych układów przewodzących pasków (generalnie o różnej szerokości oraz odstępach pomiędzy nimi) rozwiązanie zagadnienia elektrostatyki w dziedzinie widma przestrzennego można uzyskać stosując tak zwaną metodę 'funkcji generujących', opisaną szczegółowo w pracy [9]. Polega ona na wykorzystaniu specjalnych tak zwanych funkcji 'generujących' rozwiązanie w dziedzinie widma przestrzennego, które są wielokrotnymi splotami funkcji Bessela pierwszego rodzaju, rzędu zerowego oraz pierwszego. Reprezentacje przestrzenne owych funkcji są rozwiązaniami cząstkowymi rozpatrywanego mieszanego zagadnienia elektrostatycznego, spełniającymi warunki brzegowe w płaszczyźnie elektrod oraz warunek zanikania pola w nieskończoności. Ogólne rozwiązanie jest superpozycją owych funkcji 'generujących' ze współczynnikami o wartościach rzeczywistych, które dla zadanych warunków na elektrodach (potencjał lub ładunek elektryczny) mogą być w sposób jednoznaczny wyznaczone poprzez rozwiązanie skończonego układu równań liniowych wynikającego z praw Kirchhoffa.

Warto podkreślić, iż w klasycznym ujęciu problem elektrostatyczny jest formułowany dla składowych pola elektrycznego, lub dla potencjału elektrostatycznego, spełniającego równanie Laplace'a oraz warunki brzegowe na powierzchni elektrod przewodzących (wraz z warunkiem zachowania pola w nieskończoności). Rozwiązanie problemu pozwala uzyskać przestrzenny rozkład składowych pola elektrycznego oraz rozkład ładunku elektrycznego na powierzchni elektrod [10]. Inne podejście bazuje na teorii funkcji zespolonych stosowanych do rozwiązywania zagadnień elektrostatyki dla skończonego planarnego układu przewodzących pasków. Problem sprowadza się do mieszanego zagadnienia brzegowego dla półpłaszczyzny w teorii funkcji holomorficzych [11]. Rozwiązanie tego problemu

pozwała uzyskać przestrzenne rozkłady składowych pola elektrycznego. Aczkolwiek w zastosowaniach inżynierskich przy modelowaniu na przykład przetworników akustycznych fal powierzchniowych w przybliżeniu elektrostatycznym [12] pierwszorzędne znaczenie ma nie sam rozkład przestrzenny składowych pola lub ładunku elektrycznego lecz znajomość ich widma przestrzennego. Ze względu na osobliwości przestrzennego rozkładu ładunku w płaszczyźnie elektrod, dokładne obliczenie przestrzennego widma za pomocą algorytmów FFT (szybka transformata Fouriera) jest skomplikowane i obarczone błędami numerycznymi przez co mało przydatne w zastosowaniach.

Podsumowując, metody spektralne, omówione w Rozdziale 2 monografii, w odróżnieniu od wspomnianych wyżej tradycyjnych metod stosowanych w literaturze, pozwalają z kolei uzyskać bezpośrednio rozwiązanie dla przestrzennego widma ładunku elektrycznego w płaszczyźnie elektrod. Przestrzenny rozkład ładunku lub rozkład potencjału elektrycznego w płaszczyźnie elektrod może być łatwo obliczony numerycznie stosując algorytm FFT do celów weryfikacji otrzymanych rozwiązań poprzez porównanie uzyskanych oraz zadanych wartości powyższych wielkości fizycznych. Uniwersalność omawianych metod spektralnych pozwala skutecznie uogólnić i rozwinąć je do celów analizy zagadnień kształtowania pola falowego w teorii generacji oraz detekcji fal akustycznych poprzez planarne układy przetworników. Tym zagadnieniem poświęcony jest Rozdział 3 rozprawy habilitacyjnej.

### **Metody elektrostatyki w zagadnieniach kształtowania wiązki akustycznej**

W typowej głowicy wieloelementowej o szyku liniowym małe przetworniki akustyczne (elementy piezoelektryczne o kształcie prostokątnym) umieszczone są wzdłuż linii prostej i są od siebie mechanicznie oraz elektrycznie odizolowane poprzez warstwę materiału o odpowiednich własnościach (na przykład często stosowane żywice epoksydowe). Ze względu na znaczną różnicę własności mechanicznych (jak na przykład twardość) materiałów sąsiadujących elementów zachodzi zjawisko rozpraszania braggowskiego gdy taki wieloelementowy szyk znajduje się w polu padającej fali akustycznej. Jak wspomniano wcześniej, w literaturze spotykane są głównie teorio-sygnałowe metody analizy, w których efekty te są pomijane. Pole promieniowania takiego dyskretnego w przestrzeni układu przetworników modeluje się jako sumę pól pojedynczych elementów bez uwzględnienia ich wzajemnego oddziaływania. Często dla uproszczenia obliczeń zakłada się dla pojedynczego elementu model źródła punktowego. Przy dokładniejszym modelowaniu pole promieniowania szyku liniowego oblicza się jako sumę pól generowanych przez niezależnie drgające sztywne paski (sztywne przegrody albo ekrany akustyczne) [12]. Ogniskowanie i sterowanie wiązki akustycznej odbywa się poprzez zadanie amplitud i faz pobudzenia poszczególnych elementów szyku. W przypadku detekcji fal akustycznych formowanie sygnału odbiorczego wieloelementowego szyku przetworników odbywa się poprzez ważne sumowanie z odpowiednio dobranymi fazami (opóźnieniami) sygnałów niezależnie zarejestrowanych przez pojedyncze jego elementy. W przedstawionej rozprawie habilitacyjnej podobny periodyczny układ sztywnych przegród (ekranów) umieszczonych na powierzchni osrodka akustycznego jest rozpatrywany jako model wieloelementowego akustycznego liniowego szyku przetwornikowego. Dla takiego planarnego układu zagadnienie generacji oraz rozpraszania fali akustycznej zostało sformułowane w postaci mieszanego problemu brzegowego: normalna składowa prędkości akustycznej zanika na powierzchni sztywnych przegród [13], a pomiędzy przegrodami zanika ciśnienie akustyczne lub, jak w przypadku zagadnienia generacji fali akustycznej, przyjmuje zadane stałe wartości [14]. Generacja fali poprzez równomierny, harmoniczny w czasie, rozkład ciśnienia nie jest nowością i jej analiza jest często spotykana w literaturze, jak na przykład w pracy [15]. W przypadku zagadnienia rozpraszania, ciśnienie

wywarłe poprzez pole fali padającej oraz pole rozproszone na pojedynczą przegrodę (sztywny pasek) modeluje sygnał odpowiedzi elementu szyku liniowego.

Warto podkreślić, że przy rozwiązywaniu podobnego zagadnienia w sformułowaniu klasycznym podstawowe znaczenie ma wyznaczenie pola fali odbitej oraz fali przechodzącej. Na przykład, w pracy [16] zagadnienie brzegowe dla periodycznego układu analizowano, co poprzez zastosowanie twierdzenia Green'a sprowadza się do rozwiązywania pewnego osobliwego równania całkowego. W tym celu, używając metody Galerkina i rozwijając nieznaną wielkość (potencjał akustyczny) w szereg wielomianów Czebyszewa ostatecznie problem sprowadza się do rozwiązania układu równań liniowych. Pole rozproszone wyraża się poprzez superpozycję nieskończonej liczby harmonicznych przestrzennych.

Podstawowym celem rozprawy habilitacyjnej jest opracowanie metod ścisłej analizy pełno-falowej wspomnianego mieszanego zagadnienia brzegowego dla układu sztywnych przegród (ekranów) modelujących wieloelementowy szyk przetworników akustycznych pod kątem jego zastosowań w problemach kształtowania pola falowego. Mianowicie, skuteczne narzędzia dostarcza tu opracowana i omówiona wcześniej teoria elektrostatyki układów planarnych. W Rozdziale 3 rozprawy habilitacyjnej przedstawiono rozwinięcie oraz uogólnienie metod elektrostatyki do celów analizy zagadnień generacji oraz rozpraszania fal akustycznych poprzez układy sztywnych przegród. Osobno omówione są przypadki nieskończonego periodycznego układu sztywnych przegród (ekranów) oraz nieperiodycznego układu zawierającego skończoną liczbę elementów (generalnie o różnej szerokości oraz odstępach między nimi). W przypadku periodycznego układu do rozwiązywania zagadnienia generacji oraz rozpraszania fali akustycznej opracowano uogólnioną metodę rozkładu BIS do reprezentacji złożonego pola falowego na powierzchni ośrodka akustycznego poprzez rozwinięcie składowych pola w szybkie szeregi Fouriera. Z kolei amplitudy przestrzennych harmonicznych przedstawione są w postaci szeregów odpowiednio dobranych wielomianów Legendre'a, co pozwala spełnić warunki brzegowe oraz uwzględnić zachowanie składowych pola na krawędziach przegród.

Podobnie jak w analizie elektrostatycznej dla przypadku periodycznych układów przewodzących pasków, stosując przybliżenie rozkładu BIS dla admitancji akustycznej (w przypadku elektrostatycznym przybliżenie rozkładu BIS dotyczy przenikalności dielektrycznej), przedstawiona metoda pozwala sprowadzić zagadnienie brzegowe do rozwiązywania skończonego układu równań liniowych dla nieznanych współczynników rozwinięcia BIS. Tu warto podkreślić, iż otrzymane rozwiązanie dla ciśnienia na powierzchni ośrodka akustycznego w dziedzinie widma przestrzennego pozwala bezpośrednio obliczyć funkcję promieniowania dla rozpatrywanego układu sztywnych przegród. W przypadku generacji znajomość widma ciśnienia lub normalnej składowej prędkości akustycznej w płaszczyźnie przegród pozwala łatwo obliczać rozkład pola falowego w ośrodku. Otrzymane rozwiązanie zagadnienia rozpraszania harmonicznej fali płaskiej w dziedzinie widma przestrzennego pozwala również łatwo modelować wieloelementowe szyki przetworników w trybie detekcji. W przypadku ogólnym, dla dowolnej fali padającej, rozwiązanie otrzymuje się przez superpozycję pewnej ograniczonej liczby harmonicznych przestrzennych. Znajomość przestrzennego widma ciśnienia na powierzchni umożliwia modelowanie odpowiedzi elementu szyku liniowego umieszczonego w polu fali padającej poprzez obliczanie całki ciśnienia (wywartego poprzez pole całkowite) po powierzchni pojedynczej przegrody.

Innym bardzo ważnym problemem, szczególnie z teoretycznego punktu widzenia, omówionym w Rozdziale 3 jest analiza zagadnienia kształtowania pola falowego poprzez nieperiodyczny układ sztywnych przegród. W ogólnym przypadku zakłada się dowolną szerokość oraz odległość pomiędzy elementami [17]. W rozprawie habilitacyjnej główną uwagę skupiono na analizie przypadku szyku

zawierającego jednakowe elementy, jak to ma miejsce, na przykład, w rzeczywistych wieloelementowych głowicach liniowych. W opracowanej oryginalnej metodzie analizy zagadnienia nieperiodycznego układu sztywnych przegród zastosowano model periodycznej struktury wieloelektrodowej. Pojedynczym elementem tej struktury jest analizowany oryginalny układ o skończonej liczbie elementów. Period powtarzania takich wieloelementowych ‘komórek’ musi być na tyle dużym, żeby ich wzajemne oddziaływanie można było pominąć. Ze względu na złożoność stosowanego modelu (periodyczny układ ‘komórek’ wieloelementowych o skończonej liczbie elementów), opracowana metoda analizy jest znaczącym uogólnieniem metody rozkładu BIS, stosowanej do analizy zagadnienia elektrostatyki periodycznych układów pasków, z wykorzystaniem metody ‘funkcji generujących’ elektrostatyki nieperiodycznych planarnych układów. Warto podkreślić, iż kluczową rolę odgrywa tu metoda rozkładu BIS, dlatego przyjęto założenie periodyczności, co jest omawiane szczegółowo w Rozdziale 3. Tak jak i w przypadku układów periodycznych, opracowana metoda pozwala uzyskać rozwiązanie zagadnienia dla nieperiodycznego układu sztywnych przegród w dziedzinie widma przestrzennego. Stąd bezpośrednio daje się uzyskać charakterystykę promieniowania badanej struktury oraz obliczać pole fali generowanej w ośrodku akustycznym.

Warto podkreślić, iż chociaż w pracy głównie omawiany jest przypadek jednakowych elementów sztywnych o skończonej liczbie elementów, tym nie mniej opracowana metoda jest uniwersalna i równie dobrze nadaje się do analizy przypadków bardziej ogólnych, gdzie szerokość oraz odległość między poszczególnymi elementami jest dowolna. Jedynym ograniczeniem jest liczba elementów analizowanej struktury. Jest to związane z założeniem o dużym okresie powtarzania się ‘komórek’ wieloelementowego układu periodycznego, co bezpośrednio przekłada się na uwarunkowanie i rozmiar macierzy układu równań liniowych oraz liczbę współczynników rozkładu BIS. W praktyce oznacza to iż przedstawiona metoda analizy może być skutecznie stosowana do modelowania nieperiodycznych układów zawierających około 20-25 elementów. Do analizy zjawisk zachodzących w większych układach niezbędne jest opracowanie zaawansowanych algorytmów numerycznych do rozwiązywania dużych, źle uwarunkowanych układów równań liniowych. Niemniej jednak, jak wspomniano wcześniej, rzeczywiste głowice liniowe zawierają znaczną liczbę jednakowych elementów (nowoczesne nawet 128 lub 192 ) i w praktyce zawsze mogą być skutecznie modelowane poprzez periodyczne układy, dla których wystarczającą jest wspomniana wcześniej uogólniona metoda rozkładu BIS. Przykład jej praktycznego zastosowania w nowoczesnych metodach obrazowania ultrasonograficznego omawiany jest w Rozdziale 4 monografii.

### **Zastosowanie w ultrasonografii**

W oparciu o wyniki modelowania periodycznych sztywnych przetworników akustycznych została opracowana metoda obrazowania ultrasonograficznego z zastosowaniem algorytmu syntetycznej apertury, które znajdują coraz szersze zastosowanie w tej dziedzinie diagnostyki medycznej w ostatnich latach [18]. Dotychczasowe badania oraz zastosowania metody syntetycznej apertury napotykały zasadnicze problemy techniczne – niewystarczająca moc oraz pamięć jednostek obliczeniowych. Obecnie rozwój mikroelektroniki i cyfrowych systemów przetwarzania danych pozwala na realizację bardzo złożonych algorytmów przetwarzania w czasie rzeczywistym. Nowe środki techniczne jak, na przykład, programowalne układy logiczne (FPGA) czy procesory graficzne (GPU) pozwalają na przetwarzanie z prędkościami rzędu setek miliardów operacji na sekundę, co pozwala na praktyczną realizację coraz bardziej skomplikowanych algorytmów przetwarzania i wizualizacji danych. Stosowanie metody syntetycznej apertury umotywowane jest rosnącym zapotrzebowaniem na ultrasonografie wysokiej



rozdzielczości z wysoką częstotliwością odświeżania obrazu, co jest warunkiem niezbędnym dla dokładnej diagnostyki klinicznej. Algorytmy te są od dawna znane i stosowane w technice radarowej [19] oraz w sonarach [20].

W najprostszym przypadku algorytmu syntetycznej apertury elementy szyku liniowego są pobudzane jeden po drugim. Pojedynczy przetwornik najpierw generuje fale do ośrodka akustycznego po czym jest przełączany w tryb odbioru i rejestruje sygnał fali rozpraszanej wstecz. Sygnał wysokiej częstotliwości (sygnał odbitych ech) jest rejestrowany i zapisywany w pamięci do celów dalszego przetwarzania. Metoda ta jednak cechuje się słabym stosunkiem sygnału do szumu oraz słabą rozdzielczością kontrastową syntezowanych obrazów ze względu na małą energię fali generowanej przez pojedynczy przetwornik. Metoda ta była jednak dalej intensywnie rozwijana przez wielu badaczy w różnych ośrodkach na świecie, co spowodowało pojawienie się różnych modyfikacji schematów nadawczo-odbiorczych oraz algorytmów przetwarzania uzyskanych sygnałów. Obecnie uznawana jako jedna z najbardziej obiecujących jest metoda wieloelementowej syntetycznej apertury nadawczej (ang. multi-element synthetic transit aperture, skrót MSTTA): w trybie nadawczym stosuje się sub-aperturę składającą się z kilku do kilkunastu elementów emitujących nieogniskowaną falę ultradźwiękową do ośrodka badanego. Pozwala to uzyskać większą energię fali akustycznej, i w efekcie, wzrost stosunku sygnału do szumu, co z kolei powoduje zwiększenie głębokości wizualizacji oraz kontrastowości syntezowanych obrazów. W trybie odbiorczym sygnały odbitych ech są rejestrowane poprzez wszystkie elementy szyku niezależnie i zapisywane po każdej emisji do pamięci do celów dalszej obróbki – syntezy obrazu wysokiej rozdzielczości. Taki schemat nadawczo-odbiorczy zapewnia możliwość dynamicznego ogniskowania wiązki ultradźwiękowej zarówno po stronie odbiorczej jak i nadawczej w każdym punkcie obrazowania poprzez koherentne sumowanie sygnałów odbitych ech, odpowiednio przesuniętych w czasie względem siebie. Wyznaczenie odpowiednich opóźnień realizowane jest poprzez obliczenie drogi przebytej przez krótki impuls ultradźwiękowy od elementu nadawczego do danego punktu w badanym obszarze (punkt ogniskowania) oraz drogi powrotnej do odbiornika, przy założeniu stałej prędkości propagacji fali w ośrodku. Zwykle dla uproszczenia przyjmuje się założenie iż pojedyncze elementy szyku liniowego są źródłami punktowymi, które w trybie generacji emitują fale kulistą do ośrodka a w trybie detekcji zachowują się jako odbiornik bezkierunkowy. Jednakże, dla typowych częstotliwości stosowanych w ultrasonografii długość fali jest porównywalna do porzecznych wymiarów pojedynczych przetworników i pomijanie kierunkowości elementów nadawczo-odbiorczych może prowadzić do błędów przy syntezie obrazu i pogarszania jakości obrazowania. Zazwyczaj takie błędy prowadzą do pogorszenia kontrastowości obrazowania oraz pojawiania się charakterystycznego szumu w obrazie na małych głębokościach w obszarach położonych w bezpośredniej bliskości od głowicy. W Rozdziale 4 monografii omawiana jest opracowana nowoczesna metoda obrazowania ultrasonograficznego z zastosowaniem schematu nadawczo-odbiorczego wieloelementowej syntetycznej apertury nadawczej, w której uwzględniana jest kierunkowość sub-apertury nadawczej oraz odbiorczej. Jest to realizowane poprzez odpowiednie ważenie sygnałów odbitych ech przy koherentnym sumowaniu w trakcie syntezy obrazu wysokiej rozdzielczości [21]. Przedefiniowane wagi obliczane są dla każdego punktu ogniskowania oraz każdej kombinacji sub-apertur nadawczej oraz odbiorczej na podstawie ich funkcji kierunkowości. W tym celu została zaimplementowana metoda modelowania periodycznych układów sztywnych przegród (ekranów akustycznych) omówiona wcześniej [22]. Pozwoliło to uzyskać znaczącą poprawę jakości obrazowania (kontrastowości oraz głębokości wizualizacji) w porównaniu do tradycyjnych algorytmów syntetycznej apertury. Najbardziej istotna jest eliminacja szumów przy obrazowaniu niejednorodności usytuowanych na niewielkiej głębokości, widoczna zarówno w symulacjach komputerowych jak i przy obrazowaniu

rzeczywistych danych pomiarowych dla fantomów tkankowych. Opracowana metoda ma potencjalne znaczenie aplikacyjne i obecnie prowadzone są prace w aktualnie realizowanym projekcie badawczym w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka nad jej wdrożeniem w nowoczesnej uniwersalnej platformie ultrasonograficznej.

### **Metody elektrostatyki w modelowaniu 2-wymiarowych periodycznych struktur**

Metody elektrostatyki planarnych układów przewodzących pasków szczegółowo omówione w Rozdziale 2 monografii, oraz ich uogólnienie do analizy zagadnień generacji oraz rozpraszania fal akustycznych poprzez planarne układy sztywnych przegród dotyczą w zasadzie analizy liniowych, jednowymiarowych, struktur. W Rozdziale 5 rozprawy habilitacyjnej przedstawiono przykład uogólnienia metod elektrostatyki do modelowania struktur dwuwymiarowych, które zdobywają coraz większą popularność w ostatnich latach, na przykład, w nowoczesnych urządzeniach ultrasonograficznych do obrazowania trójwymiarowego. Podczas gdy zwykle szyki liniowe realizujące strukturę jednowymiarową pozwalają dokonywać sterowania wiązką w jednej płaszczyźnie i uzyskiwać dwuwymiarowe obrazowanie obszaru obserwacji (przekrój), to pełne trójwymiarowe obrazowanie pozwalają uzyskać macierze przetworników, które realizują sterowanie wiązką w dwóch wymiarach. Tradycyjny dwuwymiarowy szyk przetworników zawiera macierz  $N \times N$  elementów. Często w zastosowaniach używa się inne konfiguracje dopasowane do konkretnego zagadnienia pomiarowego. Jednakże wszystkie one posiadają wspólną cechę, mianowicie każdy element jest mechanicznie oddzielony od sąsiadujących elementów szyku poprzez przecięcia i posiada własne doprowadzenie (indywidualne okablowanie) sygnału nadawczo-odbiorczego. Takie rozwiązanie komplikuje proces technologiczny produkcji samego przetwornika oraz znacznie utrudnia montaż okablowania do zasilania jego elementów.

W przedstawionej monografii omówiono alternatywną dwuwymiarową strukturę, która ma potencjalne możliwości pełnego sterowania wiązką akustyczną w dwu płaszczyznach. Składa się ona z dwóch ortogonalnych układów pasków przewodzących umieszczonych po przeciwnych stronach cienkiej warstwy dielektrycznej o własnościach elektrostrykcyjnych. Struktura taka ma cechy dwuwymiarowego szyku w tym sensie iż pozwala formować wiązkę akustyczną i realizować sterowanie oraz ogniskowanie w dwu wymiarach i jest równoważna znacznie bardziej skomplikowanym szynom dwuwymiarowym pojedynczych odizolowanych od siebie przetworników. Jej szczególną zaletą jest znaczne ograniczenie liczby kabli zasilających:  $2N$  dla szyków  $N$ -elementowych po każdej stronie, w przeciwieństwie do  $N \times N$  dla równoważnej macierzy. Upraszcza to znacznie planarny montaż przetwornika i jego sterowanie oraz technologię wytwarzania samego przetwornika. Sterowanie wiązką realizowane jest poprzez odpowiednie pobudzenie elektrod po obu stronach warstwy dielektrycznej. Wzajemne oddziaływania poszczególnych elementów szyku, ze względu na brak ich mechanicznego odseparowania, powoduje konieczność wprowadzania pewnej korekcji sygnałów nadawczo-odbiorczych celemżądanego sterowania oraz ogniskowania wiązki. Pewne nie do końca skuteczne próby modelowania takich struktur w ujęciu teorio-sygnałowym były opisane w literaturze, na przykład, w pracy [23]. Brak jednak jak do tej pory dogłębnej analizy teoretycznej uwzględniającej zależność pomiędzy niejednorodnym polem elektrycznym w warstwie dielektrycznej, generowanym poprzez odpowiednie pobudzenie elektrod, oraz indukowanym (w skutek efektu elektrostrykcyjnego) niejednorodnym polem naprężeń mechanicznych i, w konsekwencji, niejednorodnych wibracji płytki dielektrycznej. W Rozdziale 5 monografii omówiono metodę analizy takiej struktury, polegającą na odpowiedniej modyfikacji i uogólnieniu metody rozkładu BIS dla przypadku dwuwymiarowych układów periodycznych [24]. Pozwala ona na analizę rozkładu

naprężeń w warstwie dielektrycznej przy dowolnym zadanym pobudzeniu poszczególnych elektrod po obu jej stronach poprzez ściśle rozwiązywanie nietrywialnego elektrostatycznego zagadnienia brzegowego. Omówiona w Rozdziale 5 monografii teoria nosi cechę kanonicznego rozwiązania dla dwuwymiarowych układów skrzyżowanych elektrod, która ma potencjalne aplikacyjne znaczenie i będzie dalej rozwijana i modyfikowana do celów modelowania szeregu praktycznych struktur do kształtowania wiązki ultradźwiękowej. Jedną z takich struktur jest dwustronny ortogonalny szyk przewodzących elektrod umieszczony na cienkiej warstwie piezoelektrycznej, teoretyczne modelowanie którego jest częścią aktualnie prowadzonego projektu badawczego.

### **Zastosowanie uogólnionych metod elektrostatyki w teorii rozpraszania fal elektromagnetycznych**

W Rozdziale 6 rozprawy habilitacyjnej omówiono opracowaną oryginalną metodę modelowania zjawisk rozpraszania fal elektromagnetycznych w periodycznych strukturach falowodowych na podstawie uogólnienia i rozwinięcia metod elektrostatyki. Rozpatrywane struktury mają ważne znaczenie aplikacyjne, z kolei analiza omówionych problemów brzegowych stanowi ważny oryginalny przyczynek do teorii dyfrakcji fal elektromagnetycznych. W szczególności, w monografii omówione są zagadnienia rozpraszania płaskiej fali elektromagnetycznej skośnie padającej na periodycznym układzie falowodów płaskich o grubych ścianach [25,26] oraz na periodycznym układzie przewodzących elektrod o skończonej grubości [27]. Analiza tych zagadnień ma ważne znaczenie zarówno z punktu widzenia teorii dyfrakcji jako przyczynek do modelowania procesów rozpraszania w periodycznych strukturach, jak i z punktu widzenia zastosowań inżynierskich. Wiadomo, iż analizowane struktury, w szczególności, układy elektrod przewodzących, wykazują w stosunku do fal elektromagnetycznych, zarówno jak i do fal elektromechanicznych, takie ważne cechy, jak selektywność częstotliwościową oraz selektywność polaryzacyjną. Spowodowało to szerokie zainteresowanie takimi strukturami między innymi w technice anten, gdzie takie układy służą do modelowania różnego rodzaju urządzeń, reflektorów, polaryzatorów, różności struktur falowodowych, filtrów i innych; podobnie i w technice fal elektromechanicznych, gdzie układy te umieszczone na podłożu z materiału o własnościach piezoelektrycznych służą do generacji i detekcji powierzchniowych fal akustycznych w różnego rodzaju filtrach, liniach opóźniających, czujnikach i innych. Ostatnio zainteresowanie periodycznymi strukturami znacznie wzrosło ze względu na ich zastosowania w konstrukcji materiałów o ujemnym współczynniku załamania – meta-materiałów elektromagnetycznych [28] i ich odpowiedników akustycznych. W literaturze do rozwiązywania wspomnianych zagadnień rozpraszania fali elektromagnetycznej stosowane są głównie metody numeryczne (metoda elementów skończonych, metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu). Ściśle rozwiązania otrzymano tylko dla przypadku rozpraszania fali elektromagnetycznej na periodycznym układzie przewodzących pasków oraz falowodów płaskich ze ściankami o infinitezymalnej grubości [29]. Problem polega na matematycznej złożoności zagadnienia, wymagającej specjalnych zaawansowanych technik analitycznych. Dopiero wyniki analityczne poddać można obróbce numerycznej dla uzyskania użytecznych wyników aplikacyjnych. W rozprawie habilitacyjnej do rozwiązywania zagadnienia rozpraszania fali elektromagnetycznej we wspomnianych strukturach periodycznych opracowana została metoda, polegająca na odpowiedniej reprezentacji złożonego pola falowego przez szybkobieżny szereg przestrzennych harmonicznych zgodnie z twierdzeniem Floquet'a, opisujący odpowiednią pierwiastkową osobliwość pola na krawędziach elektrod. W tym celu, podobnie jak w metodzie rozkładu BIS, amplitudy przestrzennych harmonicznych są dalej rozwijane w szeregi odpowiednio dobranych funkcji Legendre'a. Składowe pola pomiędzy elektrodami oraz w falowodach zostały przedstawione w postaci rozwinięcia w szereg modów własnych falowodów płaskich. Warunki ciągłości pól oraz własności ortogonalności

funkcji własnych pozwalają sprowadzić problem do rozwiązywania nieskończonych układów równań liniowych, których elementy macierzy są zadane w postaci jawnej w formie szybkobieżnych szeregów. Do rozwiązywania owych układów równań zwykle stosuje się metody numeryczne, jak metoda redukcji (lub metoda kolejnych przybliżeń) dla otrzymania przybliżonego rozwiązania.

### **Podsumowanie najważniejszych osiągnięć oraz oryginalnych aspektów rozprawy habilitacyjnej**

Rozprawa habilitacyjna ma na celu rozwinięcie i uogólnienie metod stosowanych w elektrostatyce układów planarnych (przewodzące paski) do rozwiązywania zagadnień brzegowych w teorii generacji i detekcji fal akustycznych (zagadnienie formowania wiązki za pomocą liniowych szyków przetworników akustycznych), jak również zaprezentować możliwości analizy zagadnień brzegowych w teorii fal elektromagnetycznych (analiza struktur falowodowych).

### **Oryginalne aspekty przedstawionej rozprawy habilitacyjnej:**

- Zaproponowano nowe podejście do modelowania liniowych szyków przetworników akustycznych (Rozdział 3) stosowanych do kształtowania złożonego pola falowego w zagadnieniach formowania wiązki o potencjalnym znaczeniu aplikacyjnym w diagnostyce ultradźwiękowej czy też w nieniszczących badaniach ultradźwiękowych. Sformułowano mieszane zagadnienie brzegowe (Rozdział 3.1) dla periodycznego układu sztywnych przegród (ekranów akustycznych) dla przypadku generacji oraz rozpraszania fal akustycznych. Przedstawiono metodę jego analizy (Rozdział 3.2) w oparciu o uogólnione i rozwinięte metody stosowane w elektrostatyce periodycznych układów przewodzących pasków.
- Wyprowadzono prosty wzór do modelowania charakterystyki promieniowania periodycznego układu przetworników akustycznych przy dowolnym zadanym pobudzeniu (Rozdział 3.2.1). W trybie detekcji wyprowadzono prosty wzór do modelowania odpowiedzi pojedynczego elementu liniowego szyku przetworników w polu padającej płaskiej fali akustycznej (Rozdział 3.2.2).
- Zaproponowano metodę analizy mieszanego zagadnienia brzegowego dla układu sztywnych przegród (ekranów akustycznych) o skończonej liczbie elementów (Rozdział 3.3). Opracowana metoda jest uogólnieniem metod stosowanych w elektrostatyce i zawiera połączenie elementów metody rozkładu BIS stosowanej do modelowania periodycznych układów pasków oraz metody ‘funkcji generujących’ do modelowania skończonych planarnych układów przewodzących pasków.
- Wyprowadzono prosty wzór do modelowania charakterystyki promieniowania układu przetworników akustycznych o skończonej liczbie elementów przy dowolnym zadanym pobudzeniu (Rozdział 3.3.1).
- Opracowane metody modelowania liniowych szyków przetworników akustycznych zaimplementowano w nowoczesnym algorytmie obrazowania ultrasonograficznego (Rozdział 4). W zaproponowanej metodzie opartej o algorytm wieloelementowej syntetycznej apertury nadawczej uwzględniono kierunkowość sub-apertur nadawczej oraz odbiorczej poprzez odpowiednie ważenie sygnałów odbitych ech (Rozdział 4.2). Wagi obliczane są dla każdego

punktu obrazowania oraz wszystkich możliwych kombinacji elementów nadawczo-odbiorczych. W tym celu zastosowano model charakterystyki promieniowania liniowego szyku przetworników akustycznych zaproponowany wcześniej. Opracowana metoda pozwoliła uzyskać znaczącą poprawę jakości obrazowania (kontrastowość oraz głębokość wizualizacji) w porównaniu do tradycyjnych algorytmów syntetycznej apertury. Badania związane ze sprzętową implementacją opracowanego algorytmu są częścią aktualnie prowadzonego projektu badawczego.

- Zaproponowano metodę analizy zagadnienia rozpraszania fal elektromagnetycznych w periodycznych układach falowodów płaskich ze ściankami o skończonej grubości (Rozdział 6.1.1). Metoda jest rozwinięciem i uogólnieniem metody rozkładu BIS stosowanej w elektrostatyce periodycznych układów pasków.
- Zaproponowano metodę analizy zagadnienia rozpraszania fal elektromagnetycznych w periodycznych układach przewodzących elektrod o skończonej grubości (Rozdział 6.1.2). Jest ona uogólnieniem metody stosowanej do analizy rozpraszania fal elektromagnetycznych poprzez periodyczne układy falowodów płaskich o grubych ściankach. Zagadnienie ma znaczenie aplikacyjne w modelowaniu anten i struktur falowodowych, reflektorów, polaryzatorów i filtrów oraz urządzeń stosowanych w technice fal elektromechanicznych do filtracji oraz obróbki sygnałów (linie opóźniające, filtry powierzchniowych fal akustycznych i inne).
- Zaprezentowano metodę modelowania struktur utworzonych poprzez ortogonalne periodyczne układy elektrod położonych na przeciwległych powierzchniach cienkiej warstwy dielektrycznej o własnościach elektrostrykcyjnych (Rozdział 5). Przeprowadzono analizę rozkładu naprężeń w warstwie dielektrycznej przy dowolnym zadanym pobudzeniu poszczególnych elektrod po obu jej stronach. Uzyskane wyniki mają bezpośrednie przełożenie na przypadek elektrod umieszczonych na cienkiej warstwie piezoelektrycznej, teoretyczne modelowanie którego jest częścią aktualnie prowadzonego projektu badawczego.

Część wyników zawartych w pracy habilitacyjnej była opublikowana wcześniej w pracach [14, 17, 21, 22, 24-27, 31, 34]. Oświadczenia współautorów tych prac stanowią załącznik dokumentacji habilitacyjnej. Poniżej krótko omówiono wkład własny autora tego referatu w powyższych pracach.

## **5) Pozostałe osiągnięcia naukowe**

### Zainteresowania naukowe

Zagadnienia elektrostatyki znalazły się w obszarze moich zainteresowań naukowych jeszcze z czasów studiów doktoranckich. W tym okresie zajmowałem się numerycznymi aspektami modelowania przetworników akustycznych fal powierzchniowych – tak zwanych przetworników międzypalczastych. Są one stosowane w wielu nowoczesnych urządzeniach radiokomunikacyjnych (telefonach komórkowych, bezprzewodowych sieciach komputerowych itp.), gdzie służą do filtracji sygnałów wysokiej i pośredniej częstotliwości, sensorach, biernych identyfikatorach (bez zasilania), ich zastosowania rozwijają się także w dziedzinie badań nieniszczących, ultrasonografii i innych, o czym świadczy liczba aktualnych publikacji i komunikatów na konferencjach IEEE. Przetworniki międzypalczaste są to planarne układy cienkich przewodzących elektrod (pasków) umieszczonych na podłożu piezoelektrycznym. Tematyka

mojej pracy doktorskiej dotyczyła zagadnienia numerycznego wyznaczenia widma przestrzennego rozkładu ładunku na elektrodach przetwornika międzypalczastego, która pozwala modelować jego charakterystykę częstotliwościową w przybliżeniu elektrostatycznym. Została przeprowadzona szczegółowa analiza problemu od strony niedokładności numerycznych pojawiających się na poszczególnych etapach obliczania widma ładunku. Do eliminacji lub ograniczania błędów obliczeniowych opracowałem algorytmy stosujące zaawansowane techniki numeryczne w przypadku analizy przetworników o złożonej geometrii i dużej liczbie elektrod, oraz zaimplementowałem je i udostępniłem odpowiednie oprogramowanie do przeprowadzenia modelowania numerycznego.

Dalsze prace dotyczyły zagadnień rozpraszania na ograniczonym układzie elektrod przetwornika akustycznych fal powierzchniowych w przybliżeniu elektrostatycznym. Wymagało to opracowania metody analizy tak zwanego zagadnienia 'elektrostatycznego rozpraszania' dla układu pasków o skończonej liczbie elementów. Kilka prac [30, 31] powstało w tym okresie mojej działalności naukowej jako rezultat współpracy z prof. E. Danickim (IPPT-PAN, Warszawa), który był promotorem mojej pracy doktorskiej. Mój udział merytoryczny polegał na analizie widma przestrzennego rozkładu ładunku na elektrodach przetwornika, opracowaniu, implementacji zaawansowanych algorytmów numerycznych oraz przeprowadzeniu obliczeń komputerowych. Główne wyniki zostały również przedstawione na międzynarodowej konferencji (*IEEE International Ultrasonic Symposium IUS 2005*). Oprócz tego, we współpracy z E. Danickim opracowano oryginalną metodę analizy zagadnienia elektrostatyki 'prawie' periodycznych układów pasków (ang. quasi-periodic system), utworzonych poprzez skrócenie o połowę jednego paska oraz odpowiedzenie skrócenie odstępów pomiędzy paskami o połowę periodu. Zagadnienie to ma być ważnym przyczynkiem w teorii elektrostatyki układów planarnych. Główne wyniki zaprezentowano w komunikacie na konferencji międzynarodowej [34]. Wykorzystano wcześniejsze doświadczenie współautora. Mój wkład merytoryczny polegał na opracowaniu aproksymacji widma przestrzennego rozkładu ładunku na elektrodach z wykorzystaniem odpowiednio dobranych układów funkcji ortogonalnych (na przykład skokowe funkcje Walsha), opracowaniu i implementacji zaawansowanych algorytmów numerycznych oraz przeprowadzeniu obliczeń komputerowych.

Innym bardzo ważnym aspektem moich zainteresowań naukowych jest analiza zagadnień teorii dyfrakcji fal elektromagnetycznych w periodycznych strukturach falowodowych. W tej dziedzinie opublikowałem szereg samodzielnych prac w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym [25-27] oraz w artykułach o zasięgu krajowym a także na dwóch konferencjach międzynarodowych (*International Symposium on Antennas and Propagation ISAP 2007* oraz *XVII International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON 2008*). W szczególności, głównym celem badań omówionych w pracach [25,26] była teoretyczna analiza zagadnienia rozpraszania fal elektromagnetycznych w periodycznych układach falowodów płaskich o grubych ściankach. Prace powstały w ramach kierowanego przeze mnie grantu „**Zagadnienie rozpraszania płaskiej fali elektromagnetycznej na periodycznym układzie pół-nieskończonych prostokątnych płyt**”. Wynikiem ich była oryginalna metoda analizy problemu brzegowego opracowana z wykorzystaniem wcześniejszego doświadczenia z dziedziny elektrostatyki układów planarnych. Mianowicie, poprzez rozwinięcie i uogólnienie metody rozkładu BIS udało się uzyskać rozwiązanie dla zagadnienia rozpraszania monochromatycznej fali płaskiej dla przypadku skośnego padania. Opracowana metoda później została zmodyfikowana i na jej podstawie opracowałem metodę analizy zagadnienia rozpraszania fali elektromagnetycznej na planarnym periodycznym układzie przewodzących elektrod o skończonej grubości [27]. Rozpatrywane zagadnienie ma ważne znaczenie zarówno z punktu widzenia teorii dyfrakcji jako przyczynkę do modelowania procesów rozpraszania w periodycznych strukturach, tak i z punktu widzenia zastosowań inżynierskich. Są one szeroko stosowane w technice anten do modelowania różnego rodzaju urządzeń, takich jak reflektory, polaryzatory, filtry i inne, tak i w technice fal elektromechanicznych do modelowania procesów generacji i detekcji powierzchniowych fal akustycznych w różnego rodzaju urządzeniach od filtrów, linii opóźniających do czujników i innych.

Wśród moich zainteresowań naukowych znajdują się przede wszystkim zjawiska falowe w akustyce.

Między innymi szczególne miejsce zajmuje problematyka modelowania periodycznych struktur w zagadnieniach generacji oraz rozpraszania fal akustycznych, zwłaszcza modelowania zjawisk falowych w liniowych szykach przetworników akustycznych. Zagadnienie to ma potencjalne znaczenie techniczne w elementach funkcjonalnych z falą powierzchniową dla radioelektroniki, nieniszczących badań ultradźwiękowych i diagnostyki ultradźwiękowej (z zakresu piezoelektroniki i techniki mikrofalowej). Zostało ono sformułowane w postaci mieszanego problemu brzegowego dla nieskończonego periodycznego układu przetworników akustycznych i rozwiązane z zastosowaniem oryginalnej metody analizy w oparciu o uogólnioną metodę rozkładu BIS (elektrostatyka periodycznych układów pasków) [14]. Praca powstała w wyniku współpracy z E. Danickim. Wykorzystana została zaproponowana wcześniej przez współautora ogólna koncepcja teorii 'rozpraszania elektrostatycznego' dla periodycznego układu pasków [31] do opracowania metody wyznaczenia złożonego pola falowego w przypadku liniowego szyku przetworników akustycznych umieszczonego na powierzchni ośrodka akustycznego. Mój wkład merytoryczny polegał na opracowaniu algorytmów numerycznych, ich implementacji oraz przeprowadzeniu obliczeń komputerowych oraz analiza uzyskanych wyników i ich porównanie z metodami analizy spotykanymi w literaturze, co zaowocowało przygotowaniem ostatecznej wersji artykułu. W dalszych pracach badawczych kontynuowałem rozwijanie i uogólnienie metod elektrostatyki w modelowaniu zjawisk falowych w akustyce. Mianowicie, opracowałem metodę analizy zagadnienia generacji fal akustycznych poprzez planarny układ przetworników o skończonej liczbie elementów. Jest ona połączeniem uogólnionej metody rozkładu BIS oraz metody 'funkcji generujących', stosowanej w elektrostatyce nieperiodycznych układów przewodzących elektrod. Uzyskane wyniki opublikowałem w samodzielnym artykule [17].

Wśród moich zainteresowań naukowych znajdują się również aspekty zastosowania ultradźwiękowych fal w diagnostyce medycznej. W ostatnich latach moje badania prowadzone w Zakładzie Ultradźwięków skupiają się na opracowaniu oraz implementacji zaawansowanych algorytmów do diagnostyki ultrasonograficznej. W szczególności chodzi o algorytmy obrazowania z zastosowaniem metod syntetycznej apertury. Kilka artykułów powstało jako rezultat współpracy z I. Trotsem, M. Lewandowskim, Z. Klimonda, A. Nowickim (IPPT-PAN Warszawa) oraz A. P. Lewinem (Drexel University, Philadelphia, USA) [21,22,32,33]. Głównym celem pracy [21] było opracowanie nowoczesnego algorytmu obrazowania opartego o schemat syntetycznej apertury nadawczej (ang. synthetic transmit aperture, skrót STA): pojedynczy element szyku liniowego nadaje fale akustyczne i wszystkie elementy rejestrują sygnały odbitych ech, po czym następuje synteza obrazu wysokiej rozdzielczości. Opracowana przeze mnie metoda polega na koherentnym sumowaniu rejestrowanych sygnałów odbitych ech z odpowiednim ważeniem, uwzględniającym kierunkowość elementów nadawczo-odbiorczych. Zaimplementowałem algorytm oraz przeprowadziłem obliczenia z zastosowaniem komputerowo symulowanych danych syntetycznej apertury. Przeprowadziłem również wizualizację danych eksperymentalnych dostarczonych przez współautorów. Wyniki obliczeń pokazały znaczącą poprawę jakości obrazowania (kontrastowość, głębokość wizualizacji) przy zastosowaniu opracowanego algorytmu w porównaniu do tradycyjnej metody STA. Ostateczna wersja artykułu jest wynikiem pracy wszystkich autorów. W pracy [22] opracowałem metodę obrazowania opartej o schemat wieloelementowej syntetycznej apertury nadawczej (MSTA). W odróżnieniu od tradycyjnej metody STA, w przypadku MSTA w trybie nadawczym do celów zwiększenia emitowanej energii (a co za tym idzie, głębokości wizualizacji związanej ze zwiększeniem stosunku sygnału do szumu) fali akustycznej stosuje się kilku, kilkunastu elementów sub-apertury nadawczej. Opracowany przeze mnie algorytm wykorzystuje idee podobną do tej stosowanej w poprzednim opracowanym algorytmie STA: wprowadzenie odpowiedniego ważenia sygnałów odbitych ech celem uwzględniającym kierunkowość elementów nadawczo-odbiorczych. W przypadku wieloelementowej apertury nadawczej do obliczenia wag za pomocą jej funkcji kierunkowości zaimplementowałem opracowaną wcześniej metodę modelowania szyków przetworników liniowych [14,17]. Opracowałem algorytm oraz przeprowadziłem obliczenia z zastosowaniem komputerowo symulowanych danych syntetycznej apertury. Przeprowadziłem również wizualizację danych eksperymentalnych dostarczonych przez współautorów. Wyniki obliczeń i w

tym przypadku wykazały znaczącą poprawę jakości obrazowania (kontrastowość, głębokość wizualizacji) otrzymanego z zastosowaniem opracowanego algorytmu w porównaniu do tradycyjnej metody MSTA. Ostateczna wersja artykułu jest wynikiem pracy wszystkich autorów.

Głównym celem artykułu [32] było przeprowadzenie analizy schematów nadawczo-odbiorczych w metodzie MSTA pod kątem optymalnego wyboru trybu pracy. W oparciu o oryginalny algorytm optymalizacji, opracowany oraz zaimplementowany przeze mnie, przeprowadziłem liczne obliczenia numeryczne z wykorzystaniem symulowanych komputerowo danych syntetycznej apertury oraz danych pomiarowych dostarczonych przez współautorów. Opracowałem ostateczną wersję artykułu. Z kolei w pracy [33] głównym celem było zastosowania komplementarnych kodów Golaya w algorytmie syntetycznej apertury, co pozwoliło uzyskać zwiększenie stosunku sygnału do szumu oraz głębokości wizualizacji bez zwiększenia mocy nadawczej transmisji, ściśle regulowanej przez odpowiednie normy medyczne. Mój wkład merytoryczny polegał na opracowaniu algorytmu rekonstrukcji obrazu oraz jego implementacji. Artykuły [32, 33] powstały w ramach grantu „**Transmisja kodowana w syntetycznej aperturze ogniskującej w ultrasonografii. Modelowanie i realizacja praktyczna**”, w którym pełniłem funkcje wykonawcy.

Jestem również zaangażowany w prace badawcze w aktualnie realizowanym projekcie „**Diagnostyczna aparatura ultradźwiękowa: nowe metody badania i obrazowania struktury tkankowej narządów człowieka**” w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka który dotyczy opracowania nowoczesnej uniwersalnej platformy ultrasonograficznej. W ramach tego projektu opracowałem algorytmy korekcji sygnałów w metodzie wieloelementowej syntetycznej apertury nadawczej celem polepszenia jakości obrazowania ultrasonograficznego. Przeprowadzono również analizę porównawczą różnych algorytmów obrazowania ultrasonograficznego, gdzie oprócz już wspomnianych metod STA i MSTA, opracowane i uruchomione zostały algorytmy obrazowania ultrasonograficznego z wykorzystaniem technik polegających na nadawaniu fal płaskich z różnymi kątem odchylenia wiązki i dalszej syntezy obrazu polegającej na koherentnym sumowaniu sygnałów odbitych ech (ang. plane wave compounding). Wyniki tych prac zostały zreferowane na dwóch konferencjach międzynarodowych (2012 *SPIE Medical Imaging* oraz *31th International Acoustical Imaging Symposium*).

Obecnie prowadzę projekt badawczy „**Dwustronny zintegrowany szyk przetwornikowy do kształtowania ortogonalnych płaskich wiązek ultradźwiękowych**” w ramach którego opracowywana jest nowatorska koncepcja podwójnego szyku przetworników ultradźwiękowych utworzonego poprzez rozłożenie ortogonalnych przewodzących elektrod po dwóch stronach jednorodnej płytki piezoelektrycznej. Taka struktura pozwoli na kształtowanie pola falowego, sterowanie i ogniskowanie wiązki ultradźwiękowej jak to ma miejsce dla tradycyjnych dwuwymiarowych macierzy przetworników, stosowanych w ultrasonografii. W odróżnieniu od typowych szyków liniowych, gdzie każdy element piezoelektryczny jest oddzielony mechanicznie od innych (przecięcia, znacznie komplikujące technologię) w celu ograniczenia wzajemnego wpływu na ich drgania, w przyjętej koncepcji jednorodnej płytki piezoelektrycznej drgania elementów nie są mechanicznie izolowane, a dla osiągnięcia żądanych drgań elementów promieniujących (lub detekujących) pole ultradźwiękowe, będą one sterowane odpowiednio skorygowanymi sygnałami sterującymi w procesie transwersalnej filtracji sygnałów podawanych na elementy szyków przetworników liniowych. Wymaga to opracowania adekwatnie dokładnej teorii drgań rozpatrywanego dwustronnego systemu ortogonalnych szyków elektrod na jednorodnej płytce piezoelektrycznej, co jest obecnie tematem prac naukowych w ramach projektu badawczego. Elementy analizy elektrostatycznej dla zagadnienia pokrewnego dotyczącego ortogonalnych periodycznych układów elektrod położonych na przeciwległych powierzchniach cienkiej warstwy dielektrycznej o własnościach elektrostrykcyjnych przedstawione są w pracy [24]. Powstała ona w wyniku współpracy z E. Danickim.



Wykorzystaliśmy zaproponowany przez współautora algorytm do obliczenia rozkładu naprężeń w warstwie dielektrycznej przy dowolnym zadanym pobudzeniu poszczególnych elektrod po obu jej stronach. Mój wkład merytoryczny polegał na opracowaniu algorytmów numerycznych oraz przeprowadzeniu obliczeń komputerowych oraz analizie uzyskanych wyników i ich porównaniu z metodami analizy spotykanymi w literaturze. Uzyskane wyniki mają bezpośrednie przełożenie na przypadek elektrod umieszczonych na powierzchni cienkiej warstwy piezoelektrycznej, teoretyczne modelowanie którego jest częścią aktualnie prowadzonego projektu badawczego.

### Projekty badawcze

Jako wykonawca (3 projekty) lub kierownik (2 projekty) byłem lub nadal jestem uczestnikiem następujących projektów badawczych:

- Projekt KBN Nr 3 T11B 046 26, „Modelowanie przetworników międzypalczastych poprzez numeryczną analizę rozkładu ładunku”; grant promotorski; główny wykonawca.
- Projekt KBN Nr N515 053 31/1938, „Zagadnienie rozpraszania płaskiej fali elektromagnetycznej na periodycznym układzie półnieskończonych prostokątnych płyt”; kierownik projektu.
- Projekt badawczy MNiSzW N N518 382137, „Transmisja kodowana w syntetycznej aperturze ogniskującej w ultrasonografii. Modelowanie i realizacja praktyczna”; wykonawca
- Projekt badawczy MniSzW N N515 500540, „Dwustronny zintegrowany szyk przetwornikowy do kształtowania ortogonalnych płaskich wiązek ultradźwiękowych”; kierownik projektu
- Projekt kluczowy realizowany w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, „Diagnostyczna aparatura ultradźwiękowa: nowe metody badania i obrazowania struktury tkankowej narządów człowieka”; wykonawca

### Patenty

Jestem współautorem patentu:

Y. G. Prytulyak, I. V. Kostyuk, Y. Y. Varetsky, Y. G. Tasinkevych, „Urządzenie elektronicznie skanujące do elektromagneto-akustycznych nieniszczących badań materiałów przewodzących”; Patent Nr 40300A, Biuletyn Nr 6, 16.07.2000, Urząd Patentowy Ukrainy

### Recenzje

Jestem recenzentem artykułów publikowanych w następujących czasopismach: *Journal of Electrostatics*, *Elsevier*, *Archives of Acoustics*, *Progress In Electromagnetic Research (PIER)*.

Liczba cytowań publikacji moich lub mojego współautorstwa podawana przez bazę ISI Web of Knowledge w dniu 1.02.2012 wynosiła 44. Indeks Hirscha miał wartość 5. Pełny spis publikacji naukowych podany w Załączniku 4, z kolei publikacje naukowe według listy Journal Citation Report (JCR) podane są w Załączniku 6.

## Uczestnictwo w międzynarodowych lub krajowych konferencjach naukowych

Wyniki moich prac były prezentowane na czternastu konferencjach naukowych:

1. SPIE Medical Imaging: Physics of Medical Imaging, Orlando, USA, Luty 2012;
2. International Conference on Bioinformatics, Computational Biology and Biomedical Engineering WASET 2012, Kopenhaga, Dania, Czerwiec 2012
3. International Conference on Bioinformatics, Computational Biology and Biomedical Engineering WASET 2012, Amsterdam, Holandia, Maj 2012
4. International Conference on Bioinformatics, Computational Biology and Biomedical Engineering WASET 2012, Madryt, Hiszpania, Marzec 2012
5. 58th Open Seminar on Acoustics OSA 2011, Jurata, Polska, Wrzesień 2011
6. International Conference on Bioinformatics, Computational Biology and Biomedical Engineering WASET 2011, Paryż, Francja, Lipiec 2011
7. 31th International Acoustical Imaging Symposium, Warszawa, Polska, Kwiecień 2011
8. 57th Open Seminar on Acoustics OSA 2011, Gliwice, Polska, Wrzesień 2010
9. XVII International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON 2008, Wrocław, Polska, Maj 2008
10. International Symposium on Antennas and Propagation ISAP 2007, Niigata, Japonia, Sierpień 2007
11. International Ultrasonics Symposium IUS 2005, Rotterdam, Holandia, Wrzesień 2005
12. I Scientific Conference UiSR 2005, Soczewka, Polska, Wrzesień 2005
13. International Ultrasonics Symposium IUS2002, Monachium, Niemcy, Październik 2002
14. International Conference TCSET'2000, Lwów-Slawsko, Ukraina, Luty 2000

## Literatura

1. S. C. Wooh, Y. Shi, Influence of phased array element size on beam steering behaviour, Ultrasonics, **vol. 36**, pp. 737–749, 1998
2. R. Ahmad, T. Kundu, D. Placko, Modelling of phased array transducers, J. Acoust. Soc. Am., **vol. 117**, no. 4, pp.1762–1776, 2005
3. M. Sakhaei, A. Mahloojifar, A. Malek, Optimization of point spread function in ultrasound arrays, Ultrasonics, **vol. 44**, pp. 159–165, 2006
4. F. Lingvall, T. Olofsson, T. Stepinski, Synthetic aperture imaging using sources with finite aperture: deconvolution of the impulse response, J. Acoust. Soc. Am., **vol. 114**, no. 1, pp. 225–234, 2003
5. R. Lerch, Simulation of piezoelectric devices by two- and three-dimensional finite elements, IEEE Trans. Ultrason. Ferr. Freq. Cont., **vol. 32**, no. 2, pp. 233–247, 1990

6. A. McNab, A. Cochran, M. A. Campbell, The calculation of acoustic fields in solids for transient normal surface sources of arbitrary geometry and apodisation, *J. Acoust. Soc. Am.*, **vol. 87**, no. 4, pp. 1455–1465, 1990
7. D. Robertson, G. Hayward, A. Gachagan, P. Reynolds, Minimisation of mechanical cross-talk in periodic piezoelectric composite arrays, *Insight*, **vol. 46**, no. 11, pp. 658–661, 2004
8. K. Bløtekjær, K. A. Ingebrigtsen, H. Skeie, A method for analyzing waves in structures consisting of metal strips on dispersive media, *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **vol. 20**, pp. 1133–1138, 1973
9. Y. Tasinkevych, Methods of IDT charge spatial spectrum evaluation. *J. Tech. Phys.*, **vol. 45**, p. 155–172, 2004
10. N. G. Green, A. Ramos, and H. Morgan, Numerical solution of the dielectrophoretic and traveling wave forces for interdigitated electrode arrays using the finite element method. *J. Electrostatics*, **vol. 56**, pp. 235–254, 2002
11. N. I. Mushelishvili, *Singular integral equations*. Moscow: Nauka, 1946
12. E. Kuhnicke, Plane arrays – fundamental investigations for correct steering by means of sound field calculations, *Wave Motion*, **vol. 44**, no. 4, pp. 248–261, 2007
13. B. Erbas, I. D. Abrahams, Scattering of sound waves by an infinite grating composed of rigid plates, *Wave Motion*, vol. 44, no. 4, pp. 282–303, 2007
14. Y. Tasinkevych, E. Danicki, Wave generation and scattering by periodic baffle system in application to beam-forming analysis, *Wave Motion*, **vol. 48**, no. 2, pp. 130–145, 2011
15. A. R. Selfridge, G. S. Kino, and B. T. Khuriyakub, A theory for the radiation pattern of a narrow-strip acoustic transducer, *Appl. Phys. Lett.*, **vol. 37**, no. 1, pp. 35–36, 1980
16. J. D. Achenbach, Z. L. Li, Reflection and transmission of scalar waves by a periodic array of screens, *Wave Motion*, **vol. 8**, no. 3, pp. 225–234, 1986
17. Y. Tasinkevych, Wave generation by a finite baffle array in application to beam-forming analysis, *Archives of Acoustics*, **vol. 35**, no. 4, pp. 677–686, 2010
18. J. A. Jensen, S. I. Nikolov, K. L. Gammelmark, and M. H. Pedersen, Synthetic aperture ultrasound imaging. *Ultrasonics*, vol. 44, Suppl., e5–e15, 2006
19. A. Moreira. Real-time synthetic aperture radar (SAR) processing with a new subaperture approach. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **vol. 30**, no. 4, pp. 714–722, 1992
20. N. C. Yen and W. Carey. Application of synthetic aperture processing to towed-array data. *J. Acoust. Soc. Am.*, **vol. 86**, no. 2, pp. 754–765, 1989
21. Y. Tasinkevych, I. Trots, A. Nowicki, P. A. Lewin, Modified synthetic transmit aperture algorithm for ultrasound imaging, *Ultrasonics*, **vol. 52**, pp. 333–342, 2012
22. Y. Tasinkevych, Z. Klimonda, M. Lewandowski, A. Nowicki, P. A. Lewin, Modified multi-element synthetic transmit aperture method for ultrasound imaging: A tissue phantom study, *Ultrasonics* **vol. 53**, pp. 570–579, 2013
23. I. Fujishima, Y. Tamura, H. Yanagida, J. Tada, and T. Takahashi, Edge connected, crossed-electrode array comprising non-linear transducers, 2009 *IEEE Ultrason. Symp. Proc.*, pp. 2221–2224, 2009
24. E. Danicki, Y. Tasinkevych, Beam-forming electrostrictive matrix, *Acoustical imaging vol. 31*, (Eds.) A. Nowicki, J. Litniewski, T. Kujawska, Springer, pp. 363–369, 2012, ISBN: 978-94-007-2618-5

25. Y. Tasinkevych, Scattering of H-polarized Wave by a Periodic Array of Thick-Walled Parallel Plate Waveguides, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 56, pp.3333—3337, 2008
26. Y. Tasinkevych, EM Scattering by the Parallel Plate Waveguide Array with Thick Walls for Oblique Incidence, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **vol. 23**, no. 11-12, pp.1611—1621, 2009
27. Y. Tasinkevych, Electromagnetic Scattering by Periodic Grating of PEC Bars, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **vol. 25**, no. 5-6, pp. 641—650, 2011
28. L. Jelinek, R. Marques, F. Mesa, and J. D. Baena, Periodic arrangements of chiral scatterers providing negative refractive index bi-isotropic media, *Physical Review B*, **vol. 77**, no. 20, pp. 205110, May 2008
29. R Mittra and S. W. Lee. Analytical techniques in the theory of guided waves. The Macmillan Company, 1971
30. Y. Tasinkevych, E. J. Danicki, On Electrostatics of Finite Planar System of Strips Applied in Surface Acoustic Wave Interdigital Transducers, *J. Tech. Phys.*, vol. 46, no. 3, pp. 175—193, 2005.
31. E. J. Danicki, Y. Tasinkevych, Nonstandard Electrostatic Problem for Strips, *J. Electrostatics*, **vol. 64**, pp. 386—391, 2006
32. Y. Tasinkevych, I. Trots, A. Nowicki, M. Lewandowski, „Optimization of the Multi-element Synthetic Transmit Aperture Method for Medical Ultrasound Imaging Applications,” *Archives of Acoustics*, **vol. 37**, no. 1, pp. 47—55, 2012
33. I. Trots, Y. Tasinkevych, A. Nowicki, M. Lewandowski, Golay coded sequences in synthetic aperture imaging systems, *Archives of Acoustics*, **vol. 36**, no. 4, pp. 913—926, 2011
34. E. J. Danicki, Y. Tasinkevych, Electrostatics of Quasiperiodic System of Conducting Strip, *MIKON-2008 XVII International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, Proceedings*, pp. 557—560, 2008