



Praca zrealizowana na UNIWERSYTECIE KAZIMIERZA WIELKIEGO
w Bydgoszczy
oraz
ECOLE CENTRALE DE LILLE

Przewód doktorski w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN

Rozprawa Doktorska

Ultradźwiękowa diagnostyka degradacji mechanicznej i strukturalnej betonu

mgr inż. Paweł Sabinowski

Promotorzy:

dr hab inż. Mariusz Kaczmarek Prof. UKW

Uniwersytet Kazimierza Wielkiego

Prof. dr. hab. inż. Bogdan Piwakowski

Ecole Centrale de Lille

maj 2011

PODZIĘKOWANIA

Serdeczne podziękowania składam Promotorom niniejszej rozprawy doktorskiej Profesorowi Mariuszowi Kaczmarkowi oraz Profesorowi. Bogdanowi Piwakowskiemu za możliwość realizacji pracy oraz wsparcie merytoryczne i duchowe na wszystkich etapach jej realizacji.

Ponadto dziękuję pracownikom Instytutu Mechaniki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego oraz Laboratorium Elektroniki i Akustyki Ecole Centrale de Lille we Francji za otwartość i pomoc w realizacji części doświadczalnej pracy.

Dziękuję Koledze Arkadiuszowi Koseckiemu, za pomoc przy realizacji końcowej wersji oprogramowania sterującego systemem SWMD oraz cenne uwagi dotyczące pracy.

Pragnę również podziękować Rodzicom za wsparcie w dążeniu do celu oraz wszystkim Najbliższym i Przyjaciołom, na których mogę liczyć we wszystkich chwilach życia.

Realizacja części pracy była możliwa dzięki wsparciu finansowemu w ramach projektu „SENSO” we Francji, projektu rozwojowego Nr. R04 009 02 w UKW w Bydgoszczy oraz stypendiom „Krok w przyszłość – stypendia dla doktorantów” i „Stypendium Rządu francuskiego dla doktorantów”.

SPIS TREŚCI

SPIS REŚCI.....	4
WPROWADZENIE.....	9
ROZDZIAŁ I CHARAKTERYSTYKA PODJETEGO PROBLEMU, CEL I ZAKRES PRACY.....	13
ROZDZIAŁ II PODSTAWY TEORETYCZNE ZASTOSOWANYCH METOD.....	25
II.1 PROPAGACJA FAL POWIERZCHNIOWYCH W MATERIAŁACH NIEJEDNORODNYCH.....	25
II.1.1 Fale powierzchniowe w ośrodku warstwowo niejednorodnym (model Haskella).....	28
II.1.2 Numeryczne rozwiązanie równania dyspersyjnego.....	34
II.1.3 Badania wrażliwości modelu Haskella.....	39
II.1.4 Fale powierzchniowe w ośrodku o liniowej zmianie modułu ścinania (model Gibsona).....	43
II.1.5 Badania wrażliwości modelu Gibsona.....	45
II.1.6 Porównanie modelu Gibsona z modelem Haskella.....	46
II.1.7 Modelowanie tłumienia.....	49
II.2 MODELOWANIE ODBICIA FAL ULTRADŹWIĘKOWYCH OD POWIERZCHNI MATERIAŁU POROWATEGO W POWIETRZU.....	54
II.2.1 Opis modelu z uwzględnieniem lepkości.....	56
II.2.2 Badania wrażliwości modelu.....	61
II.3 WNIOSKI.....	64
ROZDZIAŁ III OPIS I TESTY URZĄDZEŃ POMIAROWYCH.....	67
III.1 SYSTEM DO BADANIA PROPAGACJI FAL POWIERZCHNIOWYCH.....	67
III.1.1 System pomiarowy do fal powierzchniowych SWMD.....	71
III.1.2 Wielkości mierzone i przetwarzanie sygnałów.....	76
III.1.3 Test na materiale referencyjnym.....	86
III.2 SYSTEM DO POMIARÓW REFLEKTOMETRYCZNYCH.....	87
III.2.1 Urządzenie pomiarowe RMD.....	88
III.2.2 Wielkości mierzone i przetwarzanie sygnałów.....	92
III.2.3 Test na materiale wzorcowym.....	95
III.3 WNIOSKI.....	96
ROZDZIAŁ IV IDENTYFIKACJA MECHANICZNYCH I STRUKTURALNYCH PARAMETRÓW BETONU.....	97
IV.1 KRÓTKI PRZEGLĄD METOD OPTIMALIZACYJNYCH.....	99
IV.2 PORÓWNANIE WYBRANYCH METOD OPTIMALIZACYJNYCH.....	101
IV.3 IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW OŚRODKA W OPARCIU O MODEL HASKELLA – TESTY Z DANYMI SYNTETYCZNYMI.....	103
IV.4 IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW OŚRODKA W OPARCIU O MODEL GIBSONA – TESTY Z DANYMI SYNTETYCZNYMI.....	106
IV.4.1 Badanie wrażliwości funkcji błędu.....	107
IV.4.2 Testy programu.....	108
IV.5 PROCEDURA SZACOWANIA GŁĘBOKOŚCI DEGRADACJI W OPARCIU O MODEL GIBSONA.....	109
IV.5.1 Koncepcja algorytmu.....	110
IV.5.2 Weryfikacja procedury dla danych syntetycznych.....	113
IV.6 PROGRAM CHMURA PUNKTÓW.....	115
IV.6.1 Koncepcja algorytmu.....	115
IV.6.2 Weryfikacja programu dla danych syntetycznych.....	118
IV.7 IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW STRUKTURY NA PODSTAWIE CHARAKTERYSTYKI WSPÓŁCZYNNIKA ODBICIA.....	121

IV.7.1	Koncepcja algorytmu.....	122
IV.7.2	Weryfikacja procedury dla danych syntetycznych.	123
IV.8	WNIOSKI.....	124
ROZDZIAŁ V WYNIKI I DYSKUSJA.....		127
V.1	OPIS BADANYCH MATERIAŁÓW.....	127
V.2	WYNIKI BADAŃ DLA BELEK BETONOWYCH.....	132
V.3	REZULTATY IDENTYFIKACJI NA PODSTAWIE POMIARÓW FAL POWIERZCHNIOWYCH.....	138
V.4	REZULTATY IDENTYFIKACJI W OPARCIU O CHARAKTERYSTYKĘ WSPÓŁCZYNNIKA ODBICIA.....	146
V.5	DYSKUSJA DOŚWIADCZEŃ Z UŻYTKOWANIA SYSTEMÓW POMIAROWYCH.....	147
V.6	WNIOSKI.....	148
ROZDZIAŁ VI PODSUMOWANIE I WNIOSKI KONCOWE.....		151
BIBLIOGRAFIA.....		155
ANEKS I	OPIS WYBRANYCH SZCZEGÓW METOD OPTYMALIZACYJNYCH.....	165
ANEKS II	SZCZEGÓLY IDENTYFIKACJI PRZY UŻYCIU MODELU HASKELLA Z DANymi SYNTETYCZNYMI.....	173

STRESZCZENIE

Prezentowana praca dotyczy rozwoju narzędzi służących do nieniszczącej i bezkontaktowej diagnostyki stanu (degradacji) materiałów budowlanych, głównie betonów. Uwagę skoncentrowano na dwóch uzupełniających się technikach wykorzystujących propagację fal ultradźwiękowych tj. badaniu propagacji fal powierzchniowych oraz analizie współczynnika odbicia w funkcji kąta padania (reflektometria).

W części teoretycznej rozprawy przedstawiono podstawy modelowania rozpatrywanych zjawisk jak również implementację opisanych modeli w procedurach rozwiązywania zagadnienia odwrotnego. Opracowane na potrzeby pracy oprogramowanie przy użyciu algorytmów optymalizacji wykorzystuje dane pomiarowe do identyfikacji wybranych parametrów badanego ośrodka.

W rozdziałach dotyczących części eksperymentalnej pracy przedstawiono budowę dwóch opracowanych systemów pomiarowych realizujących przyjęte założenia, w tym ich możliwości wykorzystania zarówno w badaniach laboratoryjnych jak i terenowych.

Zastosowania opracowanych narzędzi diagnostycznych omówiono na przykładach wyników uzyskanych w warunkach laboratoryjnych oraz dla rzeczywistych obiektów. Umożliwiają one określenie takich parametrów jak głębokość degradacji, prędkość propagacji fal powierzchniowych i poprzecznych w funkcji głębokości badanego materiału oraz powierzchniową przepuszczalność, porowatość i krętość badanego materiału.

Słowa kluczowe: ultradźwięki, fale powierzchniowe, reflektometria, sterowane systemy pomiarowe, diagnostyka materiałów, identyfikacja, beton, kontrola nieniszcząca, optymalizacja.

ABSTRACT

The present work concerns the development of tools for non-destructive and non-contact diagnostic of state (degradation) of construction materials, mainly concrete. Attention is focused on two complementary techniques using the propagation of ultrasonic waves, i.e. the study of surface waves propagation and the analysis of reflection coefficients as a function of incidence angle (reflectometry).

The theoretical part of the thesis shows the foundations of modelling the considered phenomena, as well as the implementation of the described models in solving the inverse problems. Software developed for this work uses optimization algorithms for identification of model parameters based on the measurement data.

The chapters concerning the experimental work shows the construction of two measurement systems developed according to assumptions, including their possible use in both laboratory and field conditions.

Applications of the developed diagnostic tools are discussed based on the examples of the results obtained in the laboratory and for the real objects. They allow to specify the parameters such as the depth of degradation, velocity of surface and S-waves as functions of the depth for the tested material and surface permeability, porosity and tortuosity of tested material.

Keywords: ultrasounds, surface waves, reflectometry, controlled measurement systems, diagnostic of materials, identification, concrete, NDT, optimization.

WPROWADZENIE

Motywacją pracy, której efekt stanowi zrealizowana rozprawa jest potrzeba opracowania kompleksowego, zautomatyzowanego systemu pomiarowego pozwalającego diagnozować wierzchnią warstwę betonu w sposób całkowicie bezinwazyjny. Dla realizacji postawionych zadań niezbędne jest opracowanie komputerowo sterowanych, zautomatyzowanych systemów pomiarowych wraz z oprogramowaniem do przetwarzania danych, które w oparciu o modele posłużą do estymacji niektórych parametrów badanego materiału. W części eksperymentalnej pracy skupiono się na wykorzystaniu technik ultradźwiękowych. Jako dodatkowe wymagania przyjęto, że wszystkie pomiary będą realizowane w sposób nieinwazyjny przy wykorzystaniu dostępu tylko z jednej strony badanego elementu konstrukcji. Takie założenia są niezbędne aby tworzony system pomiarowy mógł znaleźć zastosowanie w badaniach rzeczywistych obiektów. Bezkontaktowe techniki ultradźwiękowe stanowią nowatorską grupę metod ultradźwiękowych, w której jako medium sprzęgające przetworniki z badanym materiałem wykorzystuje się powietrze. Dzięki temu unika się niekorzystnego wpływu tradycyjnych substancji sprzęgających jak żele lub woda, które w zetknięciu z porowatym betonem lokalnie zmieniają jego właściwości, a ich wysychanie powoduje nieprzewidywalne zmiany w czasie warunków propagacji fal ultradźwiękowych.

Poszukiwanie metod diagnozowania wierzchniej warstwy betonu jest odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie prowadzenia diagnostyki konstrukcji betonowych wynikające z troski o bezpieczeństwo odpowiedzialnych budowli inżynierii lądowej. Szczególnie potrzebną staje się ocena stanu degradacji powodowanej niekorzystnym wpływem środowiska. Diagnostyka powinna dawać odpowiedź na pytanie czy dana konstrukcja jest bezpieczna i może być użytkowana, czy powinna zostać wyremontowana lub zburzona. Stworzenie systemu, który pozwoli rzetelnie i wiarygodnie ocenić stan konstrukcji w sposób nieniszczący niesie za sobą wymierne korzyści. Można to zilustrować na przykładzie mostu, którego każdy dzień wycofania z eksploatacji wiąże się z poważnymi kosztami. Najlepszym rozwiązaniem jest rozpoczęcie remontów dokładnie wtedy, kiedy wymaga tego stan konstrukcji. Zapobiega to stratom finansowym z powodu przedwczesnego wycofania obiektu z eksploatacji zapewniając jednocześnie bezpieczeństwo jego funkcjonowania do czasu remontu. Konieczność wykonywania badań dotyczy głównie starszych konstrukcji, dla których często nie istnieje wystarczająca dokumentacja budowlana pozwalająca przewidywać ich aktualny stan. Zaniedbania w monitorowaniu niszczenia/osłabiania konstrukcji mogą prowadzić do tragicznych w skutkach katastrof budowlanych. Analizy ekonomiczne pokazują, że w samym USA

będzie potrzeba wydatkowania ponad \$27¹ bilionów na remonty infrastruktury drogowej i mostów w latach 2009-2014. W Kanadzie już pod koniec XX wieku przewidywano, że 83 % mostów wymaga remontów². Podobnie sytuacja wygląda w Europie, w której duża część infrastruktury betonowej stanowią konstrukcje z lat 50 i 60. Dokładna analiza stanu konstrukcji betonowych pozwala nie tylko na uniknięcie tragicznych wypadków, ale także umożliwia optymalizację kosztów przeprowadzanych inwestycji remontowych. Coraz większe zapotrzebowanie na nieniszczące badania betonów obserwuje się także dla nowo budowanych obiektów. Wynika to głównie z potrzeby ograniczania kosztów i czasu przeprowadzania niezbędnych ekspertyz. Ponadto nie we wszystkich przypadkach można zastosować tradycyjne - niszczące metody diagnostyczne.

Konstrukcje betonowe w czasie eksploatacji podlegają niekorzystnemu działaniu otaczającego środowiska. Dotyczy to zarówno niekorzystnego wpływu zanieczyszczonego powietrza w przypadku budowli wolnostojących, jak i wody lub wody morskiej w przypadku betonowej infrastruktury hydrotechnicznej. Tempo degradacji zależy od wielu czynników, ale największy wpływ na postępujące niszczenie mają: rodzaj betonu użytego w budowie, stopień zanieczyszczenia środowiska, wahania temperatury, wiek konstrukcji oraz sposób jej użytkowania. Prowadzone na szeroką skalę badania w dziedzinie degradacji betonu pokazują, że kluczowa informacja o stanie badanej konstrukcji dotyczy warstwy wierzchniej lub przypowierzchniowej. Ma ona bezpośredni kontakt z otoczeniem, od którego rozpoczyna się degradacja i z upływem czasu postępuje w głąb materiału. Jako warstwę przypowierzchniową uznaje się materiał do głębokości położenia prętów zbrojeniowych. Zazwyczaj jest to warstwa o grubości od 3 cm do 5 cm licząc od powierzchni. Ocena stopnia i głębokości degradacji daje kilka ważnych informacji z punktu widzenia diagnostyki. Najważniejsza jest odpowiedź na pytanie czy degradacja dotarła do pierwszej warstwy zbrojenia. Jeśli tak to istnieje ryzyko, że rozpoczął się proces korozji prętów zbrojeniowych. W takiej sytuacji kolejnym krokiem jest ustalenie stopnia korozji zbrojenia za pomocą odpowiednich metod diagnostycznych. Mechanizmy rozwoju degradacji betonu mogą być zróżnicowane i zależą do wielu czynników. Podsumowanie tych mechanizmów w piśmiennictwie przedstawia między innymi Mehta [Mehta 1997]. Najczęstszy mechanizm degradacji struktur betonowych inżynierii lądowej jest powodowany starzeniem betonu i rozwojem pęknięć pod wpływem przenoszonych obciążeń. Każda budowla betonowa w czasie eksploatacji poddawana jest różnego typu obciążeniom w zależności od jej przeznaczenia i położenia. Biorąc jako przykład konstrukcję mostową wiadomo, że jest ona poddawana znacznym obciążeniom mechanicznym, co w połączeniu ze starzeniem się betonu doprowadza do pojawienia się

¹ ASCE, <http://www.infrastructurereportcard.org/report-cards>

² FCM, <http://www.fcm.ca/english/view.asp?x=1>

mikropęknięć. Z czasem mikropęknięcia rozwijają się tworząc coraz dłuższe i głębsze pęknięcia. Osłabiona warstwa powierzchniowa zaczyna tracić swoją szczelność pozwalając wilgoci docierać do prętów zbrojeniowych powodując ich korozję i dalsze osłabianie struktury. W gorszej sytuacji są konstrukcje betonowe mające styczność z wodą morską, gdyż są one narażone na degradację jonami chloru, które po dotarciu do zbrojenia powodują znaczne przyspieszenie korozji. Jeśli głębokość degradacji oraz stan warstwy wierzchniej są znane to możliwe jest ustalenie kiedy i jakie środki należy zastosować, aby zapobiec dalszemu zniszczeniu. Dzięki takiej wiedzy zakres i termin remontu można dopasować optymalnie do stanu faktycznego budowli. Stąd też wynika duża waga informacji na temat stanu wierzchniej warstwy betonu o grubości kilku centymetrów.

Do kontroli stanu degradacji betonu używa się głównie metod niszczących. Ich stosowanie jest zawsze niekorzystne, ponieważ prowadzi do osłabiania konstrukcji. W chwili obecnej nie istnieje system kontroli nieniszczącej pozwalający wiarygodnie i zarazem kompleksowo diagnozować stan wierzchniej warstwy betonu. Jakiegokolwiek prace nad różnymi rozwiązaniami są prowadzone w kilku laboratoriach na świecie [Reichling 2009] opracowane dotąd metody NDT (Non Destructive Testing) nie zyskały wystarczającego zaufania w środowisku zajmującym się diagnostyką betonu aby mogły stanowić niezależne i wiarygodne testy.

/

Rozdział I

Charakterystyka podjętego problemu, cel i zakres pracy

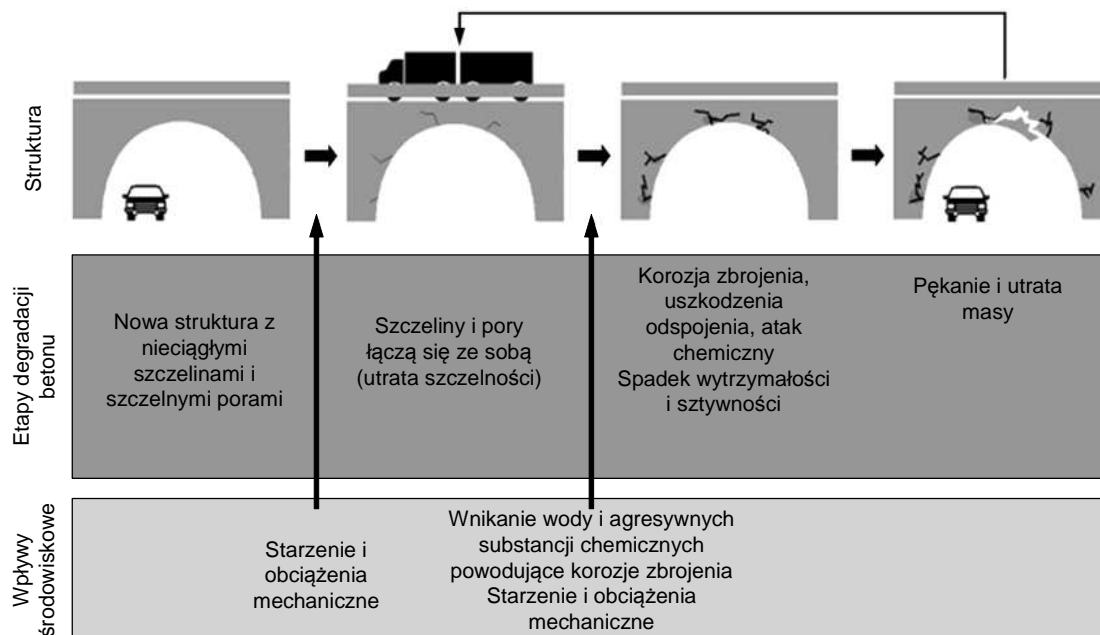
Przedmiotem pracy są metody diagnostyczne wierzchniej warstwy betonów. W poniższym rozdziale zaprezentowano krótki opis procesów degradacji konstrukcji betonowych oraz przegląd wybranych metod kontroli nieniszczącej z wyróżnieniem metod akustycznych. Podano uzasadnienie wyboru dwóch bezkontaktowych metod diagnostycznych, na których skoncentrowano się w dalszej części pracy. Sprecyzowano również cele prezentowanej pracy oraz wymagania stawiane końcowemu rozwiązaniu. Rozdział zakończono opisem zawartości dysertacji.

Mechanizmy degradacji betonu

Jak wspomniano we wprowadzeniu światowe tendencje pokazują rosnące zapotrzebowanie w dziedzinie diagnostyki betonu z naciskiem na metody kontroli nieniszczącej. Potrzeba przeprowadzania rzetelnych badań dotyczy zarówno nowo budowanych obiektów w celu kontroli poprawności ich wykonania ale przede wszystkim starzejących się konstrukcji w celu oceny stopnia ich zdegradowania oraz przewidzenia terminów eksploatacji i konserwacji. W przypadku starszych betonów obserwuje się występowanie kilku mechanizmów degradacji zależnych od czynników zarówno środowiskowych jak i eksploatacyjnych. Poniżej przedstawiono klasyfikację ważniejszych przyczyn degradacji betonu spotykaną w literaturze [Neville, 2000]:

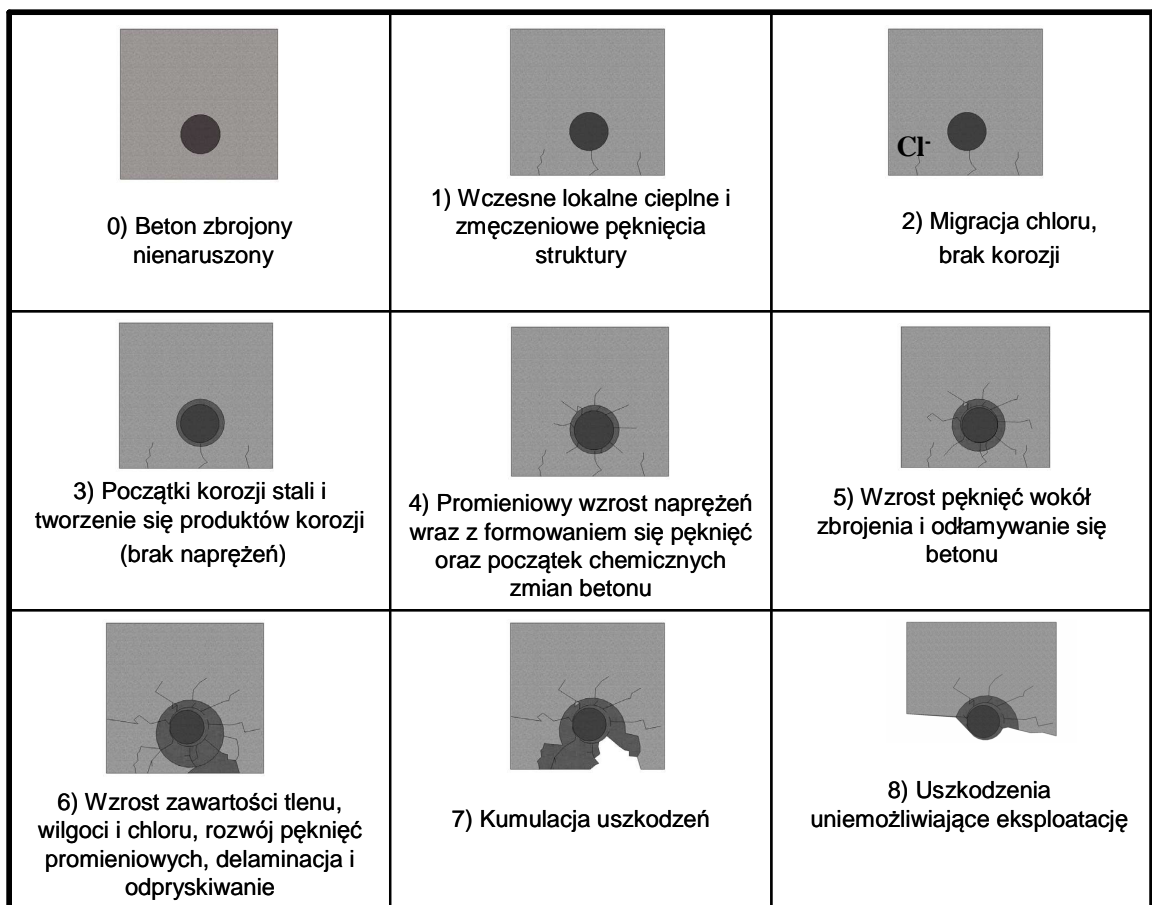
- uszkodzenia mechaniczne powodowane przeciążeniami, uderzeniami wibracjami lub ścieraniem,
- uszkodzenia fizyczne do których przyczynia się np. wysoka temperatura powodująca rozszerzanie się składników betonu o różnych współczynnikach rozszerzalności lub przemarzanie skutkujące rozsadzaniem betonu przez zamarzającą w nim wodę,
- degradacja chemiczna wywołana działaniem składników obecnych w środowisku (agresywne jony, miękka woda, kwasy czy też woda morską).

Prawie zawsze kilka różnych mechanizmów zniszczenia występuje jednocześnie. Uproszczony proces degradacji w wyniku starzenia i obciążeń mechanicznych przedstawiono na rysunku I.1.



Rysunek I.1 Mechanizmy degradacji betonu w wyniku starzenia i zmęczenia obciążeniami mechanicznymi [Mehta 1997].

Świeży beton, mimo że jest porowaty i nie pozbawiony mikropęknięć uznaje się za szczelny. Z upływem czasu w wyniku oddziaływania ze środowiskiem oraz na skutek obciążeń mechanicznych mikropęknięcia zaczynają się powiększać i łączyć ze sobą prowadząc do utraty wodoszczelności. Powiększające się mikropęknięcia i większe pęknięcia pozwalają na wnikanie wody w głąb materiału. Gdy obszar utraty szczelności obejmie pręty zbrojeniowe rozpoczyna się proces ich korozji, a tym samym stopniowa utrata wytrzymałości i sztywności. Pogłębiające się pęknięcia oraz rozwijająca się korozja powodują odpadanie wierzchniej warstwy betonu i dalszą jego degradację w głąb. W szczególnie złej sytuacji są betony narażone na działanie substancji nieobojętnych chemicznie, takich jak jony chloru wody morskiej, czy też związki siarki (kwaśne deszcze). Schematyczny przebieg procesu degradacji w środowisku słonej wody przedstawiono na rysunku I.2. Pokazane etapy degradacji w obecności jonów chloru są identyczne jak w poprzednim przypadku. Różnica polega na tym, że alkaliczny odczyn wilgoci znacznie przyspiesza korozję armatury stalowej. Powoduje to, że od momentu rozszczelnienia betonu na głębokość położenia zbrojenia proces degradacji gwałtownie przyspiesza. Korodująca stal pęcznieje rozsadzając beton otaczający pręty, to zaś powoduje szybsze osłabianie całej konstrukcji.



Rysunek I.2 Proces postępowania degradacji betonu w wyniku działania jonów chloru [Arndt 2009].

Jak zauważono wyżej często degradacji wywołanej niekorzystnym wpływem otoczenia towarzyszy degradacja mechaniczna (przeciążenia, wibracje). Bez względu na to, który z procesów występuje wcześniej lub ma większy udział w ogólnej degradacji ostatecznym efektem jest osłabienie konstrukcji betonowej. Uwaga w pracy jest skoncentrowana na opracowaniu metody diagnostycznej, dzięki której będzie możliwa ocena jakości zdegradowanego materiału i stopnia tej degradacji niezależnie od źródła jej pochodzenia.

Ważniejsze metody kontroli nieniszczącej betonu

Przedstawione wyżej problemy degradacji konstrukcji betonowych uzasadniają potrzebę ich diagnozowania. Poniżej przedstawiono przegląd stosowanych i w dalszym ciągu rozwijanych metod badania betonu. Dostępne metody diagnostyczne można podzielić na trzy podstawowe grupy w zależności od wpływu na badany materiał. Są to metody niszczące, nieniszczące oraz seminiszczące. Dokładniejszy przegląd metod

używanych w diagnostyce betonu przedstawia monografia [Bungey i inni 1996] oraz pozycja autorstwa [Moczko 2006, Mehta i inni. 2006].

Metody niszczące stosowane do diagnozowania konstrukcji betonowych wymagają pobrania reprezentatywnej próbki materiału, często o stosunkowo dużych gabarytach. Najczęściej stosowaną niszczącą metodą badania jest przeprowadzenie testów wytrzymałościowych. Pobranie próbki odbywa się poprzez jej wycięcie z badanej konstrukcji. Dzięki przeprowadzonym testom możliwe jest ustalenie między innymi takich parametrów jak moduł Younga E czy wytrzymałość na ściskanie R_c . Ponadto możliwy jest także pomiar porowatości, na przykład przy użyciu porozymetrii rtęciowej [Cook 1991] oraz pomiar przepuszczalności. Do badania przepuszczalności można zastosować na przykład metodę gazową [Zoubeir i inni 2007]. Pobranie próbki materiału do badań diagnostycznych osłabia badaną konstrukcję. Ponadto dość często okazuje się, że nie można zbadać w ten sposób najważniejszych elementów konstrukcji, gdyż groziłoby to zbyt dużym jej osłabieniem. W takich wypadkach próbki pobiera się z elementów nie odpowiadających za bezpieczeństwo budowli z założeniem, że beton w pozostałych elementach jest w takim samym stanie. Istnieje jednak ryzyko, że założenie to jest niespełnione. Ponadto warto zauważyć, że metody niszczące są czasochłonne oraz wymagają drogiego sprzętu laboratoryjnego.

Istnieje kilka metod badania parametrów betonu w sposób seminieniszczący. Efekty pomiarów w nieznacznym stopniu naruszają badaną konstrukcję, co wyklucza ich stosowanie jedynie w przypadku bardziej odpowiedzialnych elementów konstrukcji. Ingerencja w konstrukcję wymaga zwykle np. wywiercenia niedużego otworu. Do takich badań należą np. pomiary przepuszczalności metodą Figga [Figg 1989] lub pomiary wytrzymałości betonu metodą wrywania (Pullout test) przedstawionej między innymi w Brytyjskiej Normie Budowlanej [BS 1881].

Najbardziej pożądane i rozwijane metody diagnostyki betonu to metody nieniszczące. Można wśród nich wyróżnić między innymi metody typu udarowego, elektryczne, oceny wizualnej oraz metody akustyczne. Te ostatnie zwane też metodami falowymi bazują najczęściej na analizie propagacji fal ultradźwiękowych. Metody akustyczne można podzielić na pasywne, w których źródłem fal jest sama konstrukcja przy zmianie obciążeń (metoda emisji akustycznej) [Ranachowski 1990] oraz metody aktywne polegającej na emisji i odbiorze fal ultradźwiękowych [Hoła i inni 2005, Schabowicz i inni 2008, Kaszyński 2003]. Na obecnym etapie metody aktywne nie są na tyle rozwinięte i sprawdzone by mogły być powszechnie stosowane w terenie, a ponadto w większości przypadków wymagają dostępu z dwóch (przeciwnych) stron badanego elementu lub znajomości dokładnych jego wymiarów. Metody udarowe w większości przypadków polegają na obserwowaniu odpowiedzi jaką daje materiał na skutek

uderzenia. Często stosowaną techniką tego typu jest badanie przy użyciu młotka Schmitha [ACI 228.1R-95 2002]. Istota metody polega na zastosowaniu ciężarka odbijającego się od powierzchni badanego materiału. Wysokość na jaką odbije się ciężarek jest wskaźnikiem jakości materiału. Poprzez odpowiednie relacje przeliczeniowe możliwa jest estymacja parametrów fizycznych badanego materiału takich jak twardość powierzchniowa i wytrzymałość na ściskanie. Obserwacje pokazują, że metoda udarowa jest mało wiarygodna i mało powtarzalna przede wszystkim dlatego, że uderzenie jest punktowe zaś beton silnie niejednorodny. W grupie metod elektrycznych można wyróżnić między innymi metody elektrooporowe i pojemnościowe. Obecnie metody te są wykorzystywane jako pomiary uzupełniające na przykład do oceny wilgotności. W metodach wizualnych można rozróżnić metody badania w świetle widzialnym jak i podczerwonym. Metody obserwacji wizualnej wykorzystujące specjalne mikroskopy lub endoskopy stosuje się głównie do oceny wielkości i gęstości pęknięć czy też mikropęknięć. Ograniczenie zastosowania metod wizualnych wynika z faktu, że przy użyciu tych metod nie można ocenić głębokości obserwowanych pęknięć. Techniki bazujące na analizie obrazów w podczerwieni pozwalają oceniać stan konstrukcji w jej całej objętości lub w dostatecznie dużych obszarach. Metody te zwane również termografią podczerwoną wykorzystują kontrasty przepływu ciepła przy nagrzewaniu i stygnięciu konstrukcji w ciągu doby [Weil i inni 1991]. Pozwalają one na wyszukiwanie obszarów osłabionego materiału, ponieważ wydzielane promieniowanie cieplne takich obszarów różni się od obszarów zdrowego materiału. Należy zaznaczyć, że jakkolwiek metody badań w podczerwieni dają rezultaty jakościowe, a nie ilościowe to pozwalają one wykryć miejsca konstrukcji, w których należy przeprowadzić dodatkowe, bardziej precyzyjne pomiary. Innym ograniczeniem metod z zastosowaniem podczerwieni jest fakt, że badany materiał musi zmieniać swoją temperaturę w czasie pomiaru, co czasami jest niemożliwe lub bardzo trudne w realizacji.

Dobór metody diagnostycznej zależy od kilku czynników. Wybierając metodę w pierwszej kolejności należy ustalić rodzaj, zakres i dokładność szukanych danych dotyczących badanego materiału. Każda z metod diagnostycznych posiada pewne ograniczenia, które mogą uniemożliwić jej stosowanie w warunkach, w jakich znajduje się badana konstrukcja. Takim ograniczeniem jest np. niemożność stosowania metod niszczących do badania kluczowych elementów nośnych konstrukcji betonowej. Niewskazane jest wiercenie, wycinanie lub odłamywanie próbek z takich elementów jak filary, belki stropowe czy podciągi gdyż groziłoby to poważnym naruszeniem struktury nośnej budowli. Należy także zauważyć, że szereg metod wymaga dodatkowych informacji, które można uzyskać przy pomocy innych metod nieniszczących. Charakterystykę ważniejszych metod kontroli nieniszczącej stosowanych w badaniach

betonu pokazano w tabeli I-1. Symbolami **x** zaznaczono możliwości pomiarowe lub cechy, jakie posiada dana metoda. Wiersze tabeli zawierają pożądane kryteria stawiane metodom NDT oraz parametry mechaniczne i strukturalne betonu istotne z punktu widzenia jego diagnostyki.

Tabela I-1. Właściwości ważniejszych metod NDT z porównaniem z metodami niszczącymi w zastosowaniu do betonu (x* - pomiar możliwy ale w praktyce nie stosowany).

	Metoda	Akustyczna	Radarowa	Pojemnościowa	Mikrofalowa	Elektroporowa	Termografii	Udarowa	Testy niszczące
	możliwości pomiarowe								
1	<i>wykonanie testu w terenie</i>	x	x	x	x	x	x	x	
2	<i>dostęp z jednej strony</i>	x	x	x	x	x	x	x	x
3	<i>miar bezkontaktowy</i>	x	x	x	x	x	x		
4	<i>profil prędkości w funkcji głębokości</i>	x							x
5	<i>informacja o obecności zbrojenia</i>	x*	x						x
6	<i>informacja o porowatości</i>	x				x			x
7	<i>informacja o przepuszczalności</i>	x							x
8	<i>informacja o krętości</i>	x				x			
9	<i>informacja o wilgotności</i>			x	x	x	x		x
10	<i>uzyskanie parametrów elastycznych E oraz ν</i>	x							x

Z porównania przedstawionego w tabeli I-1 widać, że najczęściej pożądanym kryterium poza testami niszczącymi spełniają metody akustyczne. Tylko w przypadku pomiaru wilgotności oraz położenia armatury zbrojeniowej należy skorzystać z innych technik. Do ustalenia wilgotności badanego materiału dobrze nadaje się metoda elektromagnetyczna, która polega na estymacji przenikalności elektrycznej ϵ . Pomiaru ϵ można dokonać przy użyciu metody pojemnościowej lub bardziej skomplikowanej metody wykorzystującej wiązkę mikrofal oraz zależność pomiędzy prędkością propagacji i przenikalnością elektryczną ($c=f(\epsilon)$). Wilgoć zawarta w materiale porowatym wpływa na jego pojemność elektryczną jako kondensatora za pośrednictwem ϵ , w którym szkielet materiału stanowi warstwę dielektryczną. Jednocześnie metody elektryczne są w bardzo małym stopniu wrażliwe na parametry mechaniczne materiału. Przy badaniu betonu ze zbrojeniem stalowym, a tak jest w większości przypadków, istnieje ryzyko zakłócenia

pomiarów obecnością prętów zbrojeniowych. Rozwiązaniem tego problemu jest obrazowanie rozmieszczenia armatury zbrojeniowej, a nawet grubości użytych prętów. W tym celu używa się metody radarowej z wykorzystaniem radarów typu GPR (Ground Penetration Radar) [Hubbard i inni 2003, Clemena i inni 1991], która pozwala szybko i precyzyjnie określić położenie elementów zbrojenia. Wadą tej metody jest wysoka cena aparatury pomiarowej. Tańszym rozwiązaniem jest wykorzystanie precyzyjnych detektorów metalu, pozwalających w przybliżeniu określić rozmieszczenie prętów zbrojeniowych bez ustalenia na jakiej znajdują się głębokości. Pozwala to na uniknięcie wpływu zbrojenia przy wyznaczaniu miejsc przeprowadzenia pomiarów betonu.

Tabela I-2. Właściwości ważniejszych metod akustycznych w zastosowaniu do betonu (x* - pomiar możliwy ale w praktyce nie stosowany).

	Metody Akustyczne	Fale objętościowe	Fale powierzchniowe	Impakt echo	Wsteczne rozpraszanie	Reflektometria	Emisja akustyczna	Testy niszczące
Cechy pomiaru oraz uzyskiwane informacje								
1	<i>wykonanie testu w terenie</i>	x	x	x	x	x	x	
2	<i>dostęp z jednej strony</i>		x	x	x	x	x	x
3	<i>pomiar bezkontaktowy</i>	x	x	x		x	x*	
4	<i>profil prędkości w funkcji głębokości</i>		x					x
5	<i>pomiar grupowej prędkości V_P i V_S</i>	x		x				x
6	<i>informacja o porowatości</i>					x		x
7	<i>informacja o przepuszczalności</i>					x		x
8	<i>informacja o krętości</i>					x		
9	<i>informacja o wilgotności</i>							
10	<i>uzyskanie parametrów E oraz ν</i>	x	x					x

Wspomniane w tabeli I-1 metody akustyczne stanowią szerszą grupę technik badań nieniszczących. W tabeli I-2 zestawiono ważniejsze metody akustyczne, a ich możliwości porównano z metodami destrukcyjnymi. W metodach akustycznych najczęściej wykorzystuje się fale o częstotliwościach ultradźwiękowych [Jung i inni 2002]. Ponieważ fala akustyczna jest falą mechaniczną to jej rozchodzenie się jest związane bezpośrednio z mechanicznymi i strukturalnymi parametrami ośrodka, w którym się rozprzestrzenia. W tabeli I-2 wyróżniono możliwość pomiaru profilu prędkości w funkcji głębokości, ponieważ na jego podstawie w sposób bezpośredni można szacować stopień

i głębokość degradacji. Znając prędkość można pośrednio także wyznaczyć wielkości takie jak moduł Younga E czy współczynnik Poissona ν zgodnie z zależnościami:

$$\nu = \frac{c_p^2 - 2c_s^2}{2(c_p^2 - c_s^2)} \quad (1.1)$$

$$E = c_p^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (1.2)$$

gdzie c_p i c_s oznaczają odpowiednio prędkość fali podłużnej i poprzecznej, zaś ρ jest gęstością materiału.

Pomiar prędkości propagacji fal w funkcji głębokości umożliwiają techniki wykorzystujące analizę propagacji fal powierzchniowych, które co ważne wymagają dostępu tylko z jednej stron badanego elementu.

Obok właściwości mechanicznych drugą ważną informacją z punktu widzenia badania jakości betonu jest znajomość jego parametrów struktury takich jak porowatość lub przepuszczalność. Rozwijana w pracy technika reflektometrii ultradźwiękowej daje możliwość ustalania porowatości przypowierzchniowej warstwy materiału przy zachowaniu wymogu dostępu tylko z jednej strony.

Optymalnym rozwiązaniem badań nieniszczących jest połączenie kilku metod uzupełniających się wzajemnie. Metody radarowe jak i pojemnościowe są już na tyle rozwinięte, że mogą być z powodzeniem stosowane do wyżej wymienionych zadań [Balayssac i inni 2009, Ploix i inni 2009, Villain i inni 2009], a w połączeniu z metodami akustycznymi pozwalają spełnić wszystkie postawione kryteria dla kompleksowej diagnostyki bezinwazyjnej betonu. Próba implementacji różnych technik NDT przy badaniu degradacji betonu została podjęta w projekcie SENSO, w ramach którego realizowano część niniejszej pracy. Założeniem projektu było ustalenie parametrów badanego betonu poprzez fuzję danych otrzymanych przy użyciu różnych technik pomiarowych. Więcej informacji na ten temat zamieszczono w rozdziale V.2.

Cel pracy

Głównym celem prac, których opis zawarto w niniejszej rozprawie jest opracowanie bezkontaktowego ultradźwiękowego systemu służącego do kontroli nieniszczącej wierzchniej warstwy betonu. Na podstawie wcześniejszych doświadczeń z zakresu diagnostyki betonu oraz biorąc pod uwagę aktualne trendy określono zakres wymagań i oczekiwania jakie powinien spełniać budowany system. Są to:

- możliwość oceny parametrów mechanicznych i strukturalnych pierwszych 10 cm betonu (pręty zbrojeniowe znajdują się z reguły na głębokości 4-5 cm od powierzchni, a w bardzo niewielu przypadkach głębiej niż 10 cm).
- całkowicie nieniszczący charakter diagnostyki pozwalający na stosowanie opracowanego systemu do badania odpowiedzialnych elementów konstrukcji (belki, filary, podciąg, wzmocnienia, stropy),
- praca bezkontaktowa, niewymagająca stosowania dodatkowych substancji potrzebnych do prowadzenia badań (żele, kleje, woda, itd.). Jako pomiar bezkontaktowy uznaje się pomiar, w którym medium przenoszące fale pomiędzy przetwornikiem a betonem jest powietrze,
- możliwość wykonywania pomiarów przy dostępie tylko z jednej strony badanego elementu,
- możliwość prowadzenia badań w warunkach terenowych (mobilność, nieduża masa i wymiary systemu powinny w jak najmniejszym stopniu ograniczać pomiary ze względu na kształt i położenie badanych elementów),
- powtarzalność i wiarygodność uzyskiwanych wyników,
- bezpieczeństwo stosowania – działanie systemu nie powinno zagrażać operatorowi, środowisku oraz badanemu elementowi,
- szybka i łatwa realizacja badań (aspekt ekonomiczny przeprowadzanych ekspertyz).

Biorąc pod uwagę powyższe wytyczne oraz analizę istniejących metod kontroli nieniszczącej przedstawioną w tabelach I-1 oraz I-2 spośród dostępnych metod wybrano technikę fal powierzchniowych oraz metodę reflektometryczną. W pracy zaproponowano rozwiązanie konfiguracji pomiarowej obejmujące sprzęt, analizę sygnałów i metody interpretacji wyników. Wykonane urządzenia pomiarowe pozwalają realizować badania w sposób bezkontaktowy, dając możliwość zobrazowania stanu materiału w funkcji głębokości.

Uzyskanie informacji o stanie materiału w funkcji głębokości oparto na wyznaczeniu związku pomiędzy częstotliwością propagującej się fali powierzchniowej i głębokością jej wnikania w materiał. Dla zinterpretowania wyników pomiarów zastosowano odpowiednie modele wiążące charakterystykę dyspersyjną z parametrami mechanicznymi i strukturą warstwy wierzchniej (rozkładem niejednorodności) oraz algorytmy rozwiązujące zagadnienie odwrotne.

W celu ustalenia parametrów struktury materiału takich jak porowatość, krętość i przepuszczalność podjęto próbę wykorzystania metody reflektometrii ultradźwiękowej

(metoda reflektometryczna). Metoda polegająca na wyznaczeniu współczynnika odbicia ultradźwiękowej fali podłużnej propagującej się w powietrzu od badanego materiału w funkcji kąta padania. Na podstawie otrzymanej charakterystyki oraz modelu po zastosowaniu algorytmów estymacyjnych można ustalić szukane parametry struktury. Konfiguracja układu pomiarowego dla metody reflektometrycznej pozwala na pracę bezkontaktową przy dostępie tylko z jednej strony badanego elementu.

Realizacja postawionych zadań wymagała:

- opracowania specjalnych systemów pomiarowych, które zapewniają możliwość pracy w terenie przy dostępie tylko z jednej strony badanego obiektu w konfiguracji pracy bezkontaktowej,
- opracowania właściwych metod generowania fal i przetwarzania sygnałów silnie tłumionych fal w celu zapewnienia wysokiej precyzji uzyskiwanych wyników,
- zastosowania modeli opisujących propagację fal mechanicznych w makro- i mikro-niejednorodnym betonie,
- implementacji metod optymalizacyjnych do rozwiązywania zagadnień odwrotnych w celu identyfikacji parametrów określających stan konstrukcji. Pod pojęciem identyfikacji parametrów w pracy rozumie się estymację właściwości materiałowych szukanych na drodze rozwiązywania zagadnienia odwrotnego (w tym właściwości mechanicznych makro- i mikro-strukturalnych),
- przeprowadzenia badań na materiałach wzorcowych i rzeczywistych obiektach w celu sprawdzenia działania zbudowanego systemu diagnostycznego.

Zawartość pracy

Rozdział I prezentuje ogólny zarys problemu diagnostyki betonu oraz cel i zakres pracy. Jego główną częścią jest analiza dostępnych metod kontroli nieniszczącej w diagnostyce betonu oraz uzasadnienie dokonanego wyboru dwóch metod badań ultradźwiękowych.

Rozdział II dotyczy przedstawienia modeli teoretycznych zastosowanych w pracy. W modelowaniu zjawisk dyspersji fal powierzchniowych odwołano się do dwóch modeli; modelu Haskella-Thomsona opisującego ośrodek warstwowy oraz modelu Gibsona zakładającego liniową zmianę modułu ścinania z głębokością. Część teoretyczną rozszerzono o propozycję metody uwzględniającej dyspersję pochodzącą od tłumienia. Do modelowania współczynnika odbicia od betonu użyto zmodyfikowanego modelu Biota.

Rozdział III to opis aparatury pomiarowej zaprojektowanej i wykonanej na potrzeby realizowanej pracy. Rozdział składa się z dwóch części. W pierwszej poruszane

są zagadnienia dotyczące aparatury do badań propagacji fal powierzchniowych. Druga część jest opisem systemu do pomiaru współczynnika odbicia. Każda z części zawiera także opis procesu akwizycji danych pomiarowych oraz ich przetwarzania, a także testy urządzeń na znanych materiałach.

Rozdział IV przedstawia opis zagadnień estymacji szukanych parametrów modeli na drodze rozwiązywania zagadnienia odwrotnego. W rozdziale zamieszczono opis dwóch oryginalnych algorytmów służących do oceny głębokości degradacji i ustalania parametrów struktury badanych materiałów.

Rozdział V zawiera omówienie najciekawszych wyników pomiarów wykonanych przy użyciu zbudowanych narzędzi diagnostycznych oraz dyskusję wyników. Prezentowane rezultaty dotyczą pomiarów zarówno laboratoryjnych jak i terenowych.

Rozdział VI stanowi podsumowanie pracy wraz z prezentacją wniosków i perspektyw.

Rozdział II

Podstawy teoretyczne zastosowanych metod

Rozdział zawiera opis modeli zjawisk propagacji fal ultradźwiękowych wykorzystywanych w rozwijanych metodach diagnostyki betonu. Skupiono się na analizie propagacji fal powierzchniowych w ośrodku niejednorodnym oraz opisie zjawiska odbicia fal.

Część pierwsza przedstawia podstawy teoretyczne dwóch modeli ośrodków makroniejednorodnych: model Haskella-Thomsona, w którym zakłada się warstwową strukturę ośrodka (każda z warstw jest jednorodna, a niejednorodność ośrodka wynika z różnicy pomiędzy poszczególnymi warstwami) oraz model Gibsona, w którym zakłada się liniową zmianę modułu ścinania w funkcji głębokości. Przeprowadzono analizę wrażliwości modeli oraz zaproponowano podejście pozwalające uwzględnić tłumienie jako niezależną obok niejednorodności przyczynę dyspersji.

W części drugiej ujęto teoretyczne aspekty dotyczące współczynnika odbicia fal propagujących się w powietrzu od powierzchni materiału porowatego w oparciu o zmodyfikowany model Biota przy założeniu braku deformacji szkieletu. Przedstawiono także analizę wrażliwości rozpatrywanego modelu.

II.1 Propagacja fal powierzchniowych w materiałach niejednorodnych

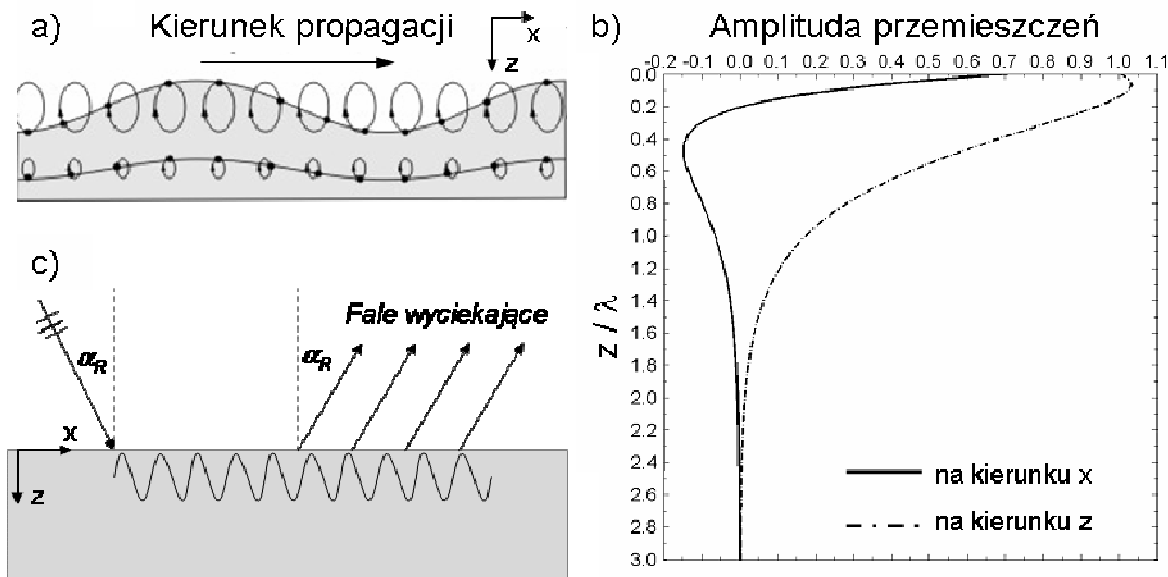
Fale powierzchniowe są zaburzeniami propagującymi się wzdłuż powierzchni materiału sprężystego, kiedy powierzchnia ta graniczy z innym ośrodkiem sprężystym lub próżnią. Rozważane zaburzenia polegają na eliptycznych ruchach cząstek w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni materiału i równoległej do kierunku propagacji (rys. II.1a), a amplituda tych ruchów szybko maleje wraz z głębokością. Fale tego typu w materiale sprężystym, makroskopowo jednorodnym charakteryzują się brakiem dyspersji i nazywa się je falami Rayleigha od nazwiska autora ich opisu matematycznego [Rayleigh 1885]. Prędkość propagacji fal Rayleigha w ośrodku jednorodnym c_R jest pierwiastkiem równania:

$$R(c_R) \equiv \left(2 - \frac{c_R^2}{c_S^2}\right)^2 - 4 \sqrt{\left(1 - \frac{c_R^2}{c_P^2}\right) \left(1 - \frac{c_R^2}{c_S^2}\right)} = 0 \quad (\text{II.1})$$

w którym: $c_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\sigma}$, $c_s = \sqrt{\mu/\rho}$ są odpowiednio prędkościami propagacji fali podłużnej i poprzecznej wyrażonymi poprzez materiałowe stałe Lamego λ , μ , a ρ oznacza gęstość. W większości przypadków stosuje się przybliżone rozwiązanie równania II.1. Dla zakresu liczby Poissona $\nu \in [0, 0.5]$ (zakres, pokrywający większość materiałów w tym betony) bardzo dobrym przybliżeniem jest równanie zaproponowane przez Bergmanna [Bergmann 1948] w postaci:

$$c_R = c_S \left(\frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \right) \quad (\text{II.2})$$

Na rysunku II.1b pokazano jak dla fali Rayleigha zmieniają się amplitudy przemieszczeń cząstek materialnych u i w , odpowiednio w kierunkach stycznym i normalnym względem kierunku propagacji w funkcji głębokości z odniesione do długości fali λ . Na podstawie tej charakterystyki można zauważyć, że amplitudy przemieszczeń są ściśle związane z głębokością i zanikają w ponad 82 % na głębokości równej długości fali.



Rysunek II.1 Cechy propagacji fal Rayleigha w materiale jednorodnym a) przemieszczenia cząstek ośrodka na różnej głębokości wywołane propagacją fali powierzchniowej [wikipedia.pl], b) amplituda przemieszczeń na kierunkach x i z w funkcji głębokości odniesionej do długości fali [Wardany 2005], c) schemat generowania i odbioru fal powierzchniowych.

Jedną z metod generowania fal powierzchniowych jest pobudzenie materiału do drgań falą podłużną padająca na powierzchnię pod kątem α_R . Jest to tzw. trzeci kąt krytyczny wynikający z prawa Snelliusa. Dla przypadku, w którym na materiał sprężysty fala pada z powietrza wartość tego kąta można ustalić z zależności II.1.

$$\alpha_R = \arcsin\left(\frac{c_{P_AIR}}{c_R}\right) \quad (II.3)$$

gdzie c_{P_AIR} oznacza prędkość fali akustycznej w powietrzu.

Propagująca się fala wzdłuż powierzchni materiału będącego w kontakcie z innym ośrodkiem generuje tzw. fale wyciekające (leaky waves) [Victorov 1967], których kierunek propagacji jest odchylony także o kąt α_R od normalnej do powierzchni. Obserwacja lub rejestracja fal wyciekających jest możliwa w sposób bezkontaktowy i co najważniejsze daje pośrednio informację o falach powierzchniowych.

Każdą falę można scharakteryzować między innymi poprzez jej prędkość fazową V i grupową V_{GR} . Rozważając rozchodzenie się monochromatycznej fali płaskiej o częstotliwości kołowej ω jej prędkość fazową można zdefiniować w postaci

$$V = \frac{\omega}{k} \quad (II.4)$$

gdzie jest k liczbą falową. Zakładając, że fala nie jest monochromatyczna ale można ją traktować jak superpozycję fal monochromatycznych o częstotliwościach kołowych zbliżonych do częstotliwości środkowej $\bar{\omega}$, wówczas można wprowadzić pojęcie prędkości grupowej V_{GR} w postaci [Mavko i inni 2003]

$$V_{GR} = \left(\frac{d\omega}{dk}\right)_{\bar{\omega}} \quad (II.5)$$

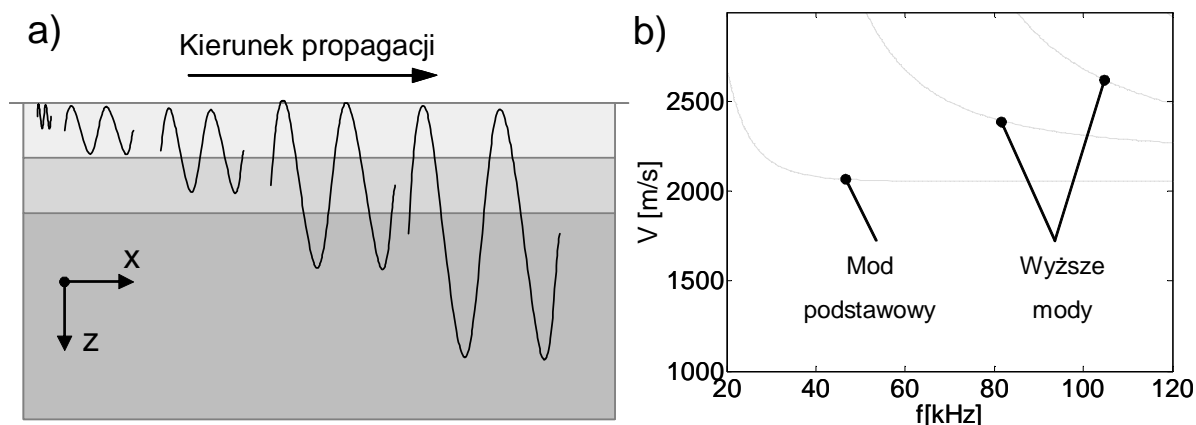
W przypadku ośrodka jednorodnego bez tłumienia o nieskończonej głębokości fale Rayleigha o różnych częstotliwościach (różnych długościach fali) rozchodzą się z tą samą prędkością ($V(f)=const.$), a zatem prędkości fazowe równe są prędkości grupowej ($V=V_{GR}=c$).

Modelowanie zjawiska propagacji fal w materiale niejednorodnym jest rozwijane od lat 50 XX wieku, głównie w geofizyce. Służy ono do opisu propagacji fal sejsmicznych w skałach i gruntach przy poszukiwaniu złóż surowców naturalnych. Najczęściej spotykanym podejściem jest przyjęcie modelu o strukturze warstwowej (np. model Haskella), w którym niejednorodność wynika z faktu, że poszczególne warstwy różnią się własnościami mechanicznymi.

Drugim rozważanym w pracy modelem pozwalającym generować teoretyczne charakterystyki dyspersyjne fal powierzchniowych w ośrodku niejednorodnym (zdegradowanym materiale) jest model oparty na koncepcji „sprężystej półprzestrzeni Gibsona” (w skrócie model nazwany jest modelem Gibsona). W modelu przyjmuje się liniową zależność modułu sztywności poprzecznej od głębokości.

II.1.1 Fale powierzchniowe w ośrodku warstwowo niejednorodnym (model Haskell)

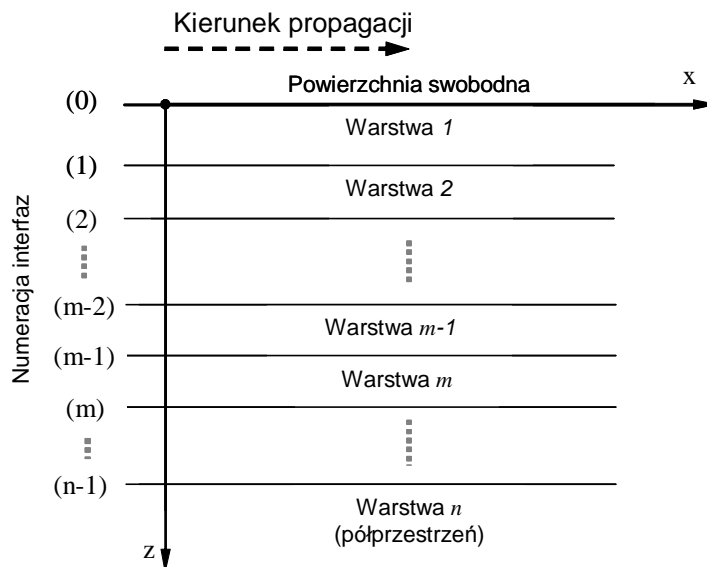
Rozważymy półnieskończony ośrodek niejednorodny, w którym zmiany własności materiału zachodzą skokowo z głębokością w kierunku z . Fale powierzchniowe propagujące się w takim medium nazywane są falami pseudo-Rayleigha i podlegają one dyspersji tj. zależności prędkości od częstotliwości fali. Jest to tzw. dyspersja strukturalna wynikająca z faktu, że fale o różnych długościach wnikają na różne głębokości ośrodka w wyniku czego rozchodzą się z różnymi prędkościami (rys. II.2a). W dziedzinie widmowej można to przedstawić za pomocą charakterystyki dyspersyjnej (rys. II.2b) obrazującej zależność prędkości fazowej w funkcji częstotliwości (charakterystyki dyspersyjne mogą być także prezentowane w dziedzinie długości fali). Skokowa niejednorodność ośrodka skutkuje także powstawaniem wielu modów, tzn. możliwością współistnienia fal mających różne prędkości przy tej samej częstotliwości. Pierwszy lub podstawowy mod charakteryzuje się tym, że przy częstotliwości dążącej do zera jego prędkość dąży do prędkości fali powierzchniowej w półprzestrzeni.



Rysunek II.2 Efekt dyspersji strukturalnej, a) propagacja w materiale niejednorodnym, b) przykład wielomodalnej charakterystyki dyspersyjnej dla ośrodka, w którym prędkości fal objętościowych rosną z głębokością.

Dla częstotliwości dążącej do nieskończoności prędkości wszystkich modów dążą do prędkości fal powierzchniowych w półprzestrzeni o własnościach warstwy najbliższej brzegu ($z=0$).

Istnieje kilka podejść do opisu matematycznego propagacji fal powierzchniowych w ośrodku o strukturze warstwowej, a ich porównanie zawiera między innymi praca [Lowe 1995]. Modele matematyczne opracowane dla zastosowań geofizycznych odnoszą się do fal sejsmicznych i parametrów strukturalnych i mechanicznych gruntów, dla których zakłada się znaczne grubości warstw oraz niskie prędkości i częstotliwości rozchodzących się fal. Warunki te odbiegają od problemu modelowania propagacji fal w diagnostyce zdegradowanego betonu gdzie występują względnie niewielkie grubości warstw, a w związku z tym wysokie częstotliwości. Po przeprowadzonej analizie literaturowej, zwłaszcza pod kątem możliwości implementacji numerycznej dla celów modelowania propagacji fal pseudo-Rayleigha w warstwowo niejednorodnym betonie, wybrano model Thomsona-Haskella (częściej występujący pod nazwą modelu Haskella) nazywany również modelem macierzy przejścia.



Rysunek II.3 Schemat modelowanej struktury warstwowej.

Zaproponowany przez Thomsona w 1950 roku model propagacji fal powierzchniowych w materiale warstwowo niejednorodnym został poprawiony przez Haskella w 1953 [Haskell 1953] i wymaga następujących założeń:

- Rozważane są fale powierzchniowe typu pseudo-Rayleigha (w skrócie Rayleigha) o pulsacji p oraz prędkości fazowej V , w których amplituda maleje eksponencjalnie z głębokością z .

- Rozpatrywany układ posiada n warstw, przy czym ostatnia warstwa jest traktowana jako pół-przestrzeń (warstwa o nieskończonej grubości).
- Naprężenia i przemieszczenia są ciągłe na styku warstw (interfazach).
- Na powierzchni układu brak naprężeń stycznych i normalnych, a w nieskończoności brak jakichkolwiek źródeł fal.
- Warstwy są ciałami stałymi, każda warstwa jest jednorodna w całej swojej objętości i izotropowa.
- Drgania cząstek zachodzą tylko w płaszczyźnie x, z .

Rozpatrywaną makrostrukturę ośrodka pokazano na rysunku . Każda z warstw charakteryzuje się parametrami, które zostały zebrane w tabeli II-1.

Tabela II-1. Parametry warstw w modelu Haskell [Haskell 1953].

Symbol parametru	Opis parametru
ρ_m	Gęstość m -tej warstwy [kg/m^3]
d_m	Grubość m -tej warstwy [m]
$\lambda_m = \frac{E_m \nu_m}{(1 - 2\nu_m)(1 + \nu_m)}$ $\mu_m = G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)}$	Stałe Lamégo m -tej warstwy $(E_m - \text{moduł Younga dla } m\text{-tej warstwy})$ $(G_m - \text{moduł Kirchhoffa dla } m\text{-tej warstwy})$ $(\nu_m - \text{współczynnik Poissona dla } m\text{-tej warstwy})$
$\alpha_m = \sqrt{\frac{\lambda_m + 2\mu_m}{\rho_m}}$	Prędkość propagacji fali podłużnej V_p [m/s] w m -tej warstwie (zachowanie oznaczenia źródłowego)
$\beta_m = \sqrt{\frac{\mu_m}{\rho_m}}$	Prędkość propagacji fali poprzecznej V_s [m/s] w m -tej warstwie (zachowanie oznaczenia źródłowego)

Aby uprościć zapis równań prezentowanego modelu wprowadzono dodatkowo następujące parametry:

$$r_{\text{cm}} = \begin{cases} + \sqrt{\left(\frac{V}{\alpha_m}\right)^2 - 1} & \text{dla } V > \alpha_m \\ -i \sqrt{1 - \left(\frac{V}{\alpha_m}\right)^2} & \text{dla } V < \alpha_m \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

$$r_{\beta_m} = \begin{cases} +\sqrt{\left(\frac{V}{\beta_m}\right)^2 - 1} & \text{dla } V > \beta_m \\ -i\sqrt{1 - \left(\frac{V}{\beta_m}\right)^2} & \text{dla } V < \beta_m \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$\gamma_m = 2\left(\frac{\beta_m}{V}\right)^2 \quad (\text{II.8})$$

gdzie V jest prędkością fazową fali pseudo-Rayleigha.

Biorąc pod uwagę przyjęte założenia zależności opisujące dylatacje Δ_m i rotację ω_m cząstek materialnych w warstwie m wywołane propagacją monochromatycznych fal Rayleigha w tej warstwie można przedstawić w postaci:

$$\Delta_m = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = \exp[i(pt - kx)] [\Delta'_m \exp(-ikr_{cm}z) + \Delta''_m \exp(ikr_{cm}z)] \quad (\text{II.9})$$

$$\omega_m = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \exp[i(pt - kx)] [\omega'_m \exp(-ikr_{\beta_m}z) + \omega''_m \exp(ikr_{\beta_m}z)] \quad (\text{II.10})$$

gdzie k jest liczbą falową symbole Δ'_m , Δ''_m , ω'_m , ω''_m reprezentują stałe odpowiadające amplitudom dylatacji i rotacji w warstwie m . Pulsacja lub częstość kołowa p związana jest z częstotliwością fali f , tj. $p=2\pi f$. Przemieszczenia w kierunkach x i z oznaczone odpowiednio u i w oraz odpowiadające im naprężenia σ i τ dane są równaniami II.11-II.14.

$$u = -\left(\frac{\alpha_m}{p}\right)^2 \left(\frac{\partial \Delta_m}{\partial x}\right) - 2\left(\frac{\beta_m}{p}\right)^2 \left(\frac{\partial \omega_m}{\partial z}\right) \quad (\text{II.11})$$

$$w = -\left(\frac{\alpha_m}{p}\right)^2 \left(\frac{\partial \Delta_m}{\partial z}\right) + 2\left(\frac{\beta_m}{p}\right)^2 \left(\frac{\partial \omega_m}{\partial x}\right) \quad (\text{II.12})$$

$$\sigma = \rho_m \left[\alpha_m^2 \Delta_m + 2\beta_m^2 \left[\left(\frac{\alpha_m}{p}\right)^2 \left(\frac{\partial^2 \Delta_m}{\partial x^2}\right) + 2\left(\frac{\beta_m}{p}\right) \left(\frac{\partial^2 \omega_m}{\partial x \partial z}\right) \right] \right] \quad (\text{II.13})$$

$$\tau = 2\rho_m \beta_m^2 \left[-\left(\frac{\alpha_m}{p}\right)^2 \left(\frac{\partial^2 \Delta_m}{\partial x \partial z}\right) + \left(\frac{\beta_m}{p}\right)^2 \left[\left(\frac{\partial^2 \omega_m}{\partial x^2}\right) - \left(\frac{\partial^2 \omega_m}{\partial z^2}\right) \right] \right] \quad (\text{II.14})$$

W rozpatrywanym przypadku fal brak przemieszczeń w kierunku y . Naprężenia na brzegu półprzestrzeni (dla $z=0$) są równe zero, zaś na styku warstw (na interfazach) zachowana jest ciągłość przemieszczeń i naprężeń. Z warunków tych otrzymujemy 4m-2

równań, które są podstawą wyprowadzenia związków dyspersyjnych rozważanych fal pseudo-Rayleigha. Podstawiając wyrażenia II.9 i II.10 do równań II.11 - II.14 oraz różniczkując po czasie równania dla przemieszczeń (wymaganie ciągłości przemieszczeń będzie także spełnione, jeśli ciągłe będą ich pierwsze pochodne po czasie) otrzymamy zależności dla prędkości cząstek oraz naprężeń dane wzorami:

$$\frac{1}{V} \frac{du}{dt} = -\frac{\alpha_m^2}{V^2} [(\Delta'_m + \Delta''_m) \cos(kr_{cm}z) - i(\Delta'_m - \Delta''_m) \sin(kr_{cm}z)] - \gamma_m r_{\beta m} \cdot \quad (II.15)$$

$$\cdot [(\omega'_m - \omega''_m) \cos(kr_{\beta m}z) - i(\omega'_m + \omega''_m) \sin(kr_{\beta m}z)]$$

$$\frac{1}{V} \frac{dw}{dt} = -\frac{\alpha_m^2}{V^2} r_{cm} [-i(\Delta'_m + \Delta''_m) \sin(kr_{cm}z) + (\Delta'_m - \Delta''_m) \cos(kr_{cm}z)] + \gamma_m \cdot \quad (II.16)$$

$$\cdot [-i(\omega'_m - \omega''_m) \sin(kr_{\beta m}z) + (\omega'_m + \omega''_m) \cos(kr_{\beta m}z)]$$

$$\sigma = -\rho_m \alpha_m^2 (\gamma_m - 1) [(\Delta'_m + \Delta''_m) \cos(kr_{cm}z) - i(\Delta'_m - \Delta''_m) \sin(kr_{cm}z)] + \quad (II.17)$$

$$- \rho_m V^2 \gamma_m^2 r_{\beta m} \cdot [(\omega'_m - \omega''_m) \cos(kr_{\beta m}z) - i(\omega'_m + \omega''_m) \sin(kr_{\beta m}z)]$$

$$\tau = \rho_m \alpha_m^2 \gamma_m^2 r_{cm} [-i(\Delta'_m + \Delta''_m) \sin(kr_{cm}z) + (\Delta'_m - \Delta''_m) \cos(kr_{cm}z)] + \quad (II.18)$$

$$- \rho_m V^2 \gamma_m (\gamma_m - 1) \cdot [-i(\omega'_m - \omega''_m) \sin(kr_{\beta m}z) + (\omega'_m + \omega''_m) \cos(kr_{\beta m}z)]$$

W przypadku, gdy wyrażenia r_{cm} i $r_{\beta m}$ przyjmują wartości zespolone, wówczas związane z nimi funkcje trygonometryczne przechodzą w odpowiadające im funkcje hiperboliczne.

Zgodnie z notacją przyjętą na rysunku numery warstwy i interfazy u jej dolnej podstawy są równe. Umieszczając początek osi z na górnej podstawie warstwy m (interfazie $m-1$), z równań II.15-II.18 dla $z=0$ otrzymamy prędkości przemieszczeń cząstek i naprężenia na interfazie $m-1$ wyrażone przez amplitudy dylatacji i rotacji w warstwie m

$$\left[\frac{1}{V} \left(\frac{du}{dt} \right)_{m-1} \quad \frac{1}{V} \left(\frac{dw}{dt} \right)_{m-1} \quad \sigma_{m-1} \quad \tau_{m-1} \right]^T = E_m \begin{bmatrix} \Delta'_m + \Delta''_m & \Delta'_m - \Delta''_m & \omega'_m - \omega''_m & \omega'_m + \omega''_m \end{bmatrix}^T \quad (II.19)$$

gdzie macierz E_m ma następującą postać

$$E_m = \begin{bmatrix} -\left(\frac{\alpha_m}{V}\right)^2 & 0 & -\gamma_m r_{\beta m} & 0 \\ 0 & -\left(\frac{\alpha_m}{V}\right)^2 r_{cm} & 0 & \gamma_m \\ -\rho_m \alpha_m^2 (\gamma_m - 1) & 0 & -\rho_m V^2 \gamma_m r_{\beta m} & 0 \\ 0 & \rho_m \alpha_m^2 \gamma_m r_{cm} & 0 & -\rho_m V^2 \gamma_m (\gamma_m - 1) \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

Przesuwając następnie punkt obserwacji na dolny brzeg warstwy m tzn. $z=d_m$ z równań II.15 - II.18 można przedstawić prędkości i naprężenia u dolnej podstawy warstwy m (interfazie m) w funkcji amplitud dylatacji i rotacji w tej warstwie

$$\left[\frac{1}{V} \left(\frac{du}{dt} \right)_m \quad \frac{1}{V} \left(\frac{dw}{dt} \right)_m \quad \sigma_m \quad \tau_m \right]^T = D_m \left[\Delta_m' + \Delta_m'' \quad \Delta_m' - \Delta_m'' \quad \omega_m' - \omega_m'' \quad \omega_m' + \omega_m'' \right]^T \quad (\text{II.21})$$

gdzie macierz D_m ma postać

$$D_m = \begin{bmatrix} -\left(\frac{\alpha_m}{V}\right)^2 \cos(P_m) & i\left(\frac{\alpha_m}{V}\right)^2 \sin(P_m) & -\gamma_m r_{\beta m} \cos(Q_m) & i\gamma_m r_{\beta m} \sin(Q_m) \\ i\left(\frac{\alpha_m}{V}\right)^2 r_{cm} \sin(P_m) & -\left(\frac{\alpha_m}{V}\right)^2 r_{cm} \cos(P_m) & -i\gamma_m \sin(Q_m) & \gamma_m \cos(Q_m) \\ -\rho_m \alpha_m^2 (\gamma_m - 1) \cos(P_m) & i\rho_m V_{ph}^2 \gamma_m r_{\beta m} \sin(P_m) & -\rho_m V^2 \gamma_m^2 r_{\beta m} \cos(Q_m) & i\rho_m V^2 \gamma_m^2 r_{\beta m} \sin(Q_m) \\ -i\rho_m \alpha_m^2 \gamma_m r_{cm} \sin(P_m) & \rho_m \alpha_m^2 \gamma_m r_{cm} \cos(P_m) & i\rho_m c^2 \gamma_m (\gamma_m - 1) \sin(Q_m) & -\rho_m V^2 \gamma_m (\gamma_m - 1) \cos(Q_m) \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

zaś $P_m = kr_{cm} d_m$ i $Q_m = kr_{\beta m} d_m$.

Łącząc zależności II.19 i II.21 otrzymujemy wyrażenie II.23 opisujące relacje pomiędzy prędkościami i naprężeniami na interfezach górnej i dolnej warstwy m

$$\left[\frac{1}{V} \frac{du}{dt}_m \quad \frac{1}{V} \frac{dw}{dt}_m \quad \sigma_m \quad \tau_m \right]^T = a_m \left[\frac{1}{V} \frac{du}{dt}_{m-1} \quad \frac{1}{V} \frac{dw}{dt}_{m-1} \quad \sigma_{m-1} \quad \tau_{m-1} \right]^T \quad (\text{II.23})$$

gdzie $a_m = D_m E_m^{-1}$. Stosując identyczne rozumowanie dla warstwy $m-1$ można wyrazić analogiczną relację na interfezach $m-2$ i $m-1$

$$\left[\frac{1}{V_{ph}} \frac{du}{dt}_{m-1} \quad \frac{1}{V_{ph}} \frac{dw}{dt}_{m-1} \quad \sigma_{m-1} \quad \tau_{m-1} \right]^T = a_{m-1} \left[\frac{1}{V_{ph}} \frac{du}{dt}_{m-2} \quad \frac{1}{V_{ph}} \frac{dw}{dt}_{m-2} \quad \sigma_{m-2} \quad \tau_{m-2} \right]^T \quad (\text{II.24})$$

Założenia modelu wymagają, aby zachowana była ciągłość przemieszczeń i naprężeń na styku warstw $m-1$ i m . To założenie pozwala powiązać prędkości przemieszczeń i naprężenia na interfezach $m-2$ (górną warstwy $m-1$) i m (dół warstwy m), co można zapisać w postaci

$$\left[\frac{1}{V} \frac{du}{dt}_m \quad \frac{1}{V} \frac{dw}{dt}_m \quad \sigma_m \quad \tau_m \right]^T = a_m a_{m-1} \left[\frac{1}{V} \frac{du}{dt}_{m-2} \quad \frac{1}{V} \frac{dw}{dt}_{m-2} \quad \sigma_{m-2} \quad \tau_{m-2} \right]^T \quad (\text{II.25})$$

W analogiczny sposób można powiązać ze sobą prędkości i naprężenia dla dowolnych interfez dochodząc ostatecznie do zależności pomiędzy odpowiednimi wielkościami na brzegu półprzestrzeni i ostatnią interfazą ($m=n-1$)

$$\left[\frac{1}{V} \frac{du}{dt}_{n-1} \quad \frac{1}{V} \frac{dw}{dt}_{n-1} \quad \sigma_{n-1} \quad \tau_{n-1} \right]^T = a_n a_{n-1} \dots a_1 \left[\frac{1}{V} \frac{du}{dt}_0 \quad \frac{1}{V} \frac{dw}{dt}_0 \quad \sigma_0 \quad \tau_0 \right]^T \quad (\text{II.26})$$

Zależność tą można traktować jako równanie rekurencyjne, a zatem możliwe jest rozpatrywanie modelu o dowolnej liczbie warstw.

Podstawiając zależność II.19 do równania II.26 można powiązać prędkości i naprężenia na brzegu półprzestrzeni z amplitudami dylatacji i rotacji w ostatniej warstwie n , co wyraża relacja II.27

$$\begin{bmatrix} \Delta_n' + \Delta_n'' & \Delta_n' - \Delta_n'' & \omega_n' - \omega_n'' & \omega_n' + \omega_n'' \end{bmatrix}^{-T} = E_n^{-1} a_{n-1} a_{n-2} \dots a_1 \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{V} \frac{du}{dt_0} & \frac{1}{V} \frac{dw}{dt_0} & \sigma_0 & \tau_0 \end{bmatrix}^T \quad (II.27)$$

W celu uproszczenia zapisu przyjmijmy dalej, że $J = E_n^{-1} a_{n-1} a_{n-2} \dots a_1$. Zakładając, że nie ma żadnych źródeł fal w nieskończoności możemy przyjąć $\Delta_n'' = \omega_n'' = 0$. Uwzględniając warunki brzegowe braku naprężeń na powierzchni ($\sigma_0 = \tau_0 = 0$) równanie II.27 można zapisać w postaci macierzowej

$$\begin{bmatrix} \Delta_n' \\ \Delta_n'' \\ \omega_n' \\ \omega_n'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{V} \frac{du}{dt_0} \\ \frac{1}{V} \frac{dw}{dt_0} \\ V \frac{du}{dt_0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (II.28)$$

Z równania II.28 można wyznaczyć relację pomiędzy prędkościami cząstek na brzegu półprzestrzeni w kierunkach stycznym i normalnym do kierunku propagacji

$$\frac{\dot{u}_0}{\dot{w}_0} = \frac{J_{22} - J_{12}}{J_{11} - J_{21}} = \frac{J_{42} - J_{32}}{J_{31} - J_{41}} \quad (II.29)$$

Uwzględniając fakt, że elementy macierzy J są zależne od zmiennych V, k i p równanie II.29 można traktować jako równanie dyspersyjne. Wynika z niego zależność pomiędzy prędkością fali a częstotliwością, $V(f)$, w której parametrami są własności poszczególnych warstw rozpatrywanego układu. Pierwiastki tego równania przedstawione na płaszczyźnie prędkość- częstotliwość tworzą szukaną charakterystykę dyspersyjną. Analityczne wyznaczenie funkcji $V(f)$ nie jest możliwe, w związku z tym opracowano numeryczne metody znajdowania pierwiastków równania dyspersyjnego.

II.1.2 Numeryczne rozwiązanie równania dyspersyjnego

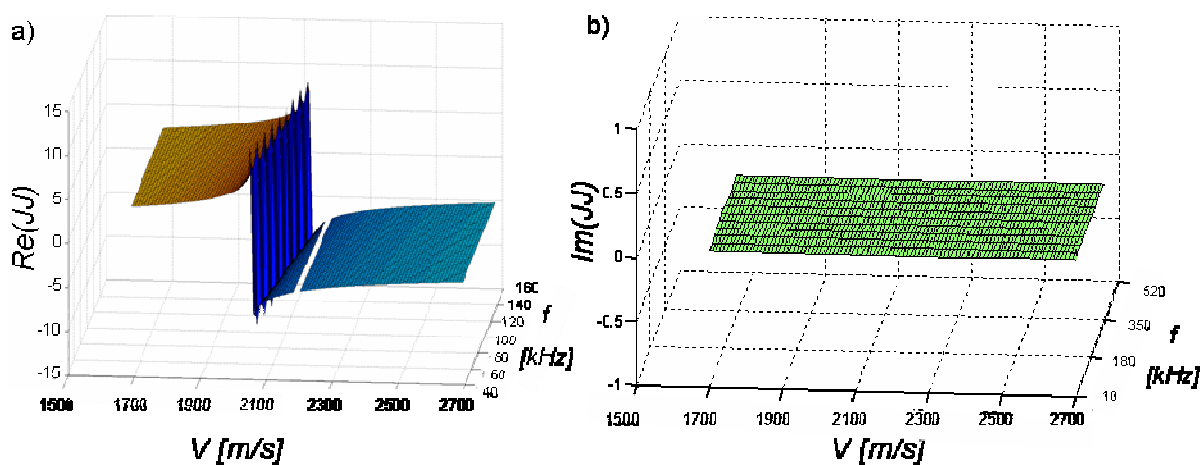
Wykorzystanie modelu Haskell jako podstawy do wyznaczania charakterystyk dyspersyjnych wymaga opracowania algorytmu, który w sposób numeryczny poszukuje pierwiastków równania dyspersyjnego. W tym celu równanie II.29 przekształcono do postaci iloczynowej:

$$JJ = (J_{42} - J_{32})(J_{11} - J_{21}) - (J_{22} - J_{12})(J_{31} - J_{41}) = 0 \quad (II.30)$$

Poszukiwanie rozwiązania równania (II.30) odbywa się na płaszczyźnie prędkość-częstotliwość przy ustalonych pozostałych parametrach modelu. Elementy macierzy J zależą od parametrów układu, a ich skomplikowanie rośnie z liczbą przyjętych warstw, co dobrze obrazuje równanie II.27. Każda warstwa jest opisana przez cztery parametry ρ_m , α_m , β_m , d_m (jak pokazano w tabeli II-1), a ostatnia warstwa ma nieskończoną grubość (jest półprzeźroczysta). Zatem mając n warstw do modelu musimy wstawić $4n-1$ parametrów. Wynika z tego, że liczba warstw ma istotny wpływ na złożoność zagadnienia i czas obliczeń.

Rozwiązanie równania dyspersyjnego polega na znalezieniu zbioru takich par wartości zmiennych V i f , dla których spełniona jest zależność II.30. Istnieje wiele podejść do znalezienia pierwiastków równania II.30. Omówienie jednego z nich można znaleźć w pracy [Lowe 1995], w którym autor proponuje przeszukiwanie płaszczyzny $V(f)$ przy jednoczesnych zmianach prędkości i częstotliwości. W niniejszej pracy przyjęto nieco inne podejście, którego szczegóły przedstawiono poniżej.

W pierwszym etapie rozwiązywania postawionego problemu przeanalizowano przebieg funkcji JJ w zależności od częstotliwości i prędkości. Wzięto pod uwagę fakt, iż w diagnostyce betonu wykorzystuje się częstotliwości od *kilkudziesięciu* do *kilkuset kHz*, zaś prędkości fal powierzchniowych mieszczą się w zakresie od 1500 m/s do 3000 m/s . Przebieg części rzeczywistej JJ^{Re} funkcji JJ w zależności od V i f pokazano na rys. II.4a. Analizując część urojona funkcji JJ zaobserwowano, że przyjmuje ona wartość zero ($JJ^{Im}=0$) w całej dziedzinie (rys. II.4b), a zatem jej rozpatrywanie można pominąć [Lowe 1995].

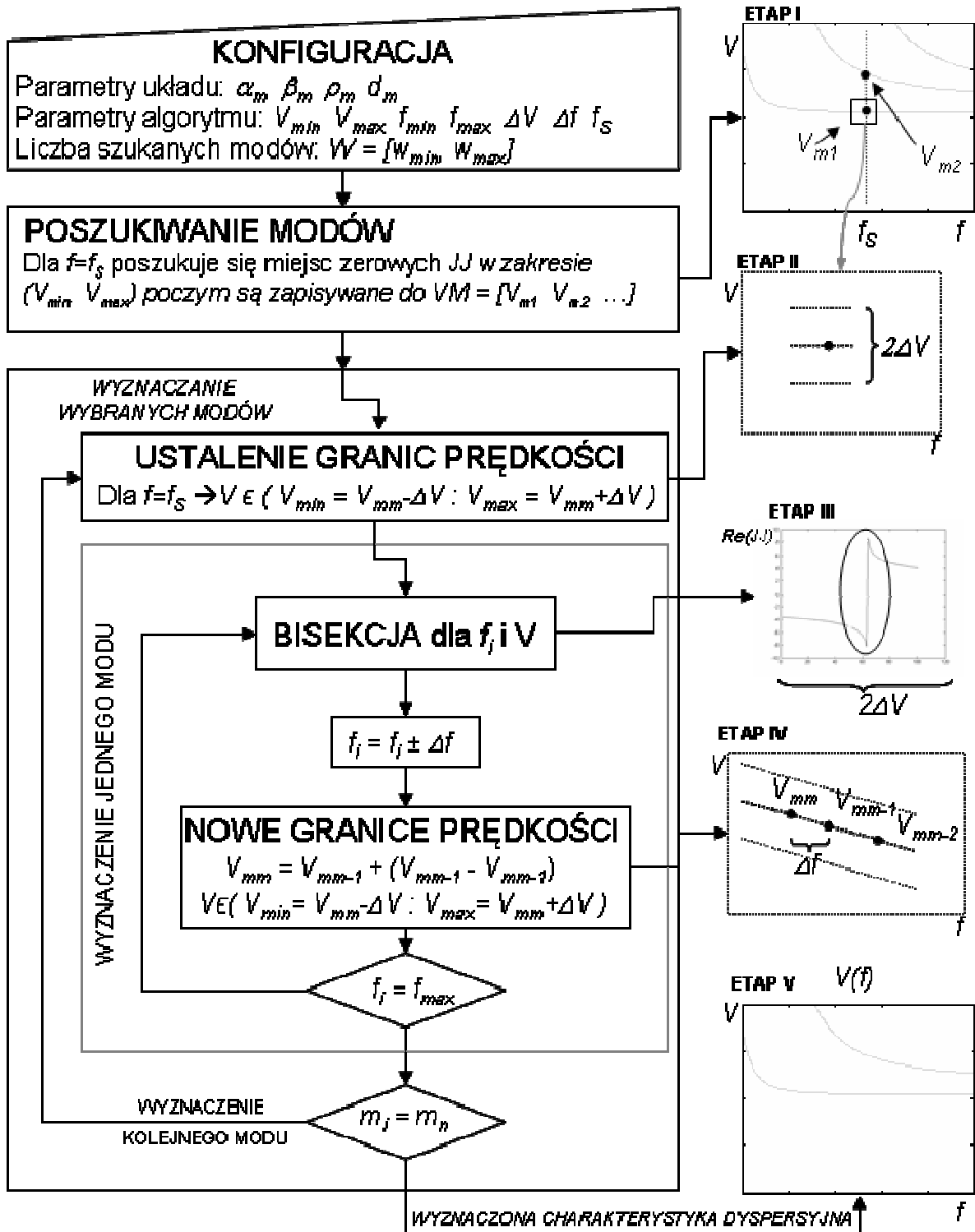


Rysunek II.4 Przebieg funkcji JJ na płaszczyźnie V - f ; a) część rzeczywista, b) część urojona.

W celu zwiększenia efektywności poszukiwania charakterystyki dyspersyjnej funkcję dwóch zmiennych JJ^{Re} sprowadzono do funkcji jednej zmiennej, w której zmienną jest prędkość przy ustalonej wartości częstotliwości, tzn. rozwiązano równanie $JJ^{Re}(V, f=const.)$. Wówczas szukanymi miejscami zerowymi funkcji JJ^{Re} są wartości prędkości, dla których funkcja JJ^{Re} zmienia znak. W zależności od parametrów i rozważanego zakresu zmiennych V i f dla jednej częstotliwości może wystąpić kilka przejść przez zero, co oznacza istnienie wielu modów falowych rys. II.2b. Aby otrzymać pełną wielomodalną charakterystykę dyspersyjną na płaszczyźnie f - V równanie $JJ^{Re}=0$ rozwiązuje się dla kolejnych ustalonych częstotliwości.

Na potrzeby niniejszej pracy opracowano program o nazwie *HASK*, którego algorytm pozwala wyznaczać wybrane mody charakterystyki dyspersyjnej poprzez wyszukiwanie pierwiastków funkcji JJ^{Re} w wybranym zakresie prędkości i częstotliwości. Schemat blokowy działania programu *HASK* przedstawiono na rysunku II.5. Działanie programu rozpoczyna się od konfiguracji, w której ustala się własności każdej z warstw modelowanego układu (jak w tabeli II-1) oraz parametry algorytmu dotyczące zakresu poszukiwań w dziedzinie prędkości i częstotliwości. Istotnym parametrem jest startowa częstotliwość f_s ponieważ od niej zależy liczba wykrytych i szukanych dalej modów (ETAP I). Przykładowo, na schemacie II.5 dla wybranej częstotliwości f_s znaleziono dwa mody. Trzeci mod występuje dopiero dla wyższych częstotliwości, a zatem dla przyjętej częstotliwości startowej i wybranego zakresu prędkości trzeci mod nie będzie mógł być wyznaczony. Użytkownik może wybrać, które z wykrytych modów będą wyznaczane. Wyszukiwanie rozwiązań odbywa się dla prędkości z zakresu ograniczonego wartościami V_{min} i V_{max} . Poszukiwanie pierwiastków funkcji JJ^{Re} odbywa się z użyciem metody równego podziału, zwanej również metodą bisekcji [Aneks I]. Jest to stosunkowo prosty algorytm dający szybkie i stabilne rozwiązanie. Odnalezione miejsca zerowe są zapisywane do wektora VM i służą jako punkty początkowe poszukiwania (śledzenia) wybranych modów. W obrębie punktu startowego szukanego modu V_{min} wyznacza się przedział poszukiwań $2\Delta V$ (ETAP 2 na schemacie II.5). Im węższy będzie to przedział tym szybciej procedura bisekcji znajdzie pierwiastek funkcji JJ^{Re} . (ETAP III na schemacie II.5 pokazuje odnalezienie pierwiastka funkcji JJ^{Re} w przedziale $2\Delta V$). W kolejnym kroku poszukuje się miejsca zerowego funkcji JJ^{Re} dla kolejnej częstotliwości f_i . Poszukiwania także odbywają się w przedziale prędkości $2\Delta V$, a punkt środkowy przedziału jest wyznaczany metodą regresji liniowej na podstawie poprzednich miejsc zerowych (ETAP IV na schemacie II.5). Jeśli w zadanym przedziale nie znaleziono miejsca zerowego jest on stopniowo rozszerzany obustronnie aż do odnalezienia pierwiastka. Śledzenie danego modu kończy się po przeszukaniu całego zadanego zakresu częstotliwości. Pasma poszukiwań jest

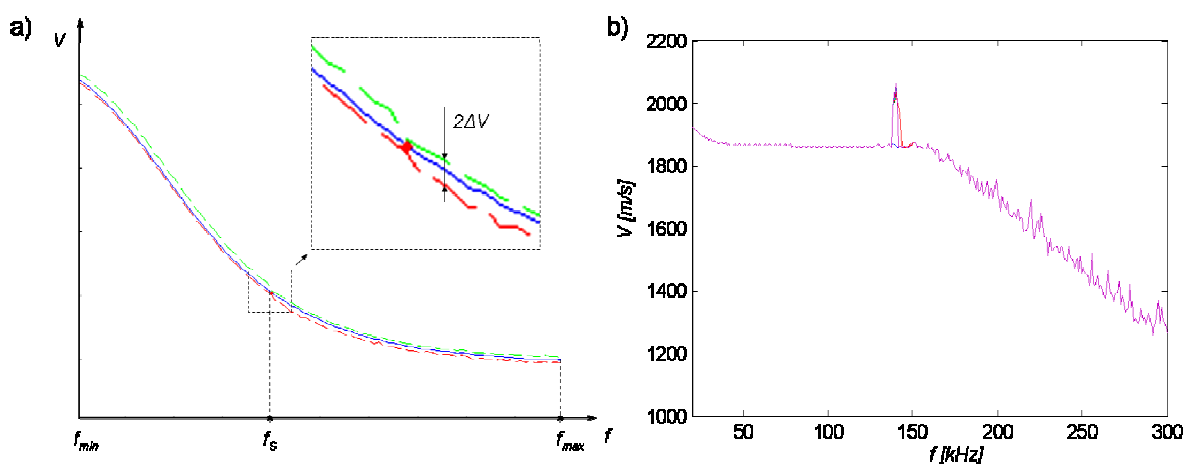
przemiatane najpierw w lewo, a następnie w prawo od częstotliwości startowej f_s . Poszczególne mody są wyznaczane rekurencyjnie począwszy od najniższego. Algorytm kończy działanie po wyznaczeniu wszystkich zadanych modów (ETAP V na schemacie II.5 w tym przypadku wyznaczono dwa najniższe mody).



Rysunek II.5 Schemat blokowy działania programu HASK wyznaczającego pierwiastki równania dyspersyjnego dla modelu Haskell'a.

Na rysunku II.6a pokazano przykładowy pierwszy mod charakterystyki dyspersyjnej uzyskanej przy użyciu programu *HASK*. Liniami przerywanymi zaznaczono przedział $2\Delta V$, w jakim poszukiwane jest rozwiązanie dla poszczególnych częstotliwości. Czerwony punkt na charakterystyce (dla częstotliwości $f_s=60\text{ kHz}$) oznacza pierwsze znalezione miejsce zerowe funkcji JJ^{Re} .

Jednym z problemów przy numerycznym rozwiązywaniu równania dyspersyjnego dla parametrów stosowanych w diagnostyce betonu jest pojawiająca się nieciągłość funkcji JJ^{Re} , co widać na rysunkach II.4a. Nieciągłość ta pojawia się w sytuacji, gdy zmienna V przyjmuje wartość równą prędkości fal podłużnej lub poprzecznej dla którejś z warstw modelu. Poszukiwanie rozwiązania w sposób numeryczny wiąże się z przyjęciem skończonego kroku dyskretyzacji prędkości i częstotliwości. Przy znanych prędkościach fal podłużnej i poprzecznej umożliwia to wyeliminowanie przypadku obliczania równania dla wartości zmiennej V powodującej nieciągłość. Błąd wynikający z ominięcia tej nieciągłości jest pomijalnie mały.



Rysunek II.6 a) Przykład I modu charakterystyki dyspersyjnej wraz z pokazanymi granicami poszukiwań (linie przerywane), b) niestabilność rozwiązania dla wysokich częstotliwości.

W niektórych przypadkach pojawia się problem niestabilności rozwiązywania równania $JJ^{Re}=0$. Na rysunku II.6b pokazano przykład rozwiązania modelu z tak dobranymi parametrami, aby wspomniana niestabilność pojawiła się już dla częstotliwości 140 kHz . Na wykresie widać, że wygenerowany pierwszy mod charakterystyki dyspersyjnej powyżej częstotliwości 140 kHz nie dąży do wartości stałej lecz wykazuje oscylacje i tendencję malejącą wraz ze wzrostem częstotliwości. Takie zachowanie modelu nazywane także problemem dużych grubości i częstotliwości (large df problem) wynika z jego struktury. W modelu przyjmuje się, że naprężenia i odkształcenia na jednej interfejsie są wyrażone

poprzez naprężenia i odkształcenia na interfejsie sąsiedniej. Z fizycznego punktu widzenia problem wynika z gwałtownego zanikania amplitudy w głąb materiału. Przy odpowiednio dużej grubości warstwy i dostatecznie wysokiej częstotliwości amplituda fali zaniknie przed dotarciem od jednej interfejsy do drugiej. Z matematycznego punktu widzenia w warunkach dużych grubości i częstotliwości macierz a_m staje się macierzą źle uwarunkowaną, ponieważ amplituda fali na jednej interfejsie powinna przybierać wartości nieskończenie duże aby fala miała wpływ na sąsiednią interfejsę. Z przeprowadzonych w ramach pracy testów wynika, że dla parametrów modelu spotykanych dla betonów wartość górnej granicy $d \cdot f = 15 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$. Oznacza to, że model będzie działał poprawnie dla warstwy o grubości 1 mm do częstotliwości 15 MHz , dla grubości 10 mm do częstotliwości $1,5 \text{ MHz}$ itd. Przyjęte w pracy założenie badania materiału do głębokości 10 cm ogranicza maksymalną częstotliwość pracy modelu do 150 kHz , ale tylko wtedy, gdy rozpatrywanie tak grubych warstw jest niezbędne. Problem ten bardziej szczegółowo przedstawia praca [Lowe 1995], w której autor otrzymuje podobną granicę działania modelu przy modelowaniu układu warstw tytanowych ($15 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$). Mimo opisanych ograniczeń model Haskell'a dobrze nadaje się do podejmowanej w pracy problematyki modelowania niejednorodności struktur betonowych.

II.1.3 Badania wrażliwości modelu Haskell'a

Informacja o tym, w jaki sposób poszczególne parametry modelu wpływają na jego odpowiedź (rozwiązanie) jest bardzo ważna z punktu widzenia rozwiązywania problemu odwrotnego. Sytuacja jest skomplikowana zwłaszcza wówczas, gdy rozpatrujemy model wieloparametrowy, w którym jednoczesne zmiany kilku parametrów mogą się wzajemnie znosić nie dając zmiany odpowiedzi modelu. W przedstawionych rozważaniach chodzi o ustalenie jaki wpływ na charakterystykę dyspersyjną mają parametry modelu określające własności fizyczne lub strukturalne materiału. Istotne jest także ustalenie, które z parametrów są w rozpatrywanym przypadku ważne i będą podlegać optymalizacji, a które mają marginalny wpływ na charakterystykę dyspersyjną i można je traktować jako stałe. W tym celu zaproponowano systematyczne badanie wrażliwości modelu pozwalające określić wpływ poszczególnych parametrów na kształt charakterystyki dyspersyjnej. Zakresy częstotliwości oraz parametrów fizycznych i strukturalnych użytych w symulacjach zostały dobrane na podstawie wiedzy uzyskanej z pomiarów eksperymentalnych. Dla uproszczenia zakład się układ dwuwarstwowy. Podstawowe parametry symulacji dla wszystkich testów są przedstawione w tabeli II-2. Przyjęto, że pierwsza warstwa modelu odpowiada warstwie zdegradowanej zaś druga warstwa, będąca półprzestrzenią odpowiada nienaruszonemu materiałowi. Do analizy brany jest tylko pierwszy mod charakterystyki dyspersyjnej, ponieważ z badań eksperymentalnych

wiadomo, że jest on modem dominujący pod względem energetycznym. Ponadto w większości eksperymentów jest to jedyny obserwowany mod.

Tabela II-2. Dane do analizy wrażliwości modelu Haskella.

Parametry algorytmu		Parametry układu		
Liczba warstw (wraz z półprzestrzenią)	2		I warstwa	Półprzestrzeń
Śledzony mod	1	Grubość d [mm]	20	$+\infty$
Zakres częstotliwości f_{min}/f_{max}	1 kHz / 200 kHz	Gęstość ρ [kg/m ³]	1900	2200
Skok w częstotliwości Δf	2 kHz	Prędkość V_P [m/s]	4300	4600
Zakres prędkości fazowej V_{min}/V_{max}	1600 m/s / 2500 m/s	Prędkość V_S [m/s]	2370	2425
Skok w prędkości ΔV	0,1 m/s			

Zaprezentowane poniżej badania zawierają cztery testy, z których każdy dotyczy zależności prędkości fali powierzchniowej od jednego z parametrów pierwszej warstwy (d , P , V_P , V_S), podczas gdy własności półprzestrzeni pozostają niezmiennie. Porównanie w ramach poszczególnych testów polega na ocenie ilościowej jak i jakościowej zmian krzywych dyspersji. W ocenie jakościowej posłużono się charakterystykami, na których pokazano jak zmienia się kształt krzywej przy różnych wartościach badanego parametru (rys. II.7). Aby ułatwić porównanie jakościowe, przyjęto jednakowe zakresy osi dla wszystkich wykresów. Przy ocenie ilościowej pod uwagę wzięto unormowaną miarę odchylenia DBC daną równaniem II.31 reprezentującą ilościową różnicę pomiędzy rozwiązaniami dla pierwszej i n -tej wartości parametru P , w określonym zakresie częstotliwości od $j=1$ do k .

$$DBC(P_i, P_1) = \frac{\sum_{j=1}^k \sqrt{(V(f_j, P_1) - V(f_j, P_i))^2}}{\sum_{j=1}^k V(f_j, P_1)} \cdot 100\% \quad (II.31)$$

P_i – i -ta wartość parametru P

P_1 – wartość odniesienia P

f – częstotliwość

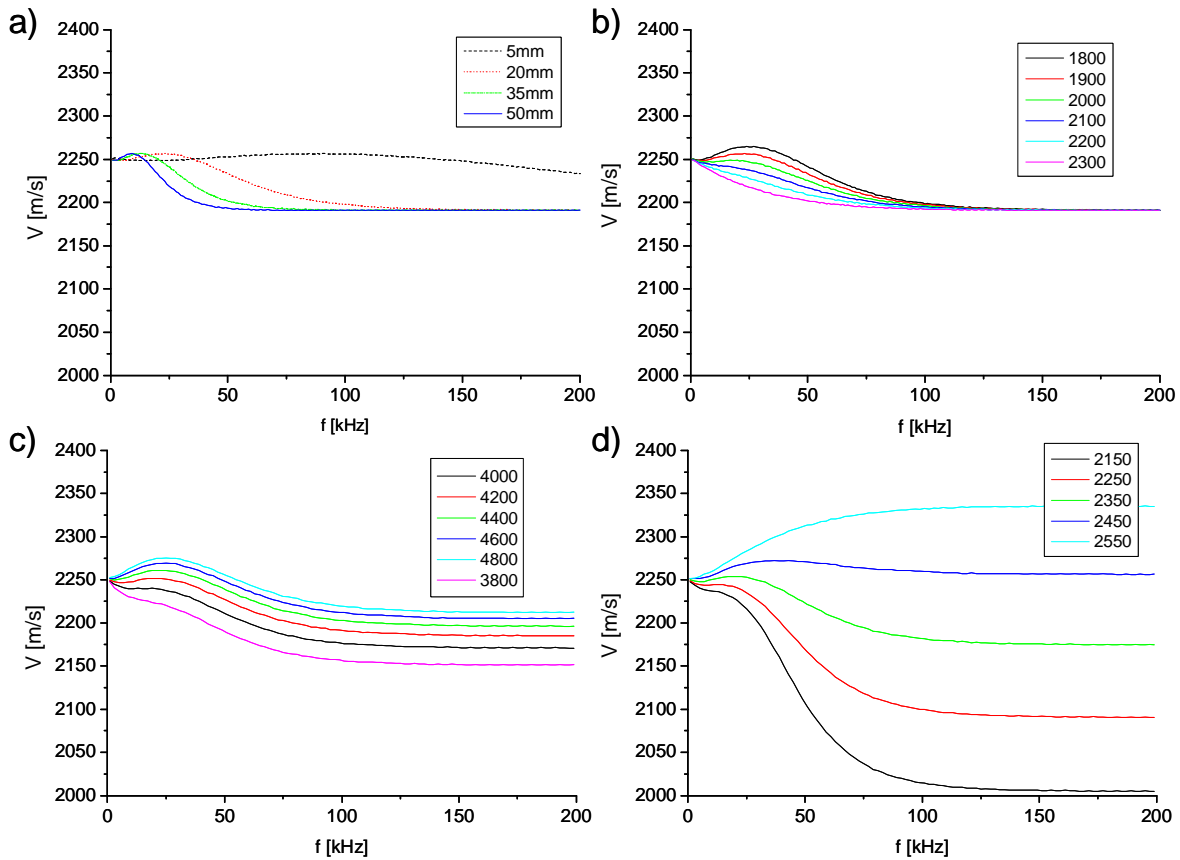
Rozpiętość zmian każdego z parametrów dobrano tak, aby obejmowały przedziały wartości spotykane dla betonów. Dla porządku testy ponumerowano od A do D. Przy zmianie wybranego parametru modelu pozostałe parametry przyjmują wartości jak w tabeli II-2. Wartości grubości warstwy d_1 w teście A przyjęto arbitralnie, zgodnie ze spotykanymi głębokości degradacji. W testach B, C i D przyjęto krok zmian wielkości badanych parametrów w wysokości około 5 % wartości nominalnych zamieszczonych w tabeli II-2. W pierwszej kolejności omówiono rezultaty jakościowe, a następnie ilościowe.

Test A pokazuje jaki wpływ na charakterystykę dyspersyjną ma **zmiana grubości pierwszej warstwy**. Na wykresie II.7a pokazano cztery krzywe dla grubości d od 5 mm do 50 mm. Biorąc od uwagę, że pierwsza warstwa reprezentuje warstwę zdegradowaną betonu, wówczas jej grubość staje się jednym z najbardziej interesujących parametrów diagnostycznych. Z porównania krzywych widać, że dla niskich częstotliwości prędkość fazowa dąży do prędkość fali Rayleigha w warstwie głębokiej, zaś dla wysokich częstotliwości prędkość fazowa dąży do prędkości fali powierzchniowej w warstwie zewnętrznej. Zakres częstotliwości przejścia pomiędzy prędkością warstwy wierzchniej i głębokiej wyraźnie zależy od grubości d . Ponadto można zauważyć, że przejście to jest gwałtowne dla grubej warstwy wierzchniej i bardzo łagodne w przypadku warstwy cienkiej.

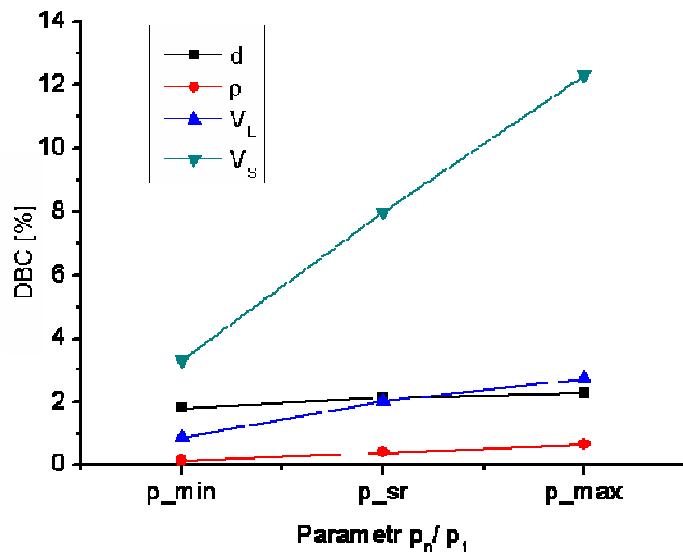
Test B dotyczy wpływu **zmiany gęstość pierwszej warstwy** na kształt krzywej dyspersyjnej (rys. II.7b). Zakres gęstości betonów rzadko wykracza poza przedział od 1800 kg/m^3 do 2300 kg/m^3 , który wzięto pod uwagę. Wyniki dowodzą, że zmiany charakterystyki dyspersyjnej występują jedynie przy niższych częstotliwościach i są to zmiany stosunkowo nieduże.

Test C przeprowadzono dla oceny wpływu **zmian prędkość fali podłużnej** na charakterystykę dyspersyjną (rys. II.7c). Zakres prędkość branych do analizy zawiera się w przedziale od 3800 m/s do 4800 m/s . Zauważamy, że w prawie całym zakresie częstotliwości zmiana prędkości fali podłużnej warstwy powierzchniowej powoduje stosunkowo niewielkie przesunięcie całej charakterystyki względem osi prędkości bez zmiany jej kształtu.

Test D obrazuje jak na charakterystykę dyspersyjną wpływa **zmiana prędkości fali poprzecznej** (rys. II.7d). Przyjęty zakres prędkości V_S to wartości od 2150 m/s do 2550 m/s z krokiem 100 m/s . Zmiana prędkości fali poprzecznej powoduje istotne przesunięcie większej części charakterystyki. Dla niskich częstotliwości wszystkie krzywe zbiegają się do prędkości fali powierzchniowej w półprzestrzeni.



Rysunek II.7 Charakterystyki dyspersyjne wg. dwuwarstwowego modelu Haskell'a przy zmianie parametrów pierwszej warstwy: a) grubości d , b) gęstość ρ , c) prędkości V_p , d) prędkości V_s .



Rysunek II.8 Graficzne przedstawienie oceny ilościowej badania wrażliwości modelu Haskell'a.

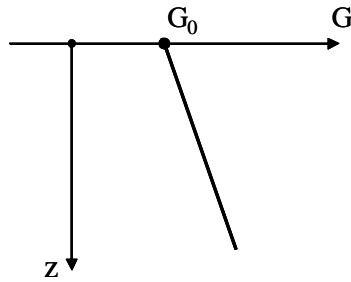
Rezultaty oceny ilościowej wpływu badanych parametrów na krzywą dyspersyjną przedstawiono graficznie na rysunku II.8. Wyniki potwierdzają obserwacje analizy jakościowej (testy A – D), że model Haskella wykazuje największą wrażliwość na zmianę prędkości fali poprzecznej, przy której maksymalna wartość względnej miary DBC dochodzi do 13 %. Zmiana gęstości (test B) najmniej wpływa na kształt krzywej dyspersyjnej, a wartość DBC nie przekraczają 1 %. Wpływ grubości warstwy jest porównywalny z wpływem prędkości fali podłużnej. Z przedstawionego zestawienia można wnioskować, że przy wyborze parametrów identyfikacji warto skoncentrować uwagę na prędkości V_s i grubości d . Informacja o grubości warstwy jest najistotniejsza z punktu widzenia diagnostyki. Ograniczenie liczby parametrów modelu ma kluczowy wpływ na działanie procedur rozwiązywania zagadnienia odwrotnego w procesie identyfikacji zarówno pod kątem szybkości obliczeń jak i jednoznaczności rozwiązań. Ocena wrażliwości powinna być brana pod uwagę przy tworzeniu algorytmów rozwiązywania zagadnienia odwrotnego.

II.1.4 Fale powierzchniowe w ośrodku o liniowej zmianie modułu ścinania (model Gibsona)

W modelu Gibsona zakłada się liniową i ciągłą zmianę modułu sztywności poprzecznej G w funkcji głębokości z (rys. II.9) W niniejszej pracy podjęto próbę zastosowania modelu Gibsona do opisu propagacji fali powierzchniowej w zdegradowanym betonie. Podejście takie jest uzasadnione wówczas, gdy degradacja materiału nie powoduje skokowych zmian właściwości, a dominującym efektem mechanicznym są zmiany modułu ścinania. Półprzestrzeń Gibsona [Gibson 1967] jest zdefiniowana jako niejednorodna półprzestrzeń sprężysta o stałej gęstości ρ i o stałej liczbie Poissona ν w całej objętości. Głównym założeniem modelu jest liniowy wzrost dynamicznego modułu ścinania G w funkcji głębokości z w postaci:

$$G(z) = G_0(1 + mz) \quad (II.32)$$

gdzie parametr m można określić jako stopień niejednorodność materiału. Ma on bezpośredni wpływ na szybkość zmiany modułu ścinania w funkcji głębokości względem wartości przy powierzchni $G_0 = G(z=0)$ (rys. II.9).



Rysunek II.9 Moduł ścinania G w funkcji głębokości z w modelu Gibsona.

Korzystając z zależności pomiędzy modułem ścinania G oraz prędkością propagacji fali poprzecznej V_s można na podstawie II.32 przedstawić prędkość V_s w funkcji głębokości [Xia i inni 2006] w postaci

$$V_s(z) = \sqrt{\frac{G(z)}{\rho}} = V_{s0} \sqrt{1 + mz} \quad (\text{II.33})$$

Zaproponowane w pracy [Vardoulakis i Verttos 1988] przybliżenie modelu propagacji fal powierzchniowych oparte na modelu Gibsona pozwala sformułować równanie dyspersyjne dla podstawowego modu fali Rayleigha w postaci

$$V(f) \cong V_{s0} \left(\frac{1}{\Omega_v(f)} + \sqrt{\frac{1}{\Omega_v(f)^2} + \frac{1}{0.35(3.6 - \nu)}} \right) \quad (\text{II.34})$$

gdzie

$$\Omega_v = \frac{0,56(3.6 - \nu)\Omega}{(1.5 + \nu)}, \quad \Omega = \frac{2\pi f}{mV_{s0}} \quad (\text{II.35})$$

oraz

$V(f)$ – prędkość fazowa fali Rayleigha [m/s],

V_{s0} – prędkość fali poprzecznej przy powierzchni ($z=0$) [m/s],

ν – liczba Poissona.

Zmienne modelu (V_{s0} , m , ν) wiążą ze sobą zmiany prędkości fali poprzecznej $V_s(z)$ w funkcji głębokości ze zmianami prędkości fazowej fali powierzchniowej $V(f)$. Zmienną Ω nazywa się częstotliwością bezwymiarową. Według opracowania [Vardoulakis and Verttos 1988] błąd przedstawionego przybliżenia prędkości fali powierzchniowej w stosunku do rozwiązania dokładnego wynosi do 3 %.

Przewaga modelu Gibsona nad modelem Haskell'a polega na jego prostocie oraz istnieniu rozwiązania analitycznego, co bardzo przyspiesza numeryczne obliczanie charakterystyk dyspersyjnych. Przedstawiony model zaimplementowano w programie

GIBS, którego rezultatem jest charakterystyka dyspersyjna generowana dla dowolnego zestawu parametrów V_{so} , m oraz ν w wybranym zakresie częstotliwości.

II.1.5 Badania wrażliwości modelu Gibsona

Poniżej pokazano w sposób jakościowy oraz ilościowy jak zmienia się kształt charakterystyki dyspersyjnej przy zmianie jednego z parametrów modelu Gibsona. W badaniu wrażliwości modelu przyjęto identyczną konwencję jak w rozdziale II.1.3. Ocenę jakościową przeprowadzono poprzez analizę zmian kształtu charakterystyki dyspersyjnej przy zmianie poszczególnych parametrów modelu. W każdym z testów zmieniany był tylko jeden parametr, przy ustalonych pozostałych. Do oceny ilościowej użyto także zależności II.31. Zakres zmian poszczególnych parametrów odpowiada wartościom najczęściej spotykanym dla betonów. Rezultaty jakościowe jak i ilościowe badań wrażliwości przedstawiono na rysunku II.10.

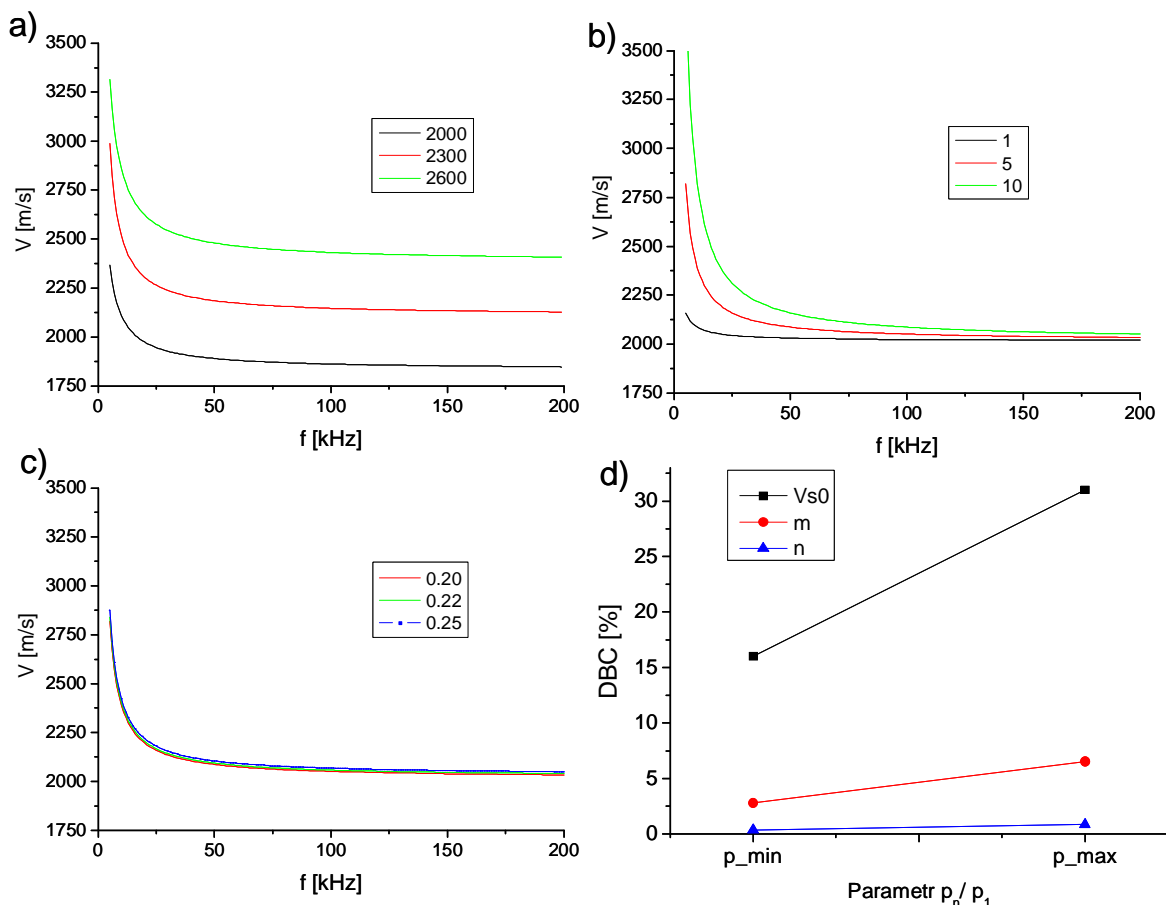
Test A dotyczy wpływu **zmian prędkości fali poprzecznej przy brzegu układu** V_{so} na kształt krzywej dyspersyjnej. Na rysunku II.10a pokazano przebieg charakterystyk dyspersyjnych dla trzech wartości prędkości fali poprzecznej V_{so} tj. 2000 m/s , 2300 m/s , 2600 m/s oraz stałych wartościach współczynnika niejednorodności $m=5$ i liczby Poissona $\nu = 0,2$. Zmiany prędkości V_{so} powodują równoległe przesunięcie charakterystyki bez wyraźnej zmiany jej kształtu.

Test B pokazuje jaki wpływ na charakterystykę dyspersyjną ma **zmiana współczynnika niejednorodności m** . Na rysunku II.10b pokazano wyniki przy zmianie współczynnika m w zakresie od 1 do 10, podczas gdy pozostałe parametry przyjmują wartość $V_{so}=2200\text{ m/s}$ oraz $\nu=0,2$. Można zauważyć, że zmiana parametru m wpływa głównie na kształt charakterystyki dyspersyjnej w zakresie niskich częstotliwości, zaś dla wyższych częstotliwości wszystkie krzywe dążą do tej samej prędkości zbliżonej do wartości prędkości fali powierzchniowej przy brzegu układu.

Test C obrazuje wpływ **zmiany liczby Poissona ν** na przebieg krzywych dyspersyjnych (rys. II.10c). Liczba Poissona dla betonów zawiera się zazwyczaj w granicach od 0,20 do 0,22 i w takich granicach przeprowadzone zostanie badanie modelu. Przedstawione krzywe zostały uzyskane dla $m=5$ oraz $V_{so}=2200\text{ m/s}$. Zestawienie krzywych uwidacznia znikomy wpływ liczby Poissona na krzywe dyspersyjne.

Ocena jakościowa pokazuje znaczną wrażliwość modelu na zmianę prędkości V_{so} oraz na zmianę współczynnika niejednorodności, zaś liczba Poissona ma mało istotne znaczenie. Identyczną tendencję potwierdza analiza ilościowa, przy założeniu, że wartości parametrów zmieniają się w zakresach jak podano w testach A, B i C. Wartości odchylenia DBC dla każdego z parametrów przedstawiono graficznie na wykresie II.10d.

Zmiana prędkość fali poprzecznej w wybranym zakresie powoduje zamianę parametru DBC do 32 %, podczas gdy zmianom liczby Poissona oraz współczynnika niejednorodności m odpowiadają zmiany wartości DBC nie przekraczające odpowiednio 1 % i 6 %. Z przeprowadzonej analizy można wnioskować, że wykorzystanie modelu Gibsona w procesach identyfikacji nie zapewni wiarygodnego ustalenia liczby Poissona.



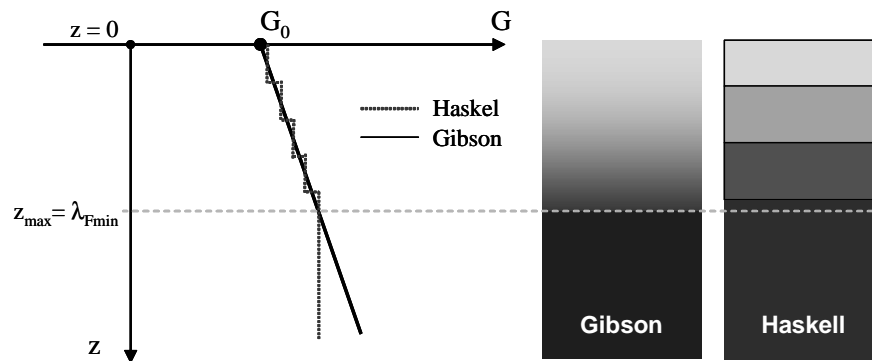
Rysunek II.10 Charakterystyki dyspersyjne wg modelu Gibsona przy zmianie: a) prędkości V_{s0} , b) współczynnika m , c) liczby Poissona ν . d) zestawienie wyników ilościowych.

II.1.6 Porównanie modelu Gibsona z modelem Haskell

W celu porównania rezultatów uzyskanych dla dwóch omówionych wyżej modeli (Haskella i Gibsona) skonfigurowano je tak, aby w przybliżeniu odwzorowywały tą samą niejednorodną makrostrukturę. W tym celu przyjęto następujące założenia:

- model Haskella zawiera 11 warstw licząc z półprzestrzenią,
- parametry pierwszej warstwy modelu Haskella są takie same jak parametry przy brzegu półprzestrzeni w modelu Gibsona,

- gęstość ρ i współczynnik Poissona ν dla wszystkich warstw oraz dla półprzestrzeni Gibsona są takie same,
- grubości wszystkich warstw skończonych w modelu Haskella są równe, a prędkości fal poprzecznych w kolejnych warstwach wynikają z zależności II.33.



Rysunek II.11 Porównanie modułu ścinania G w przypadku struktur opisanych modelami Gibsona i Haskella oraz wizualizacja rozkładu G obu struktur.

Tabela II-3. Parametry modeli Gibsona i Haskella użyte w porównaniu.

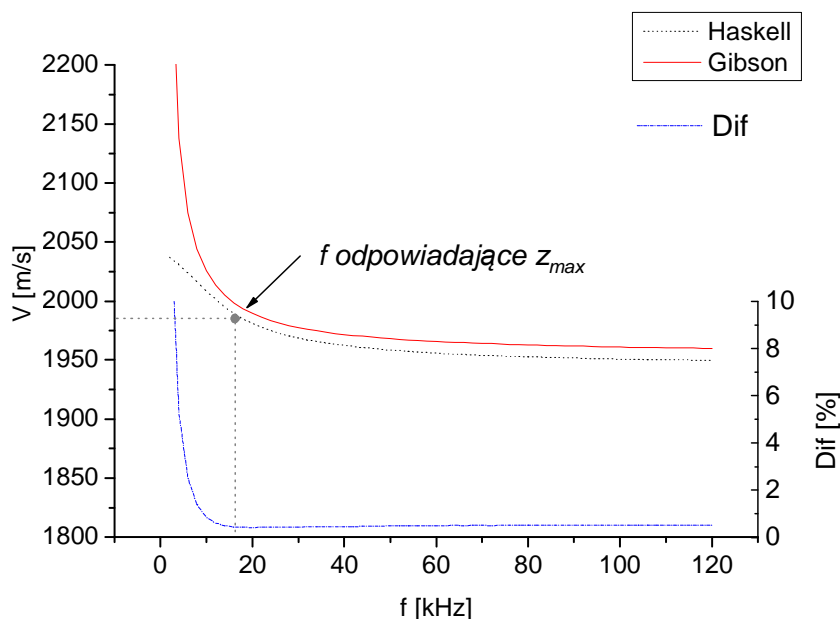
Parametry modelu Gibsona		
Współczynnik Poissona ν	0,3	
Prędkość poprzeczna brzegu układu V_{S0}	2100 [m/s]	
Współczynnik niejednorodności m	1,04	
Parametry modelu Haskella		
Współczynnik Poissona ν (dla wszystkich warstw)	0,3	
Gęstość ρ (dla wszystkich warstw)	2100[kg/m ³]	
Liczba warstw n (wraz z półprzestrzeią)	11	
Grubość warstw (oprócz półprzestrzeni)	0.01 [m]	
Prędkości	V_S [m/s]	V_P [m/s]
I warstwa	2100	3929
II warstwa	2111	3949
warstwa $n - 1$	2195	4107
n -ta warstwa (półprzestrzeń)	2206	4126

Zależności dyspersyjne dla modelu Haskella wyznaczono wykorzystując przedstawiony wcześniej programy HASK. Wartości parametrów użytych w obliczeniach zamieszczono w tabeli . Na wykresie pokazanym na rysunku II.11 porównano moduły

ścianania w funkcji głębokości. Po prawej stronie wykresu pokazano wizualizację graficzną zmian $G(z)$ z zaznaczoną granicą zgodności modeli z_{max} pod względem modułu ścianania. Granica ta odpowiada głębokości degradacji w modelu Haskell. Poniżej tej głębokości w modelu Gibsona moduł sztywności postaciowej nadal zmienia się z głębokością, zaś w modelu Haskell pozostaje stały (jednorodna półprzestrzeń). Porównanie charakterystyk dyspersyjnych dla obydwu modeli przedstawiono na rysunku II.12. Zależność przedstawiona linią Dif ze skalą umieszczoną na osi po prawej stronie wykresu pokazuje względną różnicę pomiędzy przewidywaniami modeli liczoną zgodnie z równaniem

$$Dif(f) = \left| \frac{V_H(f) - V_G(f)}{V_H(f)} \right| 100\% \quad (II.36)$$

gdzie V_H oraz V_G oznaczają prędkości fal powierzchniowych odpowiednio według modelu Haskell i Gibsona częstotliwości f .



Rysunek II.12 Porównanie krzywych dyspersyjnych wyznaczonych z modelu Gibsona (linia ciągła czerwona) i Haskell (linia punktowa czarna) oraz względne różnice Dif między przewidywaniami (linia punktowa niebieska).

Z przedstawionego porównania łatwo zauważyć, że obydwie charakterystyki różnią się nieznacznie w zakresie od 18 kHz do 120 kHz . Względna różnica Dif w tym zakresie jest prawie stała i wynosi około $0,5\%$. Ta niewielka rozbieżność jest uzasadniona przybliżeniami stosowanymi w modelu Gibsona (patrz roz. II.1.4) Poniżej częstotliwości 18 kHz krzywe rozbiegają się (wartość Dif rośnie). Dla częstotliwości 18 kHz wartość prędkości wynosi 1985 m/s , co odpowiada długości fali $\lambda=110,3\text{ mm}$. Parametry modelu

Haskella dobrano tak, aby skokowymi warstwami odwzorować strukturę opisaną modelem Gibsona. Skończona liczba warstw w modelu Haskella powoduje, że zgodność pomiędzy modelami jest zachowana do głębokości $z_{max}=110\text{ mm}$ (10 warstw po 10 mm + pierwsze 10 mm półprzestrzeni – rys. II.11). Głębokość z_{max} odpowiada w przybliżeniu długości fali, dla której wzrasta rozbieżność pomiędzy charakterystykami $\lambda = \lambda_{Fmin} = 110,3\text{ mm}$. Długość fali λ_{Fmin} , do jakiej zachowana jest zbieżność charakterystyk dyspersyjnych koreluje z głębokością do jakiej modelowane struktury są podobne.

Przeprowadzone porównanie potwierdza zgodność modeli i uzasadnia słuszność stosowania modelu Gibsona dla materiałów o ciągłej, w przybliżeniu liniowej zmianie profilu prędkości fali poprzecznej. Więcej porównań obu modeli można znaleźć w rozdziale IV.5.2. Możliwość zastosowania modelu Gibsona zamiast modelu Haskella ze względu na jego prostotę zapewnia istotne przyspieszenie obliczeń charakterystyki dyspersyjnej. Ma to duże znaczenie przy stosowaniu procedur identyfikacji z wykorzystaniem rzeczywistych danych pomiarowych. Pokazane na rysunku II.12 pojawienie się wyraźnej rozbieżności pomiędzy przewidywaniami modeli jest podstawą idei określania głębokości degradacji w oparciu o model Gibsona, przedstawionej w rozdziale IV.5.

II.1.7 Modelowanie tłumienia

Efekt tłumienia fal mechanicznych występuje we wszystkich rzeczywistych materiałach, choć może być na tyle mały, że przy jego pominięciu nie popełnia się istotnych błędów. W wielu przypadkach jednak wielkość lub charakter tłumienia zawierają cenne informacje o badanym materiale, co znajduje wykorzystanie w niektórych metodach badawczych. Wiadomym jest, że z tłumieniem związana jest także dodatkowa dyspersja propagujących się fal. Wielkość dyspersji pochodzącej od tłumienia jest związana z zależnością współczynnika tłumienia od częstotliwości, jaka charakteryzuje badany materiał. W poniższym rozdziale podjęto próbę uwzględnienia dyspersji powiązanej z tłumieniem w celu oceny jej wpływu na całkowitą dyspersję fal powierzchniowych w rozpatrywanych materiałach. Analiza tego zagadnienia pozwoli ustalić czy zasadne jest uwzględnianie dyspersji pochodzącej od tłumienia w procesie poszukiwania parametrów materiału na drodze rozwiązywania zagadnienia odwrotnego przedstawionego w dalszej części pracy.

Rozpiętość wartości tłumienia dla materiałów typu beton jest szeroka i sięga od *kilkudziesięciu* do *kilkuset dB/m*. Mało wiadomo o tłumieniu w betonach zdegradowanych i niejednorodnych. Jest możliwe, że efekty wywołujące tłumienie mogą mieć niepomijalny wpływ na kształt charakterystyki dyspersyjnej fal powierzchniowych. Przykłady

uwzględnienia tłumienia w zagadnieniach geofizycznych propagacji fal powierzchniowych można znaleźć w literaturze [Schevenels i inni 2009, Lai 1998, Rix 2000].

Opis zjawiska tłumienia w betonie jest dość złożony z powodu jego niejednorodności. Niejednorodność jest powodem rozpraszania i makroskopowo obserwowanego tłumienia. Ten rozproszeniowy składnik tłumienia zależy od stosunku długości fali λ do wielkości niejednorodności D [Garnier i inni 2000, Klimis i inni 1988]. W literaturze spotyka się rozróżnienie na trzy zakresy relacji λ i D oraz odpowiadające im związki dla tłumienia α :

$$\lambda \gg D - \text{zakres Rayleigha; } \alpha(f) = \bar{\alpha}_1 f + aD^3 f^4,$$

$$\lambda \approx D - \text{zakres stochastyczny; } \alpha(f) = \bar{\alpha}_1 f + bDf^2,$$

$$\lambda \ll D - \text{zakres geometryczny; } \alpha(f) = \bar{\alpha}_1 f + cD^{-1},$$

gdzie $\bar{\alpha}_1$ zależy do tłumienia dyssypacyjnego zaś a , b i c są stałymi zależnymi od struktury betonu. Biorąc pod uwagę wykorzystywany w pracy zakres długości fal ($\lambda \approx 5 \text{ mm} \div 40 \text{ mm}$) w stosunku do szerokiej rozpiętości niejednorodności w betonie ($D \approx 10 \text{ nm} \div 20 \text{ mm}$) ostatni zakres tłumienia można wykluczyć.

Dla materiałów niejednorodnych typu skały i betony często przyjmuje się uproszczoną, liniową zależność tłumienia od częstotliwości, która uwzględnia jedynie tłumienia wywołane absorpcją (procesami dyssypacyjnymi).

W najprostszym przypadku rozpatrując jednorodny ośrodek bez tłumienia wyrażenie analityczne opisujące widmo $S(\omega, X)$ cylindrycznej fali powierzchniowej opisanej funkcją $s(t, X)$, w odległości X od źródła można wyrazić równaniem II.37:

$$S(\omega, X) = S_o(\omega) \frac{e^{-jkX}}{\sqrt{X}} \quad (\text{II.37})$$

gdzie $S_o(\omega)$ oznacza zespoloną amplitudę, ω i k są odpowiednio częstotliwością kołową i liczbą falową zaś wyrażenie $1/\sqrt{X}$ odpowiada spadkowi amplitudy spowodowanym cylindrycznym rozchodzeniem się fali.

W ośrodku z tłumieniem rzeczywistą liczbę falową k należy zastąpić liczbą zespoloną k'

$$k' = k_\alpha(\omega) + j\alpha(\omega) \quad (\text{II.38})$$

gdzie zarówno rzeczywista składowa k_α jak też urojona składowa α , tożsama ze współczynnikiem tłumienia fali, są w ogólności funkcjami częstotliwości. Liczba falowa k_α jest związana z prędkością fazową w materiale z tłumieniem i oznaczoną przez $V_\alpha(\omega)$

$$k_{\alpha}(\omega) = \frac{\omega}{V_{\alpha}(\omega)} \quad (II.39)$$

Ostatecznie zatem uwzględniając tłumienie równanie II.37 można zapisać w postaci,

$$S(\omega, X) = S_o(\omega) \frac{e^{-\alpha(\omega)X}}{\sqrt{X}} e^{-jk_{\alpha}(\omega)X} \quad (II.40)$$

Wprowadzenie tłumienia w modelu Haskell'a można dokonać na kilka sposobów. Jednym z nich jest założenie, że opisywany materiał posiada własności lepko-sprężyste. Wymaga to wprowadzenia zespolonych wartości prędkości fal podłużnych i poprzecznych dla wszystkich warstw, co w efekcie powoduje podwojenie liczby parametrów modelu. Tak istotny wzrost liczby szukanych parametrów praktycznie wyklucza wykorzystanie modelu do rozwiązywania zagadnienia odwrotnego. Jak już pokazano wcześniej model Haskell'a nie posiada rozwiązania analitycznego, przez co do jego rozwiązania należy korzystać z metod optymalizacyjnych. O ile rozwiązywanie zagadnienia prostego dla modelu bez tłumienia nie stanowi problemu, ponieważ jest to problem z dwiema zmiennymi, to poszukiwanie pierwiastków modelu z tłumieniem musi przebiegać w przestrzeni trzech zmiennych niezależnych, co spowoduje znaczne wydłużenie czasu obliczeń. Komplikuje to zastosowanie takiego podejścia do rozwiązywania zagadnienia odwrotnego, w którym model prosty musi być rozwiązany wielokrotnie. Uznano, że uwzględnienie tłumienia w taki sposób w modelu Haskell'a nie będzie efektywne szczególnie przy rozwiązywaniu zagadnienia odwrotnego. W związku z tym zaproponowano oryginalne odmienne podejście pozwalające wprowadzić udział tłumienia w dyspersji. W tym celu przyjęto założenie addytywności dyspersji strukturalnej i dyspersji od tłumienia, której źródłem jest makroniejednorodność.

Proponowane rozwiązanie polega na obliczeniu dyspersji pochodzącej od tłumienia, a następnie skorygowania eksperymentalnej charakterystyki dyspersyjnej V_E o wpływ tłumienia. W ten sposób uzyskuje się charakterystykę dyspersyjną, której źródłem jest jedynie dyspersja strukturalna. Dopiero tak skorygowana charakterystyka jest wykorzystywana w rozwiązywaniu zagadnienia odwrotnego (model nie uwzględniający tłumienia). Zaletą metody jest możliwość jej stosowania do każdego modelu opisującego zjawisko dyspersji strukturalnej, ponieważ przy uwzględnianiu powiązania dyspersji i tłumienia operuje się na wyznaczonej charakterystyce dyspersyjnej, a nie na równaniach opisujących model.

Wykorzystując wyniki uzyskane dla skał w rozważanym modelu przyjmuje się jednakowy poziom tłumienia w funkcji głębokości oraz zależność tłumienia od częstotliwości daną równaniem [Aki i inni 1990]

$$\alpha(\omega) = \frac{\alpha_1 \omega}{1 + \alpha_T \omega} \quad (II.41)$$

gdzie α_1 jest stałą, zaś wielkość α_T jest stałą, która spełnia zależność $\alpha_T \omega \ll 1$. Powyższe założenia pozwalają wyrazić współczynnik jakości $Q = \frac{\pi}{\lambda \alpha(f)}$ w postaci przybliżenia [Aki

i inni 1990]

$$Q \approx \frac{1}{2V_\infty \cdot \alpha_1} \quad (II.42)$$

Doświadczalnie ustalono, że w zakresie częstości ultradźwiękowych stosowanych w diagnostyce betonu przyjęcie wartości $\alpha_T \omega = 0,1$ daje wyniki zgodne z obserwacjami, a jednocześnie spełnia zasadę przyczynowości [Kuc (1981,1983)]. Przy założeniu II.41 zależność pomiędzy prędkością i tłumieniem dana jest równaniem II.43 [Aki i inni 1990]

$$\frac{1}{V_\alpha(\omega)} = \frac{1}{V_\infty} + \frac{2 \cdot \alpha_1}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{1}{\alpha_T \cdot \omega}\right) \quad (II.43)$$

gdzie V_∞ oznacza prędkość dla dużych częstości ($\omega \rightarrow \infty$). Biorąc pod uwagę, że dla dużych częstotliwości niewielka jest głębokość wnikania fal powierzchniowych ich dyspersja spowodowana jest wówczas jedynie tłumieniem (dyspersja strukturalna jest pomijalnie mała). Równanie II.43 można przekształcić do postaci

$$V_\alpha(f) = \frac{V_\infty}{1 + \frac{1}{\pi \cdot Q} \cdot \ln\left(\frac{1}{\alpha_T \cdot 2\pi f}\right)} \quad (II.44)$$

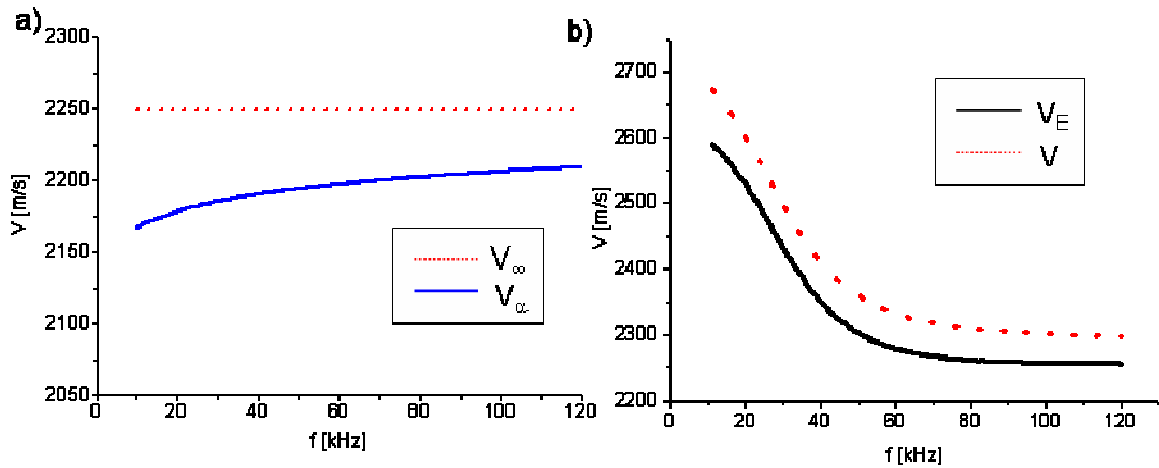
Równanie to przedstawia zależność prędkości fazowej $V_\alpha(f)$ od współczynnika jakości Q oraz prędkości $V_\infty = V(f=\infty)$.

Jeśli eksperymentalną krzywą dyspersyjną, na którą wpływ ma zarówno dyspersja wywołana tłumieniem jak i dyspersja strukturalna oznaczymy jako $V_E(f)$ wówczas wartość V_∞ możemy ustalić przekształcając równanie II.44 do postaci II.45, wstawiając jako $V_E(f_{max})$ wartość prędkości dla najwyższej dostępnej częstotliwości f_{max} eksperymentalnej charakterystyki dyspersyjnej

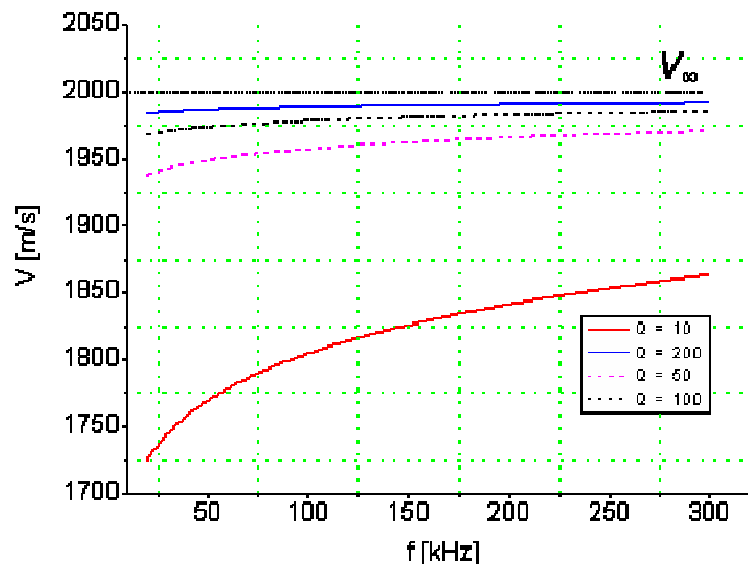
$$V_{\infty} = V_E(f_{\max}) \cdot \left[1 + \frac{1}{\pi \cdot Q} \cdot \log\left(\frac{1}{\alpha_T \cdot 2\pi f_{\max}}\right) \right] \quad (\text{II.45})$$

Znając V_{∞} , Q , α_T ($\alpha_T 2\pi f_{\max} \ll 1$) w równaniu II.44 można obliczyć $V_{\alpha}(f)$, a następnie wektor $\Delta V_{\alpha}(f)$ stanowiący różnicę pomiędzy prędkością V_{∞} i $V_{\alpha}(f)$ (zawsze $V_{\infty} > V_{\alpha}$)

$$\Delta V_{\alpha}(f) = V_{\infty} - V_{\alpha}(f) \quad (\text{II.46})$$



Rysunek II.13 Uwzględnianie dyspersji od tłumienia: a) przebiegi V_{∞} i V_{α} , b) charakterystyki dyspersyjne przed i po uwzględnieniu tłumienia (odpowiednio krzywa V_E i krzywa V).



Rysunek II.14 Dyspersja wynikająca z tłumienia dla $V_{\infty} = 2000$ m/s oraz $Q = 10, 50, 100$ i 200 .

Mając model dyspersji związanej z tłumieniem proponuje się założenie, że całkowita dyspersja fal powierzchniowych w ośrodku makroniejnorodnym stanowi superpozycję dyspersji strukturalnej i dyspersji związanej z tłumieniem. Wartość $\Delta V_\alpha(f)$ stanowi tym samym wkład tłumienia w dyspersję fali powierzchniowej. W rezultacie prędkość fazową fali powierzchniowej obciążonej jedynie dyspersją strukturalną $V(f)$ można aproksymować uwzględniając $\Delta V_\alpha(f)$ jako poprawkę w postaci

$$V(f) = V_E(f) + \Delta V_\alpha(f) \quad (II.47)$$

Znak plus w równaniu wynika z faktu, iż tłumienie powoduje spadek prędkości w całym zakresie częstotliwości. Przebieg prędkości $V_\alpha(f)$ pokazano na rysunku II.13a przyjmując, że $V_\infty = 2300 \text{ m/s}$, $Q = 40$, $\alpha_T = 1,33 \cdot 10^{-8}$. Na rysunku II.13b pokazano przykładową charakterystykę dyspersyjną przed i po uwzględnieniu dyspersji powodowanej tłumieniem dla wartości $Q = 40$. W przykładzie pokazanym na rysunku II.13 średnia bezwzględna zmiana prędkości wynosi około 2,2 %.

Wyniki doświadczeń pokazują, że wartość współczynnika jakości Q dla większości spotykanych betonów mieści się w zakresie od 10 (beton bardzo słaby o wysokim tłumieniu) do 200 (beton dobrej jakości o niskim tłumieniu). Na rysunku II.14 pokazano krzywe dyspersyjne wyznaczone ze wzoru II.44, tzn. dyspersje wywołane jedynie tłumieniem dla skrajnych i pośrednich wartości parametru Q . Do obliczeń przyjęto prędkość $V_\infty = 2000 \text{ m/s}$.

Analizując ilościowy wpływ tłumienia na dyspersję fali powierzchniowej dla wartości prędkości i częstotliwości przyjętych w rozważaniach można zauważyć, że średnia zmiana prędkości zawiera się w przedziale od 0,5 % dla $Q = 200$, do 10 % dla $Q = 10$, przy czym zależność ta jest silnie nieliniowa. Należy zatem przed uwzględnieniem dyspersji pochodzącej od tłumienia rozważyć czy jej wpływ na całkowitą dyspersję nie jest pomijalnie mały.

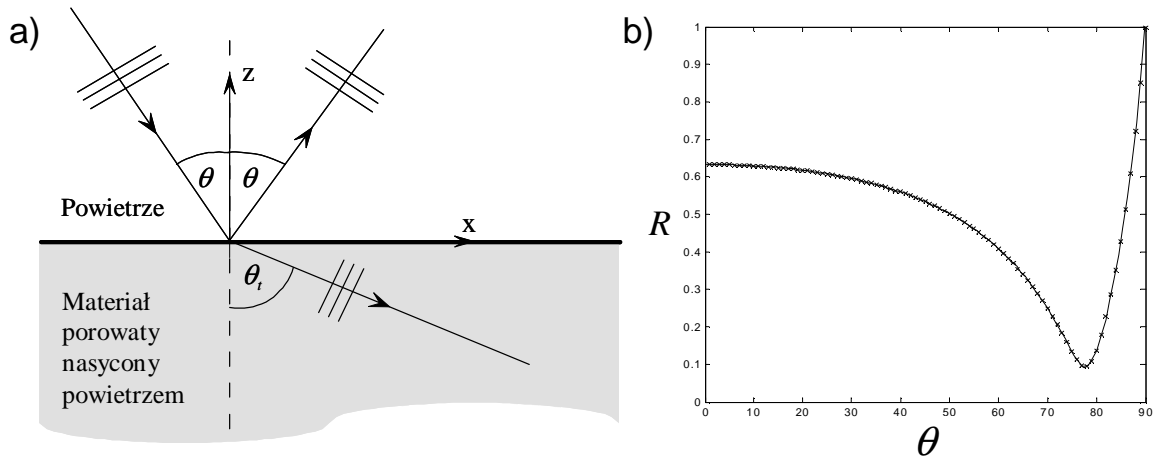
II.2 Modelowanie odbicia fal ultradźwiękowych od powierzchni materiału porowatego w powietrzu

Rozważana metoda reflektometrii ultradźwiękowej polega na pomiarze współczynnika odbicia R fali ultradźwiękowej w powietrzu od powierzchni badanego materiału w funkcji kąta padania/odbicia θ . Wykorzystanie wyników reflektometrii dla celów diagnostycznych wymaga zastosowania modelu matematycznego opisującego rozpatrywane zjawisko. Współczynnik odbicia R określa się jako stosunek amplitud

sygnałów odbitego A_r i wysłanego A_i dla danego kąta padania θ i można go zapisać równaniem

$$R(\theta) = \frac{A_r(\theta)}{A_i} \quad (II.48)$$

Na rysunku II.15a pokazano schematycznie zjawisko odbicia fali na styku płyn/materiał porowaty. Przykładową zależność współczynnika odbicia od kąta padania pokazano na rysunku II.15b.



Rysunek II.15 Reflektometria: a) schemat zjawiska odbicia, b) przykład teoretycznej charakterystyki współczynnika odbicia R w funkcji kąta padania/odbicia θ .

Motywacją do wykorzystania metody reflektometrycznej w diagnostyce betonu są obiecujące wyniki jej zastosowania w badaniach parametrów struktury innych materiałów typu skały i pianki [Hoffren i inni 2004, Hoffren i inni 2005, Fellach i inni 2003]. Prezentowana metoda jest metodą bezkontaktową, w której jako medium propagacji wykorzystuje się powietrze lub wodę. W ramach realizowanej pracy skoncentrowano się głównie na pomiarach w powietrzu, ponieważ mają one szanse stanowić uzupełnienie pomiarów propagacji fal powierzchniowych w przypadku rzeczywistych obiektów betonowych. Pomiarы reflektometryczne w wodzie mogłyby być wykorzystywane w badaniu budowli podwodnych, przy czym wymagają one użycia odpowiedniego modelu i metod identyfikacji. Do pomiaru współczynnika odbicia skonstruowano specjalistyczne urządzenie zwane reflektometrem. Dokładny opis opracowanego urządzenia i techniki pomiaru przedstawiono w rozdziale III.2.

II.2.1 Opis modelu z uwzględnieniem lepkości

Uproszczony wariant prezentowanego podejścia przy pominięciu lepkich sił oddziaływania można znaleźć w pracy Fellacha i innych [Fellach i inni 2003]. Omawiany model pozwala określić porowatość i krętość na podstawie dwóch wartości współczynnika odbicia dla różnych kątów θ z zakresu od 0° do 90° mierząc od normalnej do badanej powierzchni. W warunkach rzeczywistych zakres ten jest nieco mniejszy, gdyż ograniczenia stanowią rozmiary przetworników ultradźwiękowych, o czym mowa w rozdziale III.2.

Wykorzystany w niniejszej pracy model opiera się na odpowiednio uproszczonej teorii Biota [Biot 1956] opisującej propagację fal w lepkim płynie wypełniającym niejednorodny (sztywny) materiał porowaty. Prezentowany model wymaga następujących założeń:

- rozpatrywany jest materiał porowaty nasycony powietrzem,
- materiał porowaty jest jednorodny i izotropowy,
- fale ultradźwiękowe propagują się wyłącznie w płynie wypełniającym pory nie wywołując drgań szkieletu z powodu dużej różnicy impedancji akustycznych,
- uwzględnione są lepkie oddziaływania powietrza z materiałem porowatym,
- pomija się lepkość powietrza poza materiałem porowatym (w warunku brzegowym) oraz zależność od temperatury i wilgotności.

Model propagacji fal w ośrodku porowatym nasyconym powietrzem

Podstawę wyprowadzenia modelu opisującego zjawisko odbicia fali od nasyconego powietrzem ośrodka porowatego stanowi makroskopowe podejście, zwane teorią Biota [Allard 1993, Attenborough 1982, Biot 1956]. Uwzględniając ze względu na różnicę impedancji założenie sztywnego szkieletu równanie bilansu pędu oraz równania konstytutywne opisujące naprężenia w płynie i lepkie oddziaływania płynu ze szkieletem można zapisać w postaci [Allard 1993]

$$\sigma_{ij,j} + m_i + \rho_{12}\dot{v}_i = n\rho\dot{v}_i \quad (\text{II.49})$$

$$\sigma_{ij} = -pn\delta_{ij} = Re \delta_{ij} \quad , \quad m_i = -bn^2Gv_i \quad (\text{II.50})$$

W powyższych równaniach wielkości σ_{ij}, m_i, v_i reprezentują odpowiednio składowe makroskopowego tensora naprężeń, wektora oddziaływań lepkich działających pomiędzy fazami ośrodka oraz wektora prędkości płynu. Składowe prędkości są pochodnymi po czasie składowych wektora przemieszczeń U , tj. $v_i = \dot{U}_i$ $e = U_{i,i}$ jest dylatacją płynu, zaś p, ρ i n oznaczają odpowiednio ciśnienie, gęstość oraz porowatość objętościową. Wielkość b określa opór przepływu i może być przedstawiona za pomocą lepkości

dynamicznej η i przepuszczalności k_0 w postaci $b = \frac{\eta}{k_0}$. Własności sprężyste płynu w przestrzeni porowej można wyrazić zależnością $R = Kn$, gdzie K oznacza moduł sprężystości objętościowej porowca. $\rho_{12} = -(\alpha - 1)n\rho$ reprezentuje współczynnik sprężenia dynamicznego, w którym α oznacza krętość. Skutki mikroskopowych zmian rozkładu prędkości cząstek płynu przy różnych częstotliwościach pobudzenia oraz ich wpływ na makroskopowe oddziaływania pomiędzy płynem i ciałem stałym reprezentuje funkcja G . Rozpatrując wymuszenie harmoniczne o częstotliwości kołowej $\omega = 2\pi f$ funkcję G można przybliżyć używając rezultatów dla porów cylindrycznych [Biot 1956].

$$G(s) = -\frac{s}{4} \sqrt{-i} \frac{J_1(s\sqrt{-i})}{J_0(s\sqrt{-i})} \left[1 - \frac{2}{s\sqrt{-i}} \frac{J_1(s\sqrt{-i})}{J_0(s\sqrt{-i})} \right], \quad (II.51)$$

gdzie $s = c \left(\frac{8\omega\alpha\rho}{bn} \right)^{1/2}$, c jest parametrem zależnym od kształtu przekroju porów (dla porów o przekroju okrągłym $c=1$), zaś J_n to funkcje Bessela pierwszego rodzaju, n -tego rzędu.

Korzystając z równań II.49, i II.50 można otrzymać równie falowe opisujące dylatację płynu zawartego w porach materiału o sztywnym szkielecie w postaci

$$R\nabla^2 e - bn^2 G \dot{e} = \rho_{22} \ddot{e} \quad (II.52)$$

gdzie: $\rho_{22} = n\rho - \rho_{12}$.

Rozpatrując fale harmoniczne rozwiązanie równania II.52 można przedstawić w postaci

$$e = D \exp[i(kx - \omega t)] \quad (II.53)$$

Wielkością k oznaczono liczbę falową zaś D jest amplitudą oscylacji. Podstawiając II.53 do równania II.52 i rozpatrując nietrywialne rozwiązanie ($D \neq 0$) otrzymuje się równanie dyspersyjne, które można przedstawić w postaci zależności opisującej liczbę falową

$$k = \omega \sqrt{\frac{1}{R} \left[\rho_{22} + ibn^2 \frac{G}{\omega} \right]} \quad (II.54)$$

Mając równanie II.54 wyznacza się prędkość fazową fali w powietrzu wypełniającym materiał porowaty $V = \frac{\omega}{\text{Re}(k)}$ oraz jej tłumienie $a = \text{Im}(k)$. W przypadku, gdy pominiemy

wpływ lepkiego tarcia pomiędzy szkieletem i płynem wypełniającym pory wówczas

prędkość fali przyjmuje postać $V = \frac{C}{\sqrt{\alpha}}$, gdzie $C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ oznacza prędkości fali

akustycznej w powietrzu.

Efekty termiczne pochodzące od generowanego ciepła oraz jego przewodzenia w modelu opisującym propagację fali w nasyconym materiale porowatym można uwzględnić w sposób pośredni za pomocą uogólnienia modułu sztywności objętościowej K . Rozważając przypadek wymuszenia harmonicznego oraz przybliżenie porów cylindrycznych o przekroju okrągłym efekty termiczne w powietrzu można zapisać w postaci funkcji zależnej od częstości, w której moduł K dany jest równaniem [Allard 1993]

$$K = K_0 / \left[g - (g - 1) \left[1 + \frac{bn}{iB^2 \omega \rho \alpha} G(Bs) \right]^{-1} \right] \quad (II.55)$$

gdzie g oznacza ciepło właściwe, zaś B^2 liczbę Prandtla (dla powietrza o temperaturze $18^\circ C$ i ciśnieniu $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ przyjmuje się $g = 1,4$ i $B^2 = 0,71$). Wartość modułu K dla powietrza poza próbką przybliża się zależnością $K_0 = gp_0$.

Zjawisko odbicia fali od materiału porowatego nasyconego powietrzem

Rozważmy oddziaływanie fali podłużnej biegnącej z powietrza pod kątem θ z półprzestrzenią ($z > 0$) ciała porowatego, którego pory są wypełnione powietrzem ($z < 0$), rysunek II.15. Zgodnie z przyjętym modelem energia fali padającej rozdziela się na energię fali odbitej pod kątem θ , oraz energię fali załamanej wnikającej w głąb materiału pod kątem θ_r . Rozkład energii pomiędzy falą odbitą i załamaną wynika z przyjętych warunków brzegowych.

Warunki brzegowe na styku powietrza i materiału porowatego

Warunki brzegowe pomiędzy płynem znajdującym się poza materiałem porowatym, w którym pomija się efekt lepkości i płynem lepkiem zawartym w porach materiału porowatego ($z = 0$) można przedstawić następująco [Gurevich i inni 1997, Castagnede i inni 1998]:

- z warunku ciągłości masy wynika równość ilości masy przemieszczającej się przez rozpatrywany brzeg

$$\rho n U_z = \tilde{\rho} \tilde{U}_z, \quad (II.56)$$

- z bilansu pędu wynika związek pomiędzy skokiem ciśnienia płynu i prędkością normalną płynu (powietrza) zawartego w materiale porowatym

$$p - \tilde{p} = Tn \dot{U}_z \quad (II.57)$$

gdzie p oraz ρ oznaczają odpowiednio ciśnienie oraz gęstość powietrza wewnątrz porów. Wielkości \tilde{p} oraz $\tilde{\rho}$ odpowiadają ciśnieniu i gęstości powietrza poza materiałem

porowatym ($z > 0$). \tilde{U}_z oraz U_z są składowymi normalnymi wektora przemieszczeń cząstek powietrza odpowiednio poza i w materiale porowatym. Wielkość T oznacza powierzchniową impedancję przepływu [Castagnede i inni 1998], które w ogólnym przypadku jest funkcją zespoloną zależną od częstotliwości f i może być przedstawione w postaci $T = T_0 G(s)$ przy czym dla $f \rightarrow 0$ T dąży do T_0 . Stała T_0 przyjmuje wartości od zera (dla porów otwartych) do nieskończoności (dla porów zamkniętych). Linearyzując równanie II.56 z uwzględnieniem faktu, że gęstości powietrza poza materiałem i w porach są identyczne, otrzymujemy zależność

$$nU_z = \tilde{U}_z. \quad (II.58)$$

Przyjmując, że ciśnienie w powietrzu można wyrazić w postaci $\tilde{p} = -K_0 \tilde{U}_{i,i}$ oraz korzystając z pierwszego z równań II.50 i zależności pomiędzy prędkością i przemieszczeniem dla ruchu harmonicznego $\dot{U}_z = -i\omega U_z$ warunek II.57 można zapisać

$$KU_{i,i} - K_0 \tilde{U}_{i,i} = i\omega n T U_z. \quad (II.59)$$

Dla przypadku porów otwartych $T=0$ ($p = \tilde{p}$) otrzymuje się

$$KU_{i,i} - K_0 \tilde{U}_{i,i} = 0. \quad (II.60)$$

Współczynnik odbicia

Parametry opisujące właściwości fal odbitych od powierzchni materiału porowatego nasyconego powietrzem można znaleźć rozważając płaskie fale harmoniczne. W tym celu wprowadzamy dwa potencjały $\tilde{\phi}$ oraz ϕ , które reprezentują odpowiednio przemieszczenia w powietrzu poza materiałem porowatym spowodowane superpozycją fali padającej i odbitej oraz przemieszczenia związane z falą wnikającą w materiał. Zatem

$$\tilde{U}_i = \tilde{\phi}_{,i}, \quad U_i = \phi_{,i} \quad (II.61)$$

Rozważając przypadek fali harmoniczej przyjmujemy:

$$\tilde{\phi} = \left(e^{-i\tilde{\gamma}z} + A e^{i\tilde{\gamma}z} \right) e^{i(\sigma x - \omega t)} \quad (II.62)$$

$$\phi = B e^{-i\gamma z} e^{i(\sigma x - \omega t)} \quad (II.63)$$

W równaniach II.62 oraz II.63 wartość amplitudy fali padającej przyjmuje się jako równą jeden, zaś wielkości A i B oznaczają amplitudy odpowiednio fali odbitej i załamanej.

Pozostałe parametry falowe spełniają relacje:

$$\sigma^2 + \gamma^2 = k^2 \quad (\text{II.64})$$

$$\sigma^2 + \tilde{\gamma}^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \quad (\text{II.65})$$

$$\gamma = k \cos \varphi \quad (\text{II.66})$$

$$\tilde{\gamma} = (\omega/c) \cos \tilde{\theta} \quad (\text{II.67})$$

gdzie σ oznacza składową w kierunku x wszystkich wektorów falowych, $\tilde{\gamma}$ odpowiada składowej z wektora falowego fali padającej i odbitej, zaś γ jest składową z wektora falowego fali załamanej. W założeniach prezentowanego modelu wielkości σ oraz $\tilde{\gamma}$ przyjmują wartości rzeczywiste (brak tłumienia fal w powietrzu poza materiałem porowatym) zaś γ oraz φ są liczbami zespolonymi. Przedstawione związki II.64 - II.67 wynikają z właściwości fal niejednorodnych [Declercq i inni 2005] Zespolona liczba falowa k oraz odpowiadający jej zespolony kąt φ określają kąt załamania θ dany wzorem

$$\text{tg } \theta_i = \frac{\text{Re}(k \sin \varphi)}{\text{Re}(k \cos \varphi)}. \quad (\text{II.68})$$

Zgodnie z prawem Snelliusa zależność pomiędzy prędkością fali w powietrzu C , kątem padania θ , liczbą falową k oraz kątem zespolonym φ dana jest równaniem

$$\sigma = (\omega/C) \sin \theta = k \sin \varphi \quad (\text{II.69})$$

Amplitudowy współczynnik odbicia można wyliczyć podstawiając równania II.62 i II.63 do równania II.61, a następnie do warunków brzegowych II.58 oraz II.59. Pomijając eksponencjalne wyrazy czasowe otrzymuje się układ równań algebraicznych

$$A \tilde{\gamma} + B n \gamma = \tilde{\gamma} \quad (\text{II.70})$$

$$-AK_0 \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 + B(Kk^2 + T \omega n \gamma) = K_0 \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \quad (\text{II.71})$$

Rozwiązanie powyższego układu równań ze względu na amplitudę A pozwala wyznaczyć amplitudowy współczynnik odbicia.

$$R = |A| = \sqrt{(\text{Re } A)^2 + (\text{Im } A)^2}. \quad (\text{II.72})$$

Jeśli pominąć wpływ lepkości powietrza w porach wówczas A jest rzeczywiste i wynosi

$$A = \frac{\alpha \cos \theta + \frac{nT}{\sqrt{\rho K}} \cos \theta \sqrt{\alpha - \sin^2 \theta} - n \sqrt{\alpha - \sin^2 \theta}}{\alpha \cos \theta + \frac{nT}{\sqrt{\rho K}} \cos \theta \sqrt{\alpha - \sin^2 \theta} + n \sqrt{\alpha - \sin^2 \theta}}. \quad (\text{II.73})$$

Jeśli pory przy powierzchni są otwarte ($T = 0$) powyższe równanie upraszcza się do postaci

$$A = \frac{\alpha \cos \theta - n \sqrt{\alpha - \sin^2 \theta}}{\alpha \cos \theta + n \sqrt{\alpha - \sin^2 \theta}}. \quad (II.74)$$

Zakładając, że dla dwóch kątów θ_1 i θ_2 znane są współczynniki odbicia R_1 i R_2 z relacji II.74 można wyznaczyć krętość [Fellach i inni 2003]

$$\alpha = \frac{\left(\frac{(1 \mp R_2)(1 \pm R_1) \cos \theta_2}{(1 \pm R_2)(1 \mp R_1) \cos \theta_1} \right)^2 \sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_2}{\left(\frac{(1 \mp R_2)(1 \pm R_1) \cos \theta_2}{(1 \pm R_2)(1 \mp R_1) \cos \theta_1} \right)^2 - 1} \quad (II.75)$$

Ponowne zastosowanie II.74 dla dowolnej pary (θ_i, R_i) pozwala wyznaczyć porowatość n :

$$n = \frac{\alpha(1 \mp R_i) \cos \theta_i}{(1 \pm R_i) \sqrt{\alpha - \sin^2 \theta_i}} \quad i = 1, 2 \quad (II.76)$$

We wzorach II.75 i II.76 górny znak stosuje się dla $A > 0$, zaś dolny dla $A < 0$. Uwzględnienie w modelu wpływu niezerowej powierzchniowej impedancji przepływu lub/i zjawisk lepkich sprawia, że nie istnieje proste wyrażenie analityczne opisujące parametry strukturalne n oraz α .

II.2.2 Badania wrażliwości modelu

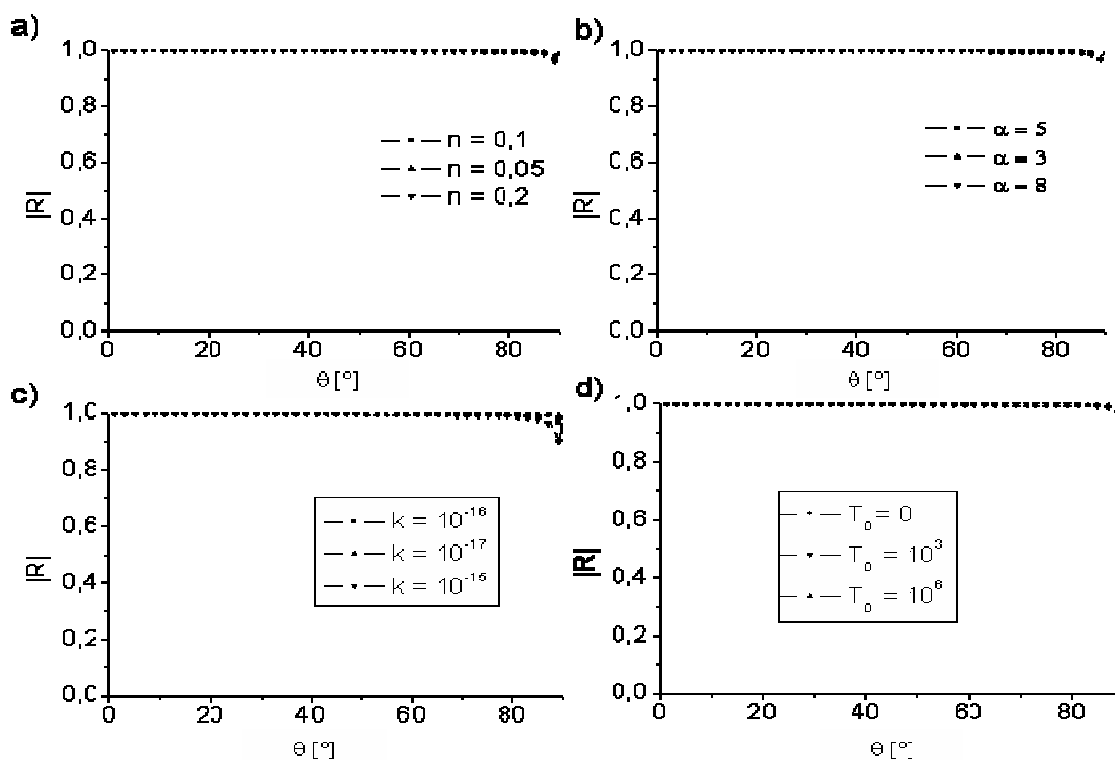
Przedstawiony wyżej model odbicia fali od materiału porowatego oraz pomiar współczynnika odbicia w funkcji kąta można wykorzystać dla identyfikacji parametrów struktury; porowatości n , krętości α i przepuszczalności k_0 , oraz powierzchniowej impedancji przepływu T . Badanie wrażliwości modelu pozwala ustalić istotne z punktu widzenia identyfikacji zakresy wyraźnego lub znikomego wpływu tych parametrów na współczynnik odbicia. Szczegółową analizę parametryczną dla szerokiego zakresu porowatości można znaleźć w raporcie dotyczącym realizacji projektu rozwojowego. [RAP 2010]. W niniejszej pracy skoncentrowano uwagę na materiałach o niskiej i średniej porowatości w zakresach spotykanych dla betonów. W przypadku każdej z analiz zmieniany jest tylko jeden parametr przy ustalonych pozostałych. Testy podzielono na dwie grupy, dla niskich (rys. II.16) oraz średnich porowatości (rys. II.17). Parametry modelu dla wszystkich przypadków zawiera tabela II-4. Czcionką pogrubioną oznaczono wartości jakie podstawiano do modelu, gdy dany parametr nie podlegał analizie. Zakresy wartości poszczególnych parametrów dobrano tak, aby odpowiadały rzeczywistym wielkościom spotykanym dla betonów.

Ocena jakościowa wrażliwości modelu w zakresie niskich porowatości przedstawiona na rysunku II.16 pokazuje, że żaden z analizowanych parametrów

praktycznie nie wpływa na przebieg współczynnika odbicia. Osie na rysunku zostały tak dobrane, aby prezentowane charakterystyki były porównywalne z kolejnymi przykładami. Z powodu niewielkiego wpływu parametrów materiałowych na współczynnik odbicia w dalszej analizie skupiono się na jakościowym i ilościowym badaniu wrażliwości dla średnich zakresów porowatości.

Tabela II-4. Parametry struktury przy badaniu wrażliwości współczynnika odbicia.

Materiał	Porowatość (n)	Krętość (α)	Przepuszczalność (k_D)	Powierzchniowa impedancja przepływu (T)
Niska porowatość	0.05/0.1/0.2	3/5/8	$10^{-17}/10^{-16}/10^{-15}$	$0/10^3/10^6$
Średnia porowatość	0.2/0.3/0.4	1.2/1.6/2	$10^{-13}/10^{-12}/10^{-11}$	$0/5 \times 10^3/10^4$

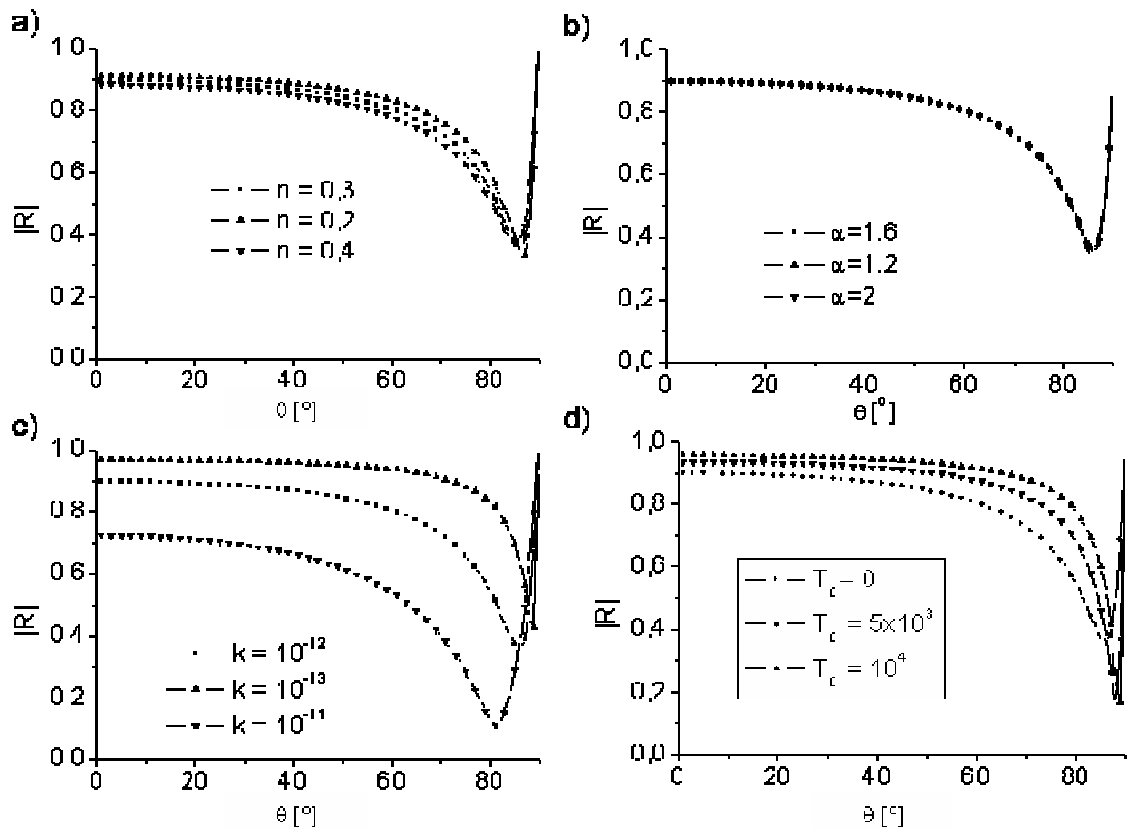


Rysunek II.16 Zmiany charakterystyki R w zakresie niskich porowatości na skutek zmian a) porowatości, b) krętości, c) przepuszczalności, d) powierzchniowej impedancji przepływu.

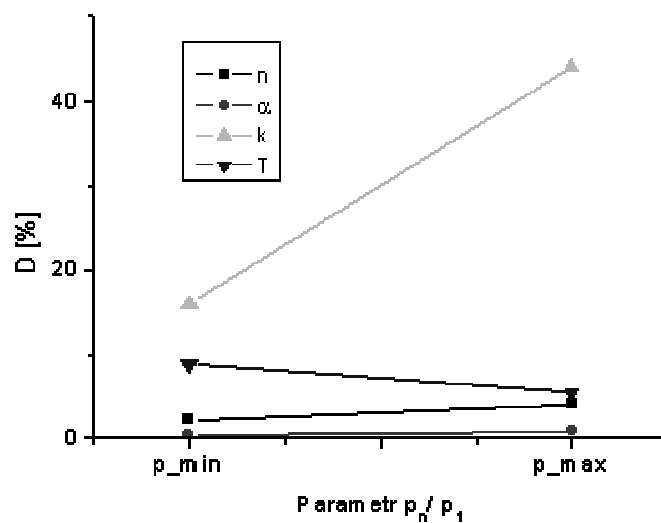
Testy wrażliwości w zakresie średnich porowatości oznaczono literami do A do D. W pierwszej kolejności przedstawiono ocenę jakościową, a następnie ilościową.

Test A dotyczy wpływu **porowatości** (rys. II.17a). Zmiany porowatości powodują niewielkie przesunięcia charakterystyki wzdłuż osi współczynnika odbicia. Im wyższa porowatość tym niższe wartości przyjmuje R .

Test B dotyczy badania wpływu **krętości** (rys. II.17b) Zmiany krętości nie wpływają na kształt charakterystyki R .



Rysunek II.17 Zmiany charakterystyki R w zakresie średnich porowatości na skutek zmian a) porowatości, b) krętości, c) przepuszczalności, d) powierzchniowej impedancji przepływu.



Rysunek II.18 Porównanie ilościowe wpływu zmiany parametrów modelu na zmiany charakterystyki współczynnika odbicia, gdzie: n – porowatość, α – krętość, k – przepuszczalność, T – powierzchniowa impedancja przepływu.

Test C dotyczy wpływu **przepuszczalności** (rys. II.17c). Zmiana przepuszczalności bardzo istotnie wpływa na współczynnik odbicia w całym zakresie kątów. Większa przepuszczalność powoduje obniżanie R .

Test D dotyczy wpływu **powierzchniowej impedancji przepływu** (rys. II.17d) Zmiana impedancji ma istotny wpływ na kształt charakterystyki współczynnika odbicia.

Porównanie ilościowe przeprowadzono w taki sam sposób jak w przypadku modeli opisujących propagację fal powierzchniowych stosując równanie II.31. Wyniki ilościowe badania wrażliwości modelu pokazano na rysunku . Analiza potwierdza obserwacje, że model dla średnich porowatości wykazuje największą wrażliwość na zmiany przepuszczalności. W drugiej kolejności ma znaczenie zmiana powierzchniowej impedancji przepływu. W niewielkim stopniu na zachowanie modelu wpływa zmiana porowatości, zaś wpływ zmian krętości można uznać za nieistotny. Pokazany brak zależności współczynnika odbicia od zmian parametrów modelu dla małych porowatości (poniżej 20 %) oznacza, że metodę będzie można wykorzystać jedynie do betonów zdegradowanych, które charakteryzują się wyższą niż „zdrowe” betony porowatością.

II.3 Wnioski

W rozdziale przedstawiono zagadnienia modelowania propagacji fal powierzchniowych w materiałach niejednorodnych i odbicia fal ultradźwiękowych na styku powietrze, materiał porowaty.

W części poświęconej modelowaniu propagacji fal powierzchniowych

- omówiono wykorzystanie modelu Haskell'a (struktura warstwowo niejednorodna) oraz modelu Gibsona (struktura niejednorodna liniowo w głąb materiału) do wyznaczania charakterystyk dyspersyjnych,
- pokazano opracowany numeryczny sposób rozwiązywania równania dyspersyjnego modelu Haskell'a,
- przedstawiono porównanie przewidywań modeli dla skokowo i liniowo zmiennych modułów ścinania.,
- przeprowadzono badanie wrażliwości obu modeli, co pozwoliło określić (w sposób jakościowy i ilościowy) wpływ poszczególnych parametrów. Z analizy wynika, że dla modelu Haskell'a największy wpływ na dyspersję ma prędkość propagacji fal poprzecznych oraz grubość warstw. Drugorzędną rolę mają prędkość propagacji fal podłużnych w poszczególnych warstwach i gęstości. Analiza wrażliwości modelu Gibsona pokazuje, że największy wpływ na charakterystykę dyspersyjną ma prędkość propagacji fali porzeczej na brzegu półprzestrzeni, znacznie mniejszą rolę odgrywa współczynnik niejednorodności i znikomą liczba Poissona,

- zaproponowano procedurę uwzględnienia w dyspersji składowej pochodzącej od tłumienia. Przeprowadzona analiza pokazała, że dla wartości parametrów spotykanych przy badaniu betonów średni względny wpływ tłumienia na dyspersje nie przekracza 5%.

W części rozdziału poświęconej modelowaniu zjawiska odbicia fal ultradźwiękowych od materiału porowatego

- przedstawiono założenia modelu oraz badanie jego wrażliwości,
- pokazano, że wykorzystany model może być stosowany do materiałów o średniej i wyższej porowatości, co ogranicza jego zastosowanie do betonów zdegradowanych,
- ustalono, że największy wpływ na przewidywany współczynnik odbicia ma zmiana przepuszczalności, w drugim rzędzie powierzchniowa impedancja przepływu i następnie porowatość. Niewielką rolę wykazuje krętość.

Rozdział III

Opis i testy urządzeń pomiarowych

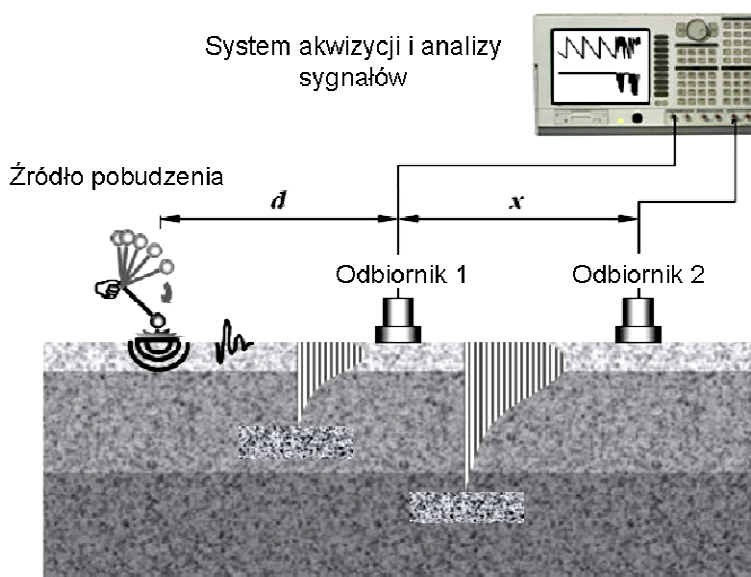
Jednym z ważniejszych celów prezentowanej pracy było zaprojektowanie i wykonanie dwóch systemów pomiarowych, które realizują pomiary propagacji fal powierzchniowych oraz pomiary współczynnika odbicia. Systemy te nazwano odpowiednio **SWMD** (Surface Waves Measurement Device) oraz **RMD** (Reflectometry Measurement Device). Zadaniem zbudowanych urządzeń jest realizacja pomiarów i dostarczenie odpowiednich danych do identyfikacji własności mechanicznych i strukturalnych badanych materiałów. Konfiguracja pomiarów (ustawienie przetworników) powinna jak najwierniej oddawać założenia przyjęte w modelach prezentowanych w Rozdziale II. Warto podkreślić unikalny charakter opracowanych urządzeń, a co za tym idzie brak dostępnej wiedzy źródłowej, która ułatwiłaby opracowanie omawianych systemów. W poniższym rozdziale przedstawiono motywację oraz genezę powstawania każdego z systemów pomiarowych, sposób przetwarzania sygnałów, a także ocenę ich działania na podstawie testów na znanych materiałach.

III.1 System do badania propagacji fal powierzchniowych

Badanie propagacji fal powierzchniowych wymaga zastosowania układu, który umożliwi ich generowanie oraz odbiór w trudnym dla propagacji ultradźwięków materiale jaki jest beton. W zależności od konkretnego zastosowania spotyka się kilka konfiguracji pozwalających zrealizować taki pomiar [Szelązek 2001, Ryden i inni 2009]. W najprostszym przypadku jako źródło wykorzystuje się pobudzenie impulsowe (np. młotek sejsmiczny), którego uderzenie generuje wszystkie typy fal mogące powstać w danym ośrodku. Następnie propagujące fale rejestruje się wzdłuż wybranego profilu (obszaru). Za profil pomiarowy uważa się zbiór punktów obserwacji wzdłuż linii biegnącej od źródła sygnału do odbiornika. W zastosowaniach sejsmicznych do obserwacji propagujących się fal używane są geofony lub hydrofony, zaś w zagadnieniach badań materiałowych często są to akcelerometry. Dla wysokich częstotliwości źródłem pobudzenia i odbioru fal mogą być przetworniki ultradźwiękowe lub źródła/odbiorniki laserowe. Spośród wszystkich odbieranych sygnałów konieczne jest odseparowanie tych

związanych z falami powierzchniowymi. Operację tą wspólnie wykonuje się często w ramach cyfrowego przetwarzania sygnałów.

Schemat najprostszej konfiguracji pomiarowej do rejestracji fal powierzchniowych pokazano na rysunku III.1. Zastosowanie co najmniej dwóch odbiorników pozwala na realizację pomiaru względnego dla dwóch punktów obserwacji, przez co brana jest pod uwagę tylko propagacja na dystansie x . Korzystając z faktu stacjonarności zjawiska propagacji fal w betonie można posługiwać się tylko jednym odbiornikiem przemieszczanym w kolejne pozycje wzdłuż profilu pomiarowego.



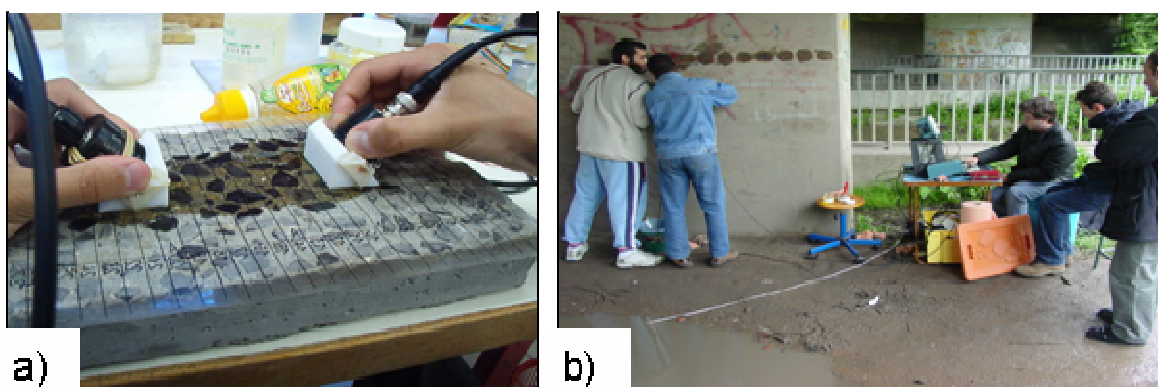
Rysunek III.1 Generowanie i pomiar fal powierzchniowych [Wardany 2005].

Ręczne wykonywanie pomiarów propagacji fal powierzchniowych z użyciem ultradźwiękowych przetworników kontaktowych jest problematyczne. Kluczowy wpływ na precyzję pomiaru ma dokładność pozycjonowania przetworników, zaś o jakości odbieranych sygnałów w dużym stopniu decyduje jakość sprzężenia przetworników z badaną powierzchnią. Zauważono, że ręczny pomiar jest mało powtarzalny, a realizacja pojedynczego profilu jest bardzo czasochłonna. Przy badaniu materiałów porowatych, takich jak beton, stosując metody kontaktowe, pojawia się także problem ze stacjonarnością zjawiska propagacji fal. Wynika to z faktu, że badany materiał absorbuje żel służący do sprzęgania przetworników, a tym samym lokalnie zmienia swoje właściwości. Biorąc powyższe pod uwagę koniecznym stało się ulepszenie techniki pomiarowej. Przeprowadzone modyfikacje miały na celu:

- zwiększenie precyzji pozycjonowania przetworników,
- podwyższenie powtarzalności pomiarów,

- łatwą realizację pomiarów w warunkach terenowych,
- zminimalizowanie wpływu na badany materiał substancji sprzęgającej lub całkowite jej wyeliminowanie,
- skrócenie czasu realizacji pomiarów.

Pierwsze próby pomiarów propagacji fal powierzchniowych na próbkach betonowych wykonywano ręcznie.



Rysunek III.2 Ręczne pomiary propagacji fal powierzchniowych; a) w laboratorium, b) w terenie.

Na rysunku III.2a pokazano przykład takiego pomiaru w warunkach laboratoryjnych. Użyte głowice ultradźwiękowe wyposażono w specjalnie ukształtowane nakładki teflonowe, dzięki którym propagująca się fala pada na materiał pod kątem nieco większym od drugiego kąta krytycznego. Podobna sytuacja ma miejsce w przetwornikach kątowych (angular lub wedge transducer) stosowanych w kontroli nieniszczącej metali. Wykorzystanie teflonu było podyktowane tym, że jako jedno z nielicznych ciał stałych charakteryzuje się niższą niż w betonie prędkością propagacji fal poprzecznych [Piwakowski 2004]. W takiej sytuacji kąt fali padającej można wyznaczyć z relacji

$$\sin \theta_c = \frac{c_{SW}}{c_{S2}} \quad (III.1)$$

gdzie c_{SW} jest prędkością propagacji fali poprzecznej w teflonie, zaś c_{S2} odpowiada prędkości fali poprzecznej w betonie.

Uzyskanie dobrego sprzężenia przetworników z badanym materiałem poprzez nakładki teflonowe wymaga zastosowania substancji sprzęgającej. Zazwyczaj jest to żel na bazie wody lub niekiedy sama woda. Realizacja profilu pomiarowego wymaga przesuwania jednego z przetworników w kolejne punkty obserwacji (akwizycji). Każda nowa pozycja wymaga precyzyjnego ustawienia przetworników względem siebie aby zapewnić położenie przetwornika odbiorczego na kierunku propagacji fali oraz aplikacji

nowej porcji żelu sprzęgającego. Większa liczba punktów pomiarowych (kolejnych przesunięć) zapewnia dokładniejsze rezultaty uzyskane z przetwarzania sygnałów. Dużo trudniejsza sytuacja ma miejsce przy realizacji badań w terenie (rys. III.2b) zwłaszcza na powierzchniach pionowych lub sufitach. Problem przy stosowaniu przetworników kontaktowych stanowią dodatkowo nierówności powierzchni betonu, a długi czas realizacji pomiarów dla pojedynczego profilu powoduje wysychanie żelu sprzęgającego i tym samym zmiany warunków propagacji.

Powyższe wnioski doprowadziły do istotnej modernizacji systemu pomiarowego, którego rezultatem było zastąpienie głowicy odbiorczej przetwornikiem bezkontaktowym. Jest to możliwe przy wykorzystaniu zjawiska powstawania tzw. fal wyciekających przy propagacji fal powierzchniowych (rys. II.1) [Zhu i inni 2001]. Jako głowicę odbiorczą wykorzystano pojemnościowy przetwornik membranowy firmy MicroAcoustic, charakteryzujący się bardzo szerokim pasmem (20 – 900 kHz). Ośrodkiem sprzęgającym w takim wypadku jest powietrze, dzięki czemu przetwornik może być ustawiony kilkanaście milimetrów nad badaną powierzchnią. Taka konfiguracja wymaga stosowania żelu jedynie w przetworniku nadawczym, co bardzo ułatwia automatyzację przesuwania odbiornika.

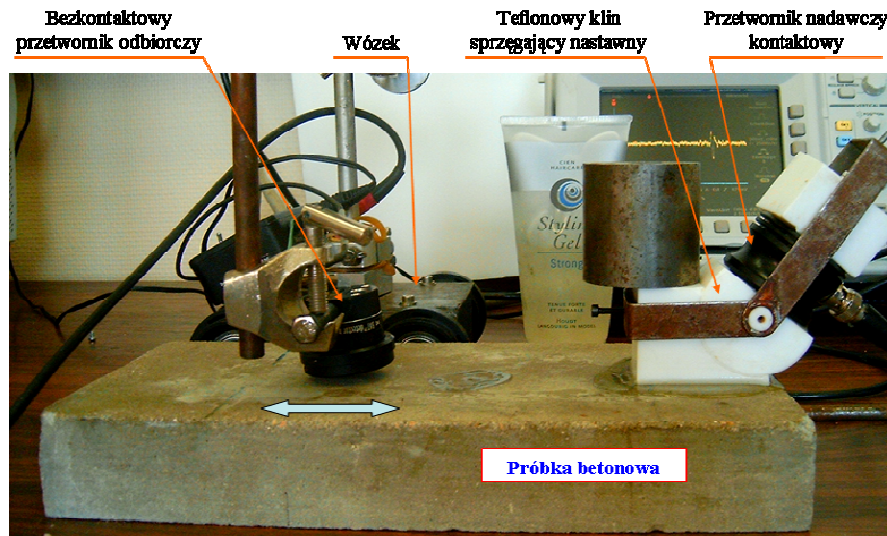
Konfiguracja układu pomiarowego z zastosowaniem odbiorczego przetwornika bezkontaktowego została pokazana na rysunku . Przesuwanie odbiornika wzdłuż profilu pomiarowego (strzałka) realizowano ręcznie przy użyciu specjalnego wózka. Przetwornik nadawczy wyposażono w teflonowy adapter umożliwiający ustawienie kąta padania fali ultradźwiękowej zgodnie z równaniem III.1. Bezkontaktowy przetwornik odbiorczy również posiada regulację kąta odbioru θ_R , który w przypadku sprzężenia przez powietrze wyznaczamy ze wzoru

$$\sin \theta_R \approx \frac{c_{P_AIR}}{c_{S2}} \quad (III.2)$$

Duża różnica pomiędzy prędkością fali ultradźwiękowej w powietrzu c_{P_AIR} i falą poprzeczną w betonie c_{S2} powoduje, że kąt odbioru θ_R jest mały (rzędu $8^{\circ}10^{\circ}$), co widać również na rysunku .

Wadą omówionego rozwiązania z jednym przetwornikiem bezkontaktowym jest konieczność stosowania żelu sprzęgającego dla przetwornika nadawczego, a także niska precyzja i czasochłonność ręcznego pozycjonowania przetwornika odbiorczego. Warto zauważyć, że ma miejsce duży spadek amplitudy sygnału fal wyciekających z powodu znacznej różnicy impedancji akustycznych pomiędzy betonem i powietrzem (odbierane jest jedynie około 2 % energii). Pomyślnie przeprowadzone próby na układzie ręcznym doprowadziły do zbudowania urządzenia pozwalającego automatycznie przesuwać

przetwornik odbiorczy wzdłuż profilu pomiarowego, co znacznie skróciło czas pomiarów oraz zwiększyło ich dokładność. W ramach kolejnej modyfikacji zastąpiono nadawczy przetwornik kontaktowy przetwornikiem bezkontaktowym, aby całkowicie wyeliminować konieczność stosowania żelu sprzęgającego. Biorąc pod uwagę fakt, iż w takim rozwiązaniu do przetwornika odbiorczego dociera mniej niż 0,1 % energii wysłanej pobudzenie impulsowe zastąpiono pobudzeniem sygnałami modulowanymi częstotliwościowo typu chirp (patrz roz. III.1.2).



Rysunek III.3 Konfiguracja pomiarowa z użyciem odbiorczego przetwornika bezkontaktowego.

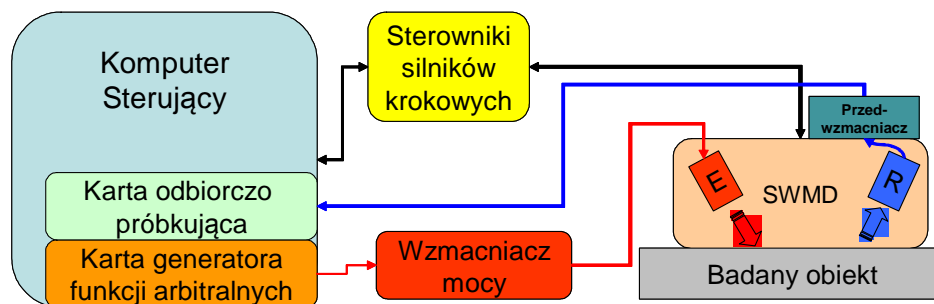
III.1.1 System pomiarowy do fal powierzchniowych SWMD

Zebrane w trakcie realizacji pracy doświadczenia oraz przeprowadzone modyfikacje doprowadziły do zbudowania ostatecznej wersji systemu pomiarowego. Schemat blokowy tego systemu SWMD pokazano na rysunku III.4.

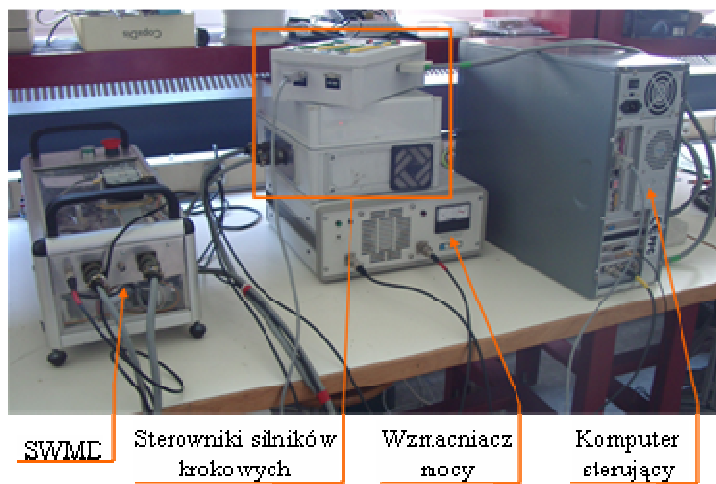
System SWMD pozwala na automatyczne wykonywanie zarówno pomiarów całkowicie bezkontaktowych jak i z użyciem kontaktowego przetwornika nadawczego. Widok systemu przygotowanego do pracy pokazano na rysunku III.5.

Pracą systemu zarządza komputer, który poprzez sterowniki silników krokowych pozycjonuje przetwornik odbiorczy. Przetwornik nadawczy jest ustawiany manualnie raz na całą serię pomiarów. Sygnały typu chirp emitowane przez generator funkcji arbitralnych są wzmacniane do poziomu dostosowanego do aktualnie używanego przetwornika nadawczego. Sygnał odebrany jest rejestrowany przez kartę oscyloskopową. Dane pomiarowe dla każdego punktu pomiarowego są zapisywane na dysku komputera. Na rysunku III.6 pokazano urządzenie wykonawcze systemu SWMD,

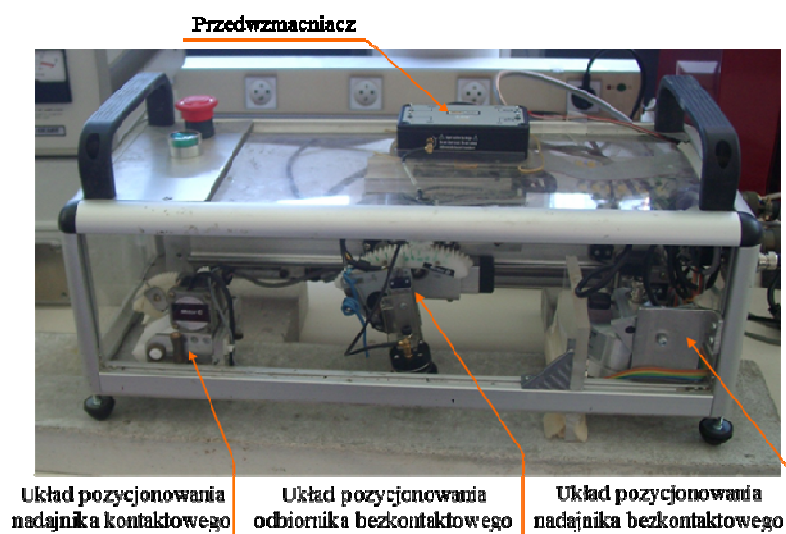
służące do pozycjonowania przetworników ultradźwiękowych w konfiguracji pomiaru propagacji fal powierzchniowych.



Rysunek III.4 Schemat blokowy systemu SWMD do pomiaru propagacji fal powierzchniowych, SWMD – urządzenie pomiarowe, E – przetwornik nadawczy, R – przetwornik odbiorczy.



Rysunek III.5 System pomiarowy przygotowany do pracy.

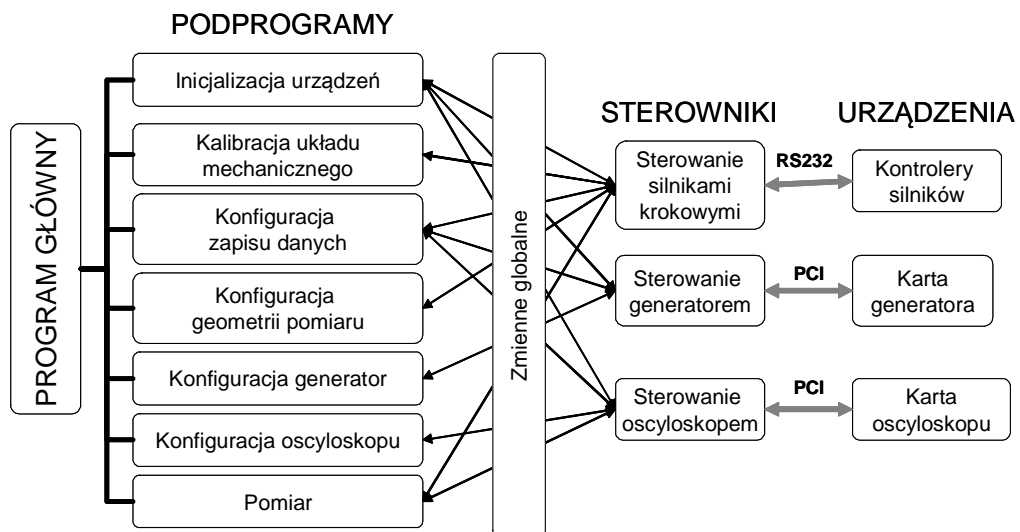


Rysunek III.6 SWMD w czasie pomiaru próbki betonowej.

System pomiarowy pozwala wybrać użytkownikowi tryb pracy z przetwornikiem bezkontaktowym lub z wykorzystaniem przetwornika kontaktowego. Każdy z układów pozycjonowania przetworników posiada możliwość regulacji kąta pomiędzy osią przetwornika i normalną do badanej powierzchni (nadajniki - regulacja manualna, odbiornik automatyczna lub manualna). Kąt ten odpowiada trzeciemu kątowi krytycznemu i zależy od prędkości fali powierzchniowej w badanym materiale. Układ pozycjonowania odbiornika realizuje także ruch przetwornika w poziomie zgodnie z zaprogramowanym profilem pomiarowym przemieszczając go do kolejnych punktów akwizycji.

Program sterujący napisano w środowisku LabVIEW i jego działanie odpowiada za:

- konfigurację karty generatora funkcji arbitralnych,
- konfigurację karty oscyloskopowej,
- tworzenie geometrii pomiaru (ustalenie liczby i rozmieszczenia punktów pomiarowych w profilu oraz liczby profili),
- sterowanie układem mechanicznym systemu, tzn. pozycjonowanie przetwornika odbiorczego,
- realizację przyjętej geometrii pomiaru,
- rejestrację odbieranych sygnałów.

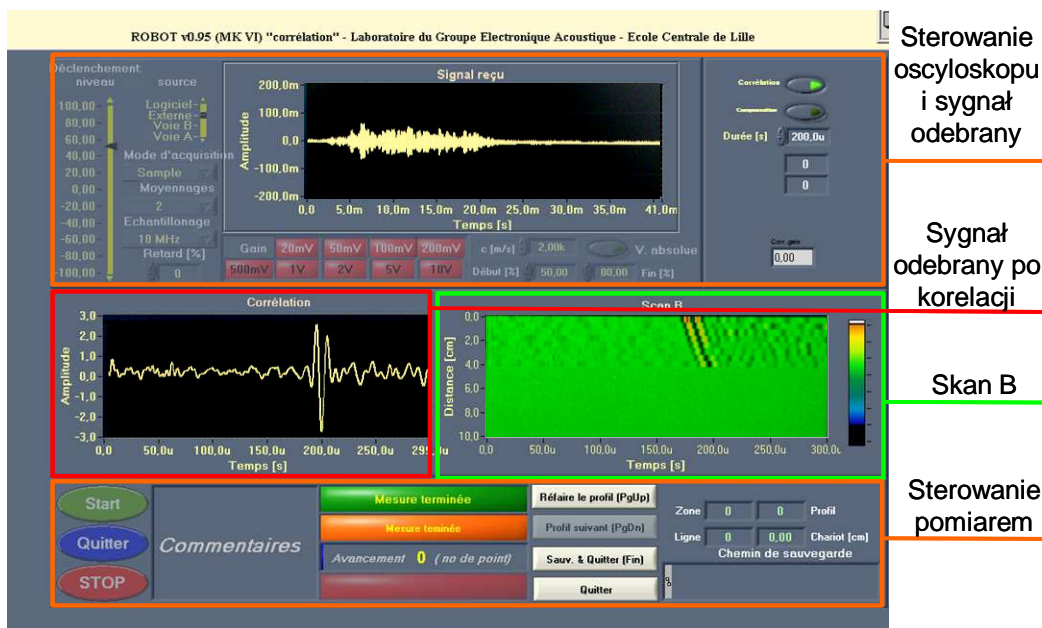


Rysunek III.7 Schemat blokowy oprogramowania sterującego.

Schemat blokowy oprogramowania pokazano na rysunku III.7. Program główny składa się z grupy podprogramów odpowiedzialnych za przygotowanie poszczególnych podzespołów systemu SWMD do pracy (od Inicjalizacji urządzeń do Konfiguracji oscyloskopu). Podprogramy te komunikują się ze sterownikami urządzeń poprzez

zmienną globalną. Zadaniem sterowników jest komunikacja pomiędzy urządzeniami i podprogramami poprzez magistralę PCI oraz port RS232.

W grupie podprogramów warto wyróżnić blok dotyczący „Konfiguracji generatora”, w którym ustalane są parametry sygnału pobudzenia typu chirp³ dobierane optymalnie pod kątem zastosowanego przetwornika i badanego ośrodka. Po zakończeniu konfiguracji systemu uruchamiany jest podprogram Pomiar odpowiadający za wykonanie zadanych pomiarów i zapis zebranych sygnałów. Szczegóły wykorzystanego przetwarzania sygnałów opisano szerzej w rozdziale III.1.2. Na rysunku III.8 pokazano interfejs użytkownika w trybie realizacji sekwencji pomiarowej (podprogram Pomiar). Obszar „Sterowanie oscyloskopu i sygnał odebrany” dotyczy pracy karty oscyloskopowej oraz wizualizacji odebranego sygnału przed korelacją. W polu Skan B powstaje obraz składający się z dotychczas zarejestrowanych sygnałów po korelacji. Obszar Sterowanie pomiarem umożliwia kontrolowanie procesu pomiarowego oraz przedstawia zaawansowanie aktualnie realizowanego pomiaru.

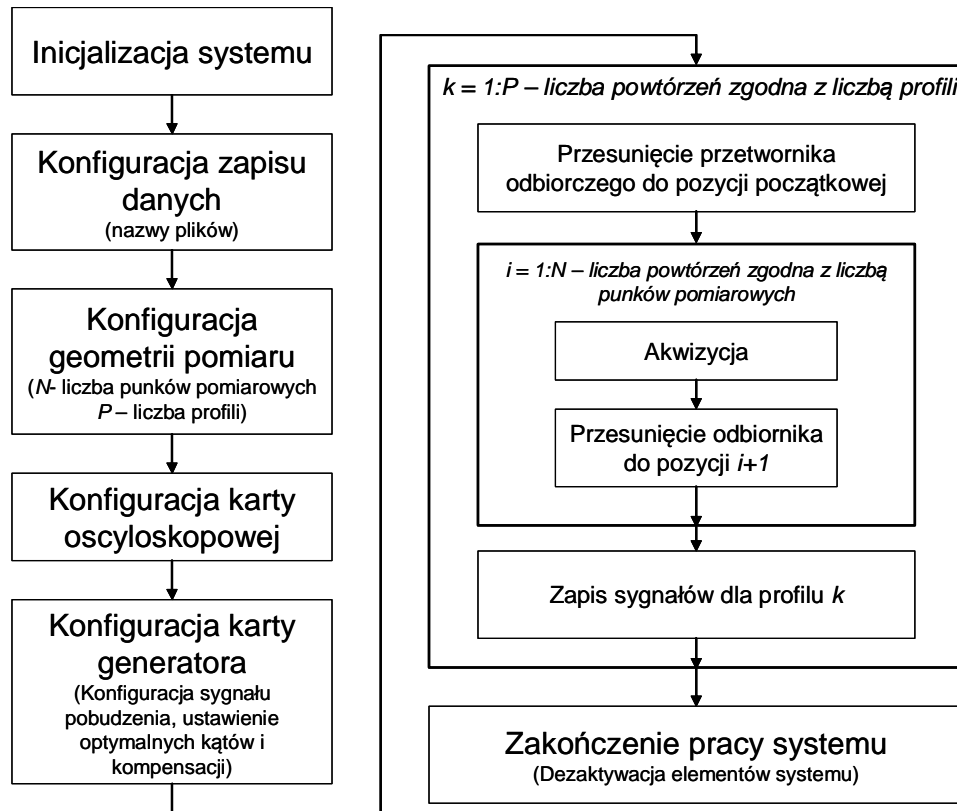


Rysunek III.8 Interfejs użytkownika w trakcie pomiaru.

Na schemacie III.9 przedstawiono przebieg procesu pomiarowego. Przed rozpoczęciem pomiarów oprogramowanie wymaga przeprowadzenia konfiguracji systemu, w której użytkownik ustala konfigurację zapisu danych oraz geometrię pomiarów zawierającą informację o ilości punktów pomiarowych N w każdym profilu, liczbę profili P oraz odległość pierwszego punktu akwizycji od nadajnika (offset). Konfiguracja karty

³ tylko przy pracy z nadajnikiem bezkontaktowym.

oscylloskopowej dotyczy ustalenia czułości i podstawy czasu oraz uśredniania. Konfiguracja karty generatora w dużym stopniu zależy od użytego przetwornika. Na tym etapie ustalane jest pasmo częstotliwości sygnału pobudzenia i jego amplituda.



Rysunek III.9 Etapy procedury pomiarowej z użyciem SWMD (szczegóły w tekście).

Po konfiguracji wszystkich niezbędnych elementów systemu rozpoczyna się pomiar dla ustalonej liczby profili, gdzie każdy profil składa się z N punktów pomiarowych. W procesie akwizycji odbierane sygnały są uśredniane M razy, a następnie korelowane z sygnałem pilotem (sygnałem wysłanym). Sygnały po korelacji są zapisywane do pliku w formacie binarnym. Istnieje także możliwość zapisywania sygnałów przed korelacją. Dla każdego profilu tworzony jest odrębny plik, co pozwala w bezpieczny sposób przerwać pomiar w dowolnym momencie bez ryzyka utraty zebranych danych. Informacje związane z pomiarem niezbędne w dalszym przetwarzaniu sygnałów są zapisywane do pliku tekstowego. Główne parametry systemu pomiarowego SWMD charakteryzujące układ pozycjonowania i ważniejsze parametry sygnałów zamieszczono w tabeli III-1.

Tabela III-1. Parametry robocze systemu SWMD.

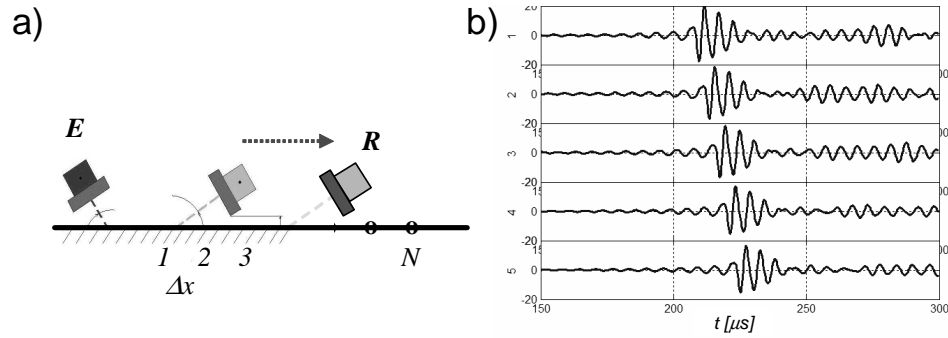
Parametr	Wartość
Tryb pracy	bezkontaktowa (z możliwością emisji kontaktowej)
Położenie badanej powierzchni	dowolne poziome (podłoga) / pionowe (ściana) / poziome odwrócone (sufit)
Liczba punktów pomiarowych N	dowolna, nie większa niż $N = ((24\text{cm} - X_{\text{OFF}})/\Delta x) + 1$
Odległość pomiędzy punktami pomiarowymi Δx	dowolna (minimalna: 0,3mm)
Odległość początkowa (Offset X_{OFF})	minimalnay: 7cm, maksymalny 24cm
Pasma odbiorcze	20 ÷ 900kHz
Pasma nadawcze	30 ÷ 500kHz (w zależności od przetwornika nadawczego)
Czas akwizycji jednego profilu	~20s (dla $N = 20$ bez uśredniania)
Ciężar urządzenia	~6kg

III.1.2 Wielkości mierzone i przetwarzanie sygnałów

Każdy profil składa się z N punktów pomiarowych, a zatem z N zarejestrowanych sygnałów $s_i(t)$ dla N pozycji odbiornika, co pokazano na rysunku III.10. Odległość pomiędzy punktami pomiarowymi Δx powinna spełniać wymaganie dotyczące rozdzielczości przestrzennej wynikającej z twierdzenia o próbkowaniu przestrzennym zgodnie z równaniem [Shannon 1949], gdzie λ_{\min} odpowiada długości fali o najwyższej częstotliwości.

$$\Delta x \leq \frac{\lambda_{\min}}{2} \quad (\text{III.3})$$

Konstrukcja urządzenia oraz rozmiary przetworników sprawiają, że najkrótsza możliwa droga propagacji wynosi 7 cm, a zatem długość drogi propagacji dla N -tego punktu pomiarowego wynosi $X = 7\text{ cm} + (N-1) * \Delta x$. Wzrost drogi propagacji powoduje rosnące opóźnienie sygnału odbieranego (rys. III.10b).



Rysunek III.10 Pomiar pojedynczego profilu; a) geometria (E – głowica nadawcza, R – głowica odbiorcza), b) zarejestrowane sygnały dla kolejnych punktów pomiarowych.

Jednym z etapów przetwarzania sygnałów jest obliczenie widm amplitudowych $S_i(\omega)$ dla każdego z sygnałów $s_i(t)$, oraz charakterystyki dyspersyjnej. Sygnał odebrany w położeniu X_i można wyrazić zależnością:

$$s(t, X_i) = [s(t - X_i / V_A)] e^{-\alpha X_i} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (\text{III.4})$$

gdzie: X_i oznacza położenie punktów obserwacji względem źródła,

α jest współczynnikiem tłumienia,

V_A jest obserwowaną prędkością propagacji fali powierzchniowej (apparent velocity) zbliżoną do prędkości grupowej.

Wykonując operację transformacji Fouriera na obydwu stronach równania III.4, otrzymujemy:

$$S(j, \omega, X_i) = \mathfrak{F}[s(t, X_i)] = |S(\omega, X_i)| \exp(-j\phi(\omega X_i)) \quad (\text{III.5})$$

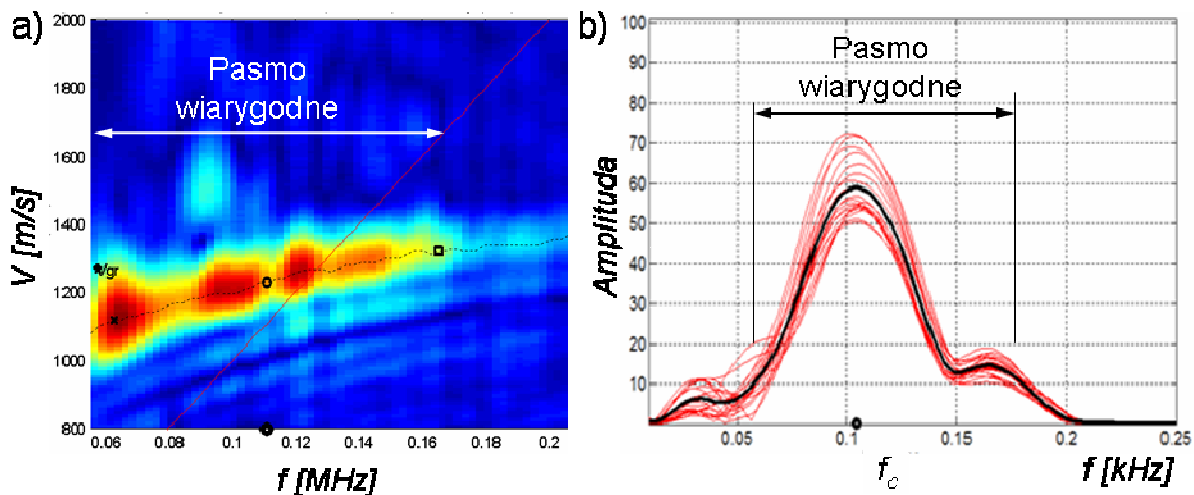
W powyższym wyrażeniu $|S(\omega)|$ reprezentuje widmo amplitudowe sygnału z uwzględnieniem tłumienia, zaś $\phi(\omega)$ odpowiada jego widmu fazowemu.

Charakterystykę dyspersyjną wyznacza się wykorzystując transformatę $(p-\tau)$, znanej w geofizyce jako transformata *Slant Stack* (SL) [McMechan i inni 1981, Yilmaz 1987]. Polega ona na transformacji sygnału s w funkcji opóźnienia liniowego $\tau = pX$,

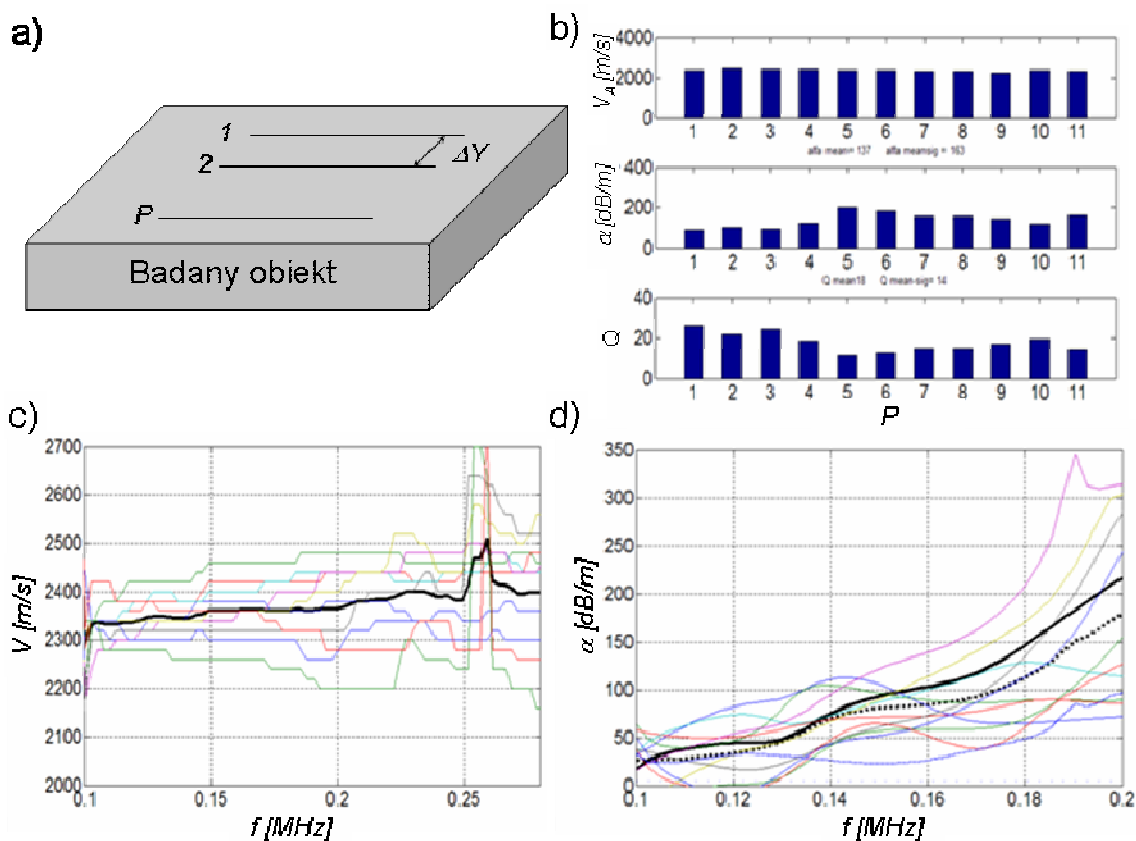
$$\bar{s}(\tau, p) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t = \tau - pX, X) dX \quad (\text{III.6})$$

gdzie $p=1/V$ jest odwrotnością prędkości (powolnością). Faktycznie realizowany jest dyskretny odpowiednik transformaty III.6. Następnie równanie III.6 poddaje się transformacie Fouriera

$$\bar{S}\left(\omega, \frac{1}{V}\right) = \bar{S}(\omega, p) = \mathfrak{F}[\bar{s}(\tau, p)] \quad (\text{III.7})$$



Rysunek III.11 Przykładowa mapa dyspersji otrzymana przy użyciu SL i transformaty Fouriera (a) oraz przykład charakterystyk widmowych odebranych sygnałów (b).



Rysunek III.12 Przykładowe rozmieszczenie profili pomiarowych na powierzchni badanego obiektu (a), rezultaty pomiarów 10-ciu profili (od góry: prędkości, tłumienia, współczynniki jakości, 11-ta wartość jest średnią) (b), krzywe dyspersyjne (linia pogrubiona – wartość średnia) (c), krzywe tłumienia (linia pogrubiona – wartość średnia) (d).

Wynik w postaci modułu $\left| \bar{S} \left(\omega, \frac{1}{V} \right) \right|$ z podwójnej transformaty sygnałów $s(t, X_i)$

(transformaty SL i Fouriera) można przedstawić na płaszczyźnie prędkość/częstotliwość (V, f) , a maksymalne wartości lokalne dla poszczególnych częstotliwości wyznaczają prędkości fazowe różnych modów falowych. Przykładowy efekt zastosowania podwójnej transformaty (SL i Fouriera) w postaci tzw. mapy dyspersji oraz przykładowe widma sygnałów odebranych przedstawiono na rys. III.11a. Linia łącząca sąsiadujące maksima wyznacza charakterystyki dyspersyjne (w przypadku pokazanym na rys. III.11a widać jedynie mod podstawowy). Widma sygnałów dla 20 punktów odbioru dla których obliczono charakterystykę dyspersji pokazano na rysunku III.11b. Jako pasmo wiarygodne wykorzystuje się zakres widma z dobrym stosunkiem sygnału do szumu (w tym wypadku od 60 kHz do 170 kHz) Zauważalne przesunięcie maksimum widm (rys. III.11b) w kierunku niższych częstotliwości jest wynikiem wpływu tłumienia [Kuc 1983].

Tłumienie wyrażone w [dB/m] oblicza się w dziedzinie częstotliwości stosując równanie III.8 z wykorzystaniem sygnałów S_i i S_j z różnych położen odbiornika X_i, X_j . W celu podniesienia dokładności wyznaczenia tłumienia obliczenia przeprowadza się dla wszystkich kombinacji położen punktów obserwacji i, j , a następnie uśrednia się uzyskane rezultaty [Goueygou i inni 2002, Owino i inni 1999].

$$a(f) = \frac{1}{X_j - X_i} \left[20 \log \left(\frac{|S_i(f)|}{|S_j(f)|} \right) - 10 \log \left(\frac{X_j}{X_i} \right) \right] \quad (\text{III.8})$$

W celu zilustrowania zastosowanej procedury przetwarzania sygnałów na rys. III.12 przedstawiono wyniki przykładowej sesji pomiarowej. Rozmieszczenie profili pomiarowych na badanym materiale pokazano na rysunku III.12a, gdzie ΔY oznacza odległość pomiędzy profilami [Piwakowski i inni 2009]. Zazwyczaj rejestruje się pomiary dla około 10-ciu profili, a zebrane wyniki przetwarzania poddaje się uśrednianiu. Na rysunku III.12b pokazano rezultaty ilościowe dla 10-ciu zarejestrowanych profili (patrzac od góry: prędkości obserwowane fal powierzchniowych, tłumienia i współczynniki jakości). W 11-tej kolumnie podano wartość średniej ze wszystkich profili. Rysunek III.12c pokazuje krzywe dyspersji wyznaczone dla badanych profili, wraz z wypadkową krzywą oznaczającą wartości średnie. Wzrost prędkości z częstotliwością świadczy o tym, że średnia prędkość fal powierzchniowych maleje z głębokością dla omawianych profili badanego materiału. Na rysunkach III.12d pokazano zmierzone dla poszczególnych profili charakterystyki tłumienia wraz z przebiegiem wartości średniej (linia pogrubiona ciągła), oraz z przebiegiem charakterystyki tłumienia obliczonej dla uśrednionego profilu

(linia pogrubiona punktowa). Przebieg tłumienia dla niższych i średnich częstotliwości (w tym wypadku do około 170 kHz) można uznać za quasi liniowy i przybliżyć zależnością typu

$$\alpha(f) = \alpha_1 f \quad (\text{III.9})$$

Wielkość odległości pomiędzy profilami ΔY i liczbę profili P należy wyznaczyć biorąc pod uwagę stosunek wielkości niejednorodności do długości fali oraz wielkość tłumienia w betonie (stopnia jego degradacji). Badania na temat optymalnego doboru tych parametrów są obecnie kontynuowane [Shiyan J. 2009].

Wykorzystanie sygnałów modulowanych częstotliwościowo

Przejście z pracy kontaktowej do bezkontaktowej sprawia, iż ponad 99 % energii sygnału wysłanego przez przetwornik nadawczy jest tracone z powodu bardzo dużej różnicy impedancji akustycznych betonu i powietrza. Dla fali padającej pod małym kątem (8° - 10°) od normalnej energetyczny współczynnik transmisji T można aproksymować zależnością dla 0°

$$T = 1 - \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (\text{III.10})$$

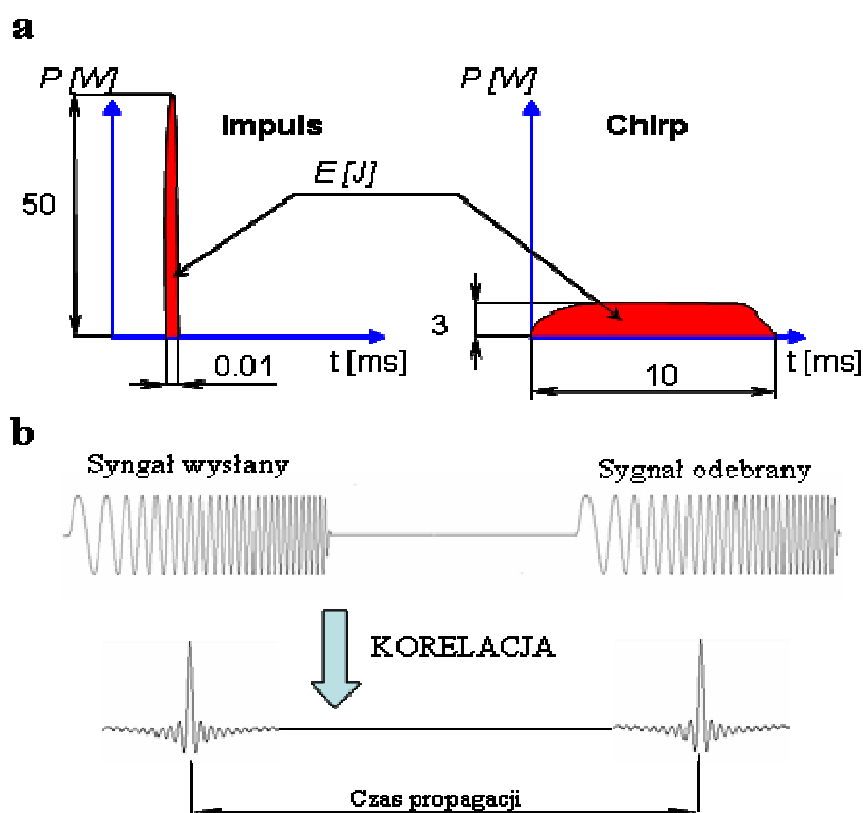
gdzie Z_1 i Z_2 są impedancjami akustycznymi odpowiednio powietrza i betonu. Podstawiając do równania III.10 wartości liczbowe dla powietrza i betonu okazuje się, że do przetwornika odbiorczego dociera około 0,022 % wyemitowanej energii. Ponadto wielkość energii sygnału wysłanego jest ograniczona ze względu na maksymalną amplitudę pobudzenia, której przekroczenie grozi uszkodzeniem przetwornika. Powoduje to, że wykorzystanie pobudzenia impulsowego staje się nieefektywne z powodu zbyt małej energii tak generowanego sygnału. Rozwiązaniem problemu jest zastosowanie sygnału modulowanego częstotliwościowo (sygnał typu chirp lub sweep [Klauder i inni 1960]), a następnie wykorzystanie operacji korelacji skrośnej (dla uproszczenia dalej zwaną korelacją) (rys. III.13b). Taki rodzaj pobudzenia w połączeniu z korelacją pozwala znacznie zwiększyć energię emitowanego sygnału (w tym przypadku od 100 do 200 razy) bez przekraczania dopuszczalnej amplitudy (rys. III.13a). Jest to podejście stosowane w medycynie [Nowicki 2010, Litniewski i inni 2007], technice radarowej, sonarach, w geofizyce głębokiej i coraz częściej wykorzystywane w sejsmice wysokiej rozdzielczości [Kosecki i inni 2010, Rihaczek 1969, Goupillaud 1976].

Sygnal modulowany częstotliwościowo (chirp) można zapisać w postaci [Brouwer i inni, 1998]:

$$s(t) = A(t)\cos(\phi(t)) \quad (\text{III.11})$$

$$\phi(t) = 2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau + \phi_0 \quad (\text{III.12})$$

gdzie $A(t)$ reprezentuje zmiany amplitudy, zaś $\phi(t)$ odpowiada chwilowej fazie sygnału wynikającej ze zmiennej częstotliwości $f(t)$.



Rysunek III.13 Ilustracja sygnału modulowanego częstotliwościowo typu chirp i jego przetwarzania: a) porównanie impulsu i sygnału typu chirp o takiej samej energii, b) proces korelacji sygnałów modulowanych częstotliwościowo.

Jeśli przyjmimy stałą wartość amplitudy w czasie $A(t) = 1$ oraz liniową zmianę częstotliwości w czasie, w postaci $f(t) = at$ otrzymujemy chirp liniowy, w którym zmiany częstotliwości w czasie można wyrazić za pomocą charakterystycznych parametrów sygnału:

$$f(t) = f_{\min} + \frac{(f_{\max} - f_{\min})t}{T} \quad (\text{III.13})$$

lub

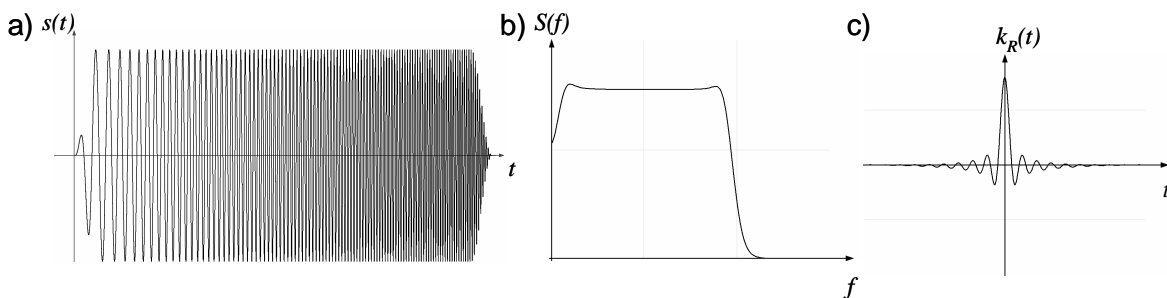
$$f(t) = f_0 - \frac{B}{2} + B \frac{t}{T} \quad (\text{III.14})$$

gdzie f_{min} i f_{max} oznaczają dolną i górną częstotliwość chirpa, T jego czas trwania, f_0 odpowiada częstotliwości środkowej zaś B oznacza szerokość pasma. Jeśli spełniona będzie zależność $T \cdot B \gg 1$, widmo chirpa liniowego $S(f)$ można przybliżyć zależnością:

$$|S(f)| = a \frac{T}{B} \Pi(f) \quad (\text{III.15})$$

$$\Pi(f) = u\left(f - \left(f_0 - \frac{B}{2}\right)\right) \cdot u\left(\left(f_0 + \frac{B}{2}\right) - f\right) \quad (\text{III.16})$$

gdzie $\Pi(f)$ jest funkcją prostokątną, zaś $u(f)$ jest funkcją Heavisidea. Przykładowy przebieg czasowy sygnału typu chirp i jego widmo pokazano odpowiednio na rysunkach III.14a i III.14b.



Rysunek III.14 Przykład sygnału modulowanego w częstotliwości (chirp), a) przebieg czasowy, b) widmo, c) autokorelacja ($k_R(t)$ (Klauder wavelet)) [Kosecki 2010].

Sygnał $s(t)$ jest sygnałem pobudzenia nazywany również „sygnałem pilotem” i różni się on od rzeczywiście wyemitowanego sygnału falowego w materiale $s_R(t)$ z powodu konkretnej charakterystyki widmowej przetwornika oraz charakterystyki sprzężenia przetwornika i materiału, w którym następuje propagacja. Dla uproszczenia transmitancję związaną z tymi dwoma czynnikami oznaczono jako $c(t)$. Opis fali wprowadzonej do materiału $s_R(t)$ uzyskuje się poprzez splot

$$s_R(t) = s(t) * c(t) \quad (\text{III.17})$$

Przeprowadzając operację autokorelacji sygnału $s_R(t)$ otrzymuje się funkcję $k_R(t)$ (Klauder wavelet) (rys. III.14c) nazywaną również sygnaturą źródła

$$k_R(t) = s_R(t) \otimes s_R(t) = \int_{-T}^T s_R(\tau) \cdot s_R(t + \tau) d\tau = s_R(t) * s_R(-t) \quad (\text{III.18})$$

Dla rozważanego sygnału funkcja ta posiada rozwiązanie analityczne w postaci [Misaridis i inni 2005]

$$k_R(t) = T \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t) \cdot \frac{\sin\left(\left(1 - \frac{|t|}{T}\right) \cdot \pi \cdot B \cdot t\right)}{\pi \cdot B \cdot t} \quad (\text{III.19})$$

Celem korelacji sygnałów modulowanych częstotliwościowo jest ich „kompresja” w czasie. Taka operacja pozwala przedstawić długi sygnał modulowany $s_R(t)$ w postaci krótkiego impulsu $k_R(t)$ zbliżonego do impulsu Diraca $\delta(t)$. Im szersze pasmo będzie miał sygnał $s(t)$ tym jego korelacja $k_R(t)$ będzie bliższa impulsowi $\delta(t)$.

Uwzględniając transmitancję ośrodka $e(t)$, w którym zachodzi propagacja fali oraz szum $n(t)$ sygnał odebrany przed korelacją $x(t)$ można zapisać w postaci

$$x(t) = s_R(t) * e(t) + n(t) \quad (\text{III.20})$$

Korelacja sygnału $x(t)$ z wysłanym sygnałem modulowanym $s_R(t)$ pozwala uzyskać skorelowany sygnał odebrany $x_C(t)$.

$$x_C(t) = x(t) \otimes s_R(t) \quad (\text{III.21})$$

Forma sygnału po korelacji $x_C(t)$ przypomina kształtem sygnał odebrany przy pobudzeniu impulsowym. Podstawiając III.20 do równania III.21 i uwzględniając III.18 otrzymujemy

$$x_C(t) = (e(t) * s_R(t) + n(t)) * s_R(-t) = s_R(t) * s_R(-t) * e(t) + n(t) * s_R(t) \quad (\text{III.22})$$

skąd uwzględniając III.18

$$x_C(t) = e(t) * k_R(t) + n_c(t) \quad (\text{III.23})$$

gdzie $n_c(t)$ jest szumem po korelacji.

Jak wspomniano wcześniej podstawową zaletą stosowania sygnałów typu chirp jest ich dużo większa energia w porównaniu z sygnałami impulsowymi. Odpowiednikiem pobudzenia impulsowego jest sygnał $k(t)$, którego energia E_K wynosi

$$E_K = \int_{-T}^T |k(t)|^2 dt \quad (\text{III.24})$$

gdzie T oznacza długość sygnału $s(t)$, zaś $k(t)$ jest autokorelacją sygnału $s(t)$. Z powyższego wynika, że **zwiększając długość chirpa bez zmiany jego amplitudy można zwiększać energię E_K sygnału $k(t)$** , a co za tymi idzie również energię sygnału $x_C(t)$. Wzrost energii E_K przy wzroście czasu T rośnie szybciej niż wzrost energii szumu w tym samym czasie, co wiąże się z poprawą stosunku sygnał szum (SNR)

$$SNR = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} K_R^2(f) df}{\int_{-\infty}^{+\infty} N_{RC}^2(f) df} = \frac{E_K}{E_{NC}} \approx T \cdot B \quad (III.25)$$

gdzie $K_R(f)$ jest widmem sygnału $k_R(t)$, E_{NC} oznacza energię szumu po korelacji $n_C(t)$. Zakładając, że mamy do czynienia z szumem białym wówczas $N_{RC}(f)$ jest widmem szumu przefiltrowanym przez widmo $S_R(f)$. Stanowi to tym samym rodzaj filtra dopasowanego.

$$N_{RC}(f) = N(f) \cdot S_R^*(f) \quad (III.26)$$

Z zależności III.25 wynika że SNR można poprawić także przez zwiększenie pasma B sygnału $s(t)$, ale w rzeczywistości jest ono ograniczone pasmem zastosowanych przetworników.

W procesie pomiarowym wykorzystuje się dodatkowo trzy operacje uśredniania poprawiające SNR . W każdym punkcie pomiarowym sygnał odbierany jest uśredniany M razy co daje poprawę SNR proporcjonalną do $M^{0.5}$. W algorytmie SL dla każdego profilu występuje operacja sumowania wszystkich N sygnałów odebranych dzięki czemu w połączeniu z uśrednianiem M -krotnym uzyskuje się poprawę stosunku sygnału do szumu SNR proporcjonalna do $(MN)^{0.5}$. W trakcie pomiaru dokonuje się także uśredniania przestrzennego przez pomiar P profili co ostatecznie daje poprawę SNR proporcjonalna do $(MNP)^{0.5}$.

Zastąpienie pobudzenia impulsowego sygnałem modulowanym częstotliwościowo wymaga dostosowania parametrów tego sygnału do parametrów używanego przetwornika. Kluczowe znaczenie w tym wypadku ma dobór pasma B sygnału $s(t)$. W najprostszym przypadku pasmo B powinno być dokładnie takie samo jak pasmo skuteczne przetwornika, a zatem dolna i góra częstotliwość pasma B powinna odpowiadać tymże częstotliwościom w paśmie przetwornika. Rozszerzanie B poza tak ustalone granice zmniejsza efektywność pobudzenia gdyż część widma sygnału $s(t)$ wykracza poza pasmo przenoszenia przetwornika przez co ma znacznie mniejszy wpływ na moc sygnału wysłanego. W takim przypadku natura przetwornika pełni rolę filtra pasmowo-przepustowego. Stosowanie pasma B węższego niż pasmo przetwornika także zmniejsza efektywność źródła, ale może być uzasadnione w sytuacji, gdy np. wysokie

częstotliwości są silnie tłumione i ich emisja ma znikomy wpływ na sygnał odebrany lub jeśli niezbędne jest nieznaczne przesunięcie pasma w celu uniknięcia wpływu jakiegoś typu zakłóceń np. pochodzenia elektromagnetycznego. Ostateczny precyzyjny dobór częstotliwości f_{min} i f_{max} zależy w dużym stopniu od warunków otoczenia oraz badanego materiału i zazwyczaj jest ustalany na podstawie obserwacji sygnału odebranego po korelacji $x_c(t)$ i jego widma $X_c(f)$.

Ważnym parametrem sygnału $s(t)$ jest jego amplituda, która powinna być jak największa w celu poprawy SNR . Ograniczeniem amplitudy jest dopuszczalne napięcie pobudzenia przetwornika w pracy ciągłej, które jest znacznie niższe niż w przypadku pracy impulsowej. Pobudzanie przetwornika długim sygnałem może doprowadzić do jego uszkodzenia poprzez przegrzanie, w związku z czym niezbędne jest stosowanie zarówno ograniczenia średniej mocy sygnału jak również stosowanie przerw pomiędzy kolejnymi emisjami. Dla bezpieczeństwa przyjęto, że przerwa pomiędzy emisjami nie może być krótsza niż czas emisji. Maksymalne napięcie pobudzenia oraz średnią moc sygnału ustala się doświadczalnie dla każdego przetwornika. Szczegółową analizę wpływu poszczególnych parametrów chirpa na wynik korelacji można znaleźć między innymi w pracy Koseckiego [Kosecki 2010]. Wybrane parametry konfiguracji sygnału pobudzenia zamieszczono w tabeli III-2.

Tabela III-2. Parametry konfiguracja sygnału pobudzenia typu chirp.

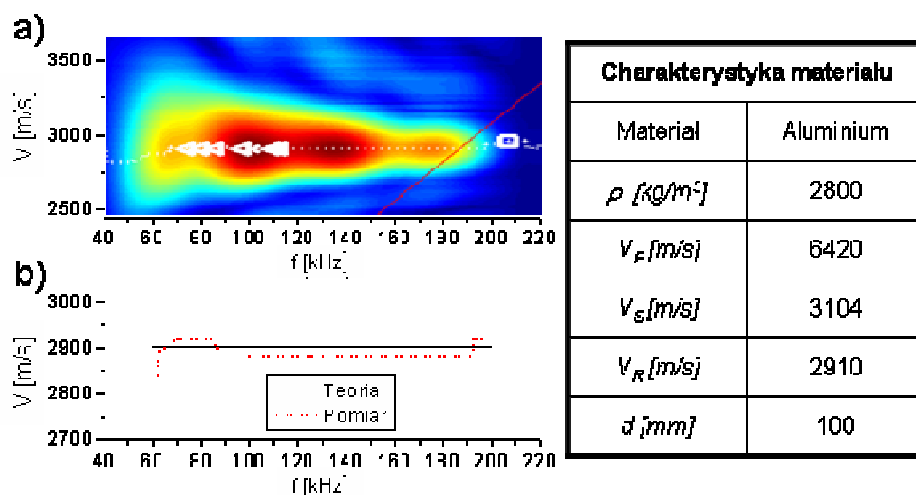
Parametr	Wartość
Częstotliwości f_{min} i f_{max}	$30 \div 500$ [kHz] (w zależności od zastosowanego przetwornika)
Długość sygnału T	$5 \div 100$ [ms]
Przerwa pomiędzy emisjami	$1 \div 2 \cdot T$ [ms]
Moc RMS	$2 \div 10$ [W]
Poziom sygnału pobudzenia (na wyjściu wzmacniacza)	100 [V]
Energia sygnału pobudzenia (na wyjściu wzmacniacza)	$10 \div 1000$ [mJ]

Wadą stosowania sygnałów modulowanych częstotliwościowo jest dużo dłuższy czas akwizycji w przypadku, gdy korelacja jest realizowana na bieżąco lub duży rozmiar plików z danymi pomiarowymi w przypadku wykonywania korelacji w ramach przetwarzania sygnałów w odrębnej procedurze. Ponadto urządzenie rejestrujące (oscyloskop lub karta oscyloskopowa) musi dysponować dostatecznie dużą pamięcią

niezbędna do zapisu długich sygnałów. Stosowanie tego typu sygnałów pobudzających wymaga także odpowiedniego rozwiązania w układzie emisyjnym. Niezbędne jest zastosowanie specjalnego programowalnego generatora funkcji arbitralnych.

III.1.3 Test na materiale referencyjnym

W celu sprawdzenia poprawności działania systemu pomiarowego SWMD wraz z oprogramowaniem służącym do przetwarzania danych przeprowadzono szereg testów. Rezultaty jednego z nich omówiono poniżej. Do testu użyto jednolitego bloku aluminium o grubości 100 mm . Dokładniejszą charakterystykę badanego materiału zamieszczono w tabeli na rysunku III.15, na którym pokazano również porównanie dyspersji zmierzonej i wyliczonej z modelu. Charakterystyka teoretyczna została wygenerowana przy użyciu modelu Haskella (zakładając jednorodność materiału) dla parametrów jak w tabeli (rys. III.15). Analizowany materiał jest jednorodny (brak warstw), a zatem pomijając dyspersję pochodzącą od tłumienia charakterystyka dyspersyjna jest poziomą linią prostą. W pomiarze użyto przetwornika nadawczego o częstotliwości środkowej $f_c = 75\text{ kHz}$ oraz paśmie do 60 do 200 kHz .



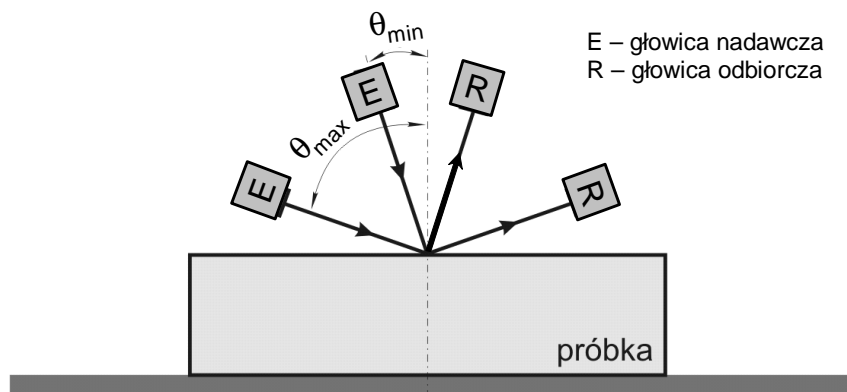
Rysunek III.15 Porównanie prędkości propagacji fali powierzchniowej wyznaczonej eksperymentalnie przy użyciu systemu SWMD z wartością wynikającą z modelu dla jednorodnego aluminium; a) charakterystyka ST, b) charakterystyki dyspersyjne (teoretyczna i zmierzona), parametry badanej próbki (w tabeli).

Niewielkie rozbieżności (rys. III.15b) pomiędzy charakterystykami dyspersyjnymi w środkowej części pasma wynikają z przyjętej precyzji procedury SL, zaś różnice na końcach pasma wynikają także z pogorszenia SNR . Zmierzona prędkość fazowa wyniosła około 2890 m/s i różni się tylko o 1% od wartości teoretycznej. Uzyskany wynik

potwierdza poprawność działania zarówno systemu pomiarowego jak i użytego oprogramowania.

III.2 System do pomiarów reflektometrycznych

Drugim opracowanym i rozwijanym w pracy systemem pomiarowym jest układ reflektometryczny nazywany w skrócie RMD (Reflectometry Measurement Device) służący do pomiaru współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych w funkcji kąta padania $R(\theta)$. Otrzymana charakterystyka $R(\theta)$ jest wykorzystywana do identyfikacji niektórych parametrów struktury badanego materiału. Na rysunku III.16 pokazano schematyczne ustawienie przetworników jakie powinien zapewniać system pomiarowy. Przetwornik nadawczy wysyła sygnał ($w(t)$) w kierunku badanego materiału, który po odbiciu od jego powierzchni jest następnie odbierany przez głowicę odbiorczą (sygnał $s(t, \theta)$). Zakładając fale harmoniczne stosunek amplitudy fali odbitej do amplitudy fali padającej pozwala wyznaczyć współczynnik odbicia R . Powtarzając pomiary dla różnych kątów padania fal wyznacza się zależność współczynnika odbicia w funkcji kąta padania fali.



Rysunek III.16 Konfiguracja przetworników i próbki w pomiarach reflektometrycznych.

Przebieg pomiaru wymaga, aby przetworniki pomiarowe (nadawczy i odbiorczy) poruszały się po łukach o stałych promieniach w zakresie kątów od θ_{min} do θ_{max} . Ważne jest, aby osie obrotu obu przetworników pokrywały się wzajemnie oraz leżały na powierzchni badanego materiału, zaś kąty padania i odbicia względem normalnej do powierzchni były sobie równe.

III.2.1 Urządzenie pomiarowe RMD

Realizacja pomiaru współczynnika odbicia R wymaga akwizycji sygnałów ultradźwiękowych dla conajmniej kilkunastu położań kątowych z zachowaniem wysokiej dokładności zarówno kąta jak i odległości od środka obrotu. Ręczne ustawianie przetworników z zachowaniem dużej dokładności położenia okazuje się bardzo czasochłonne. Wymóg powtarzania pomiarów w celu ich uśrednienia zwielokrotnia czas realizacji badań nawet do kilku godzin dla jednej próbki. W takiej sytuacji niezbędna okazała się realizacja automatycznego systemu pomiarowego.

Wcześniejsze prace badawcze realizowane w laboratorium związane z wyznaczeniem współczynnika odbicia były prowadzone jedynie w zanurzeniu. Wykorzystywane do tego celu urządzenie mimo takich zalet jak np. łatwość pozycjonowania badanej próbki, posiadało kilka istotnych mankamentów, które uniemożliwiały prowadzenie badań w powietrzu. Głównymi mankamentami były:

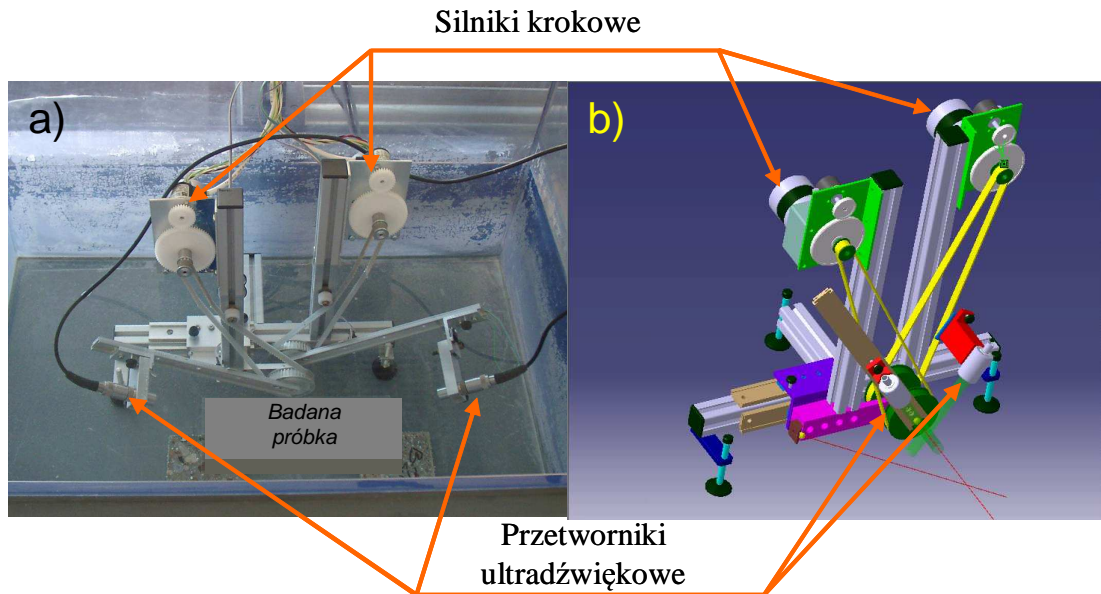
- zbyt mały zakres kątów θ ,
- duża niedokładność pozycjonowania przetworników,
- mała powtarzalność ruchu,
- możliwość pracy tylko z jednym typem głowic ultradźwiękowych.

Zebrane doświadczenia zarówno w zakresie rozwiązania części mechanicznej systemu jak i oprogramowania do sterowania i przetwarzania danych pomiarowych posłużyły przy budowie kolejnej wersji systemu, dla którego przyjęto następujące założenia:

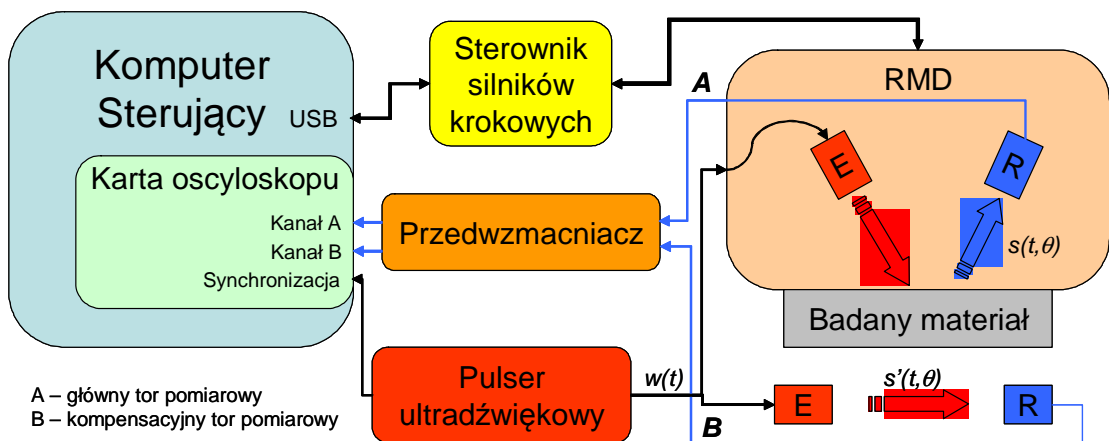
- możliwość pracy zarówno w wodzie jak i w powietrzu,
- wysoka precyzja pozycjonowania kąтового przetworników,
- dokładne ustalenie odległości przetworników od badanej powierzchni z możliwością jej regulacji,
- istotna redukcja odbić pasożytniczych powodowanych elementami konstrukcji urządzenia.

Biorąc pod uwagę powyższe założenia i wcześniejsze doświadczenia zaprojektowano i wykonano system pomiarowy, którego część wykonawcza przedstawiono na rysunku III.17 [Safinowski i inni 2008]. W prezentowanym rozwiązaniu przetworniki ultradźwiękowe są mocowane do obrotowych ramion z możliwością przesuwania wzdłuż ramienia (zmiana długości promienia d). Do obrotu ramion zastosowano dwa niezależne napędy oparte na silnikach krokowych. Takie rozwiązanie umożliwia obrót przetworników od 0° do 90° względem normalnej do badanej powierzchni (ograniczenie stanowi jedynie rozmiar zastosowanych głowic pomiarowych). Położenie kątowe przetworników można ustawić z dokładnością $\Delta\theta=0,018^\circ$. Rozchylenie ramion do

kąta 90° może być wykorzystywane do kalibracji układu i umożliwia pomiar fali biegnącej bezpośrednio pomiędzy przetwornikami. Przesunięcie przetworników wzdłuż ramion jest możliwe w zakresie od 10 mm do 300 mm . Istotną zaletą urządzenia jest możliwość pracy zarówno w powietrzu jak i w wodzie co znacznie rozszerza zakres potencjalnych zastosowań.



Rysunek III.17 Ostateczne rozwiązanie systemu RMD; a) zdjęcie urządzenia w czasie pomiaru, b) model 3D.



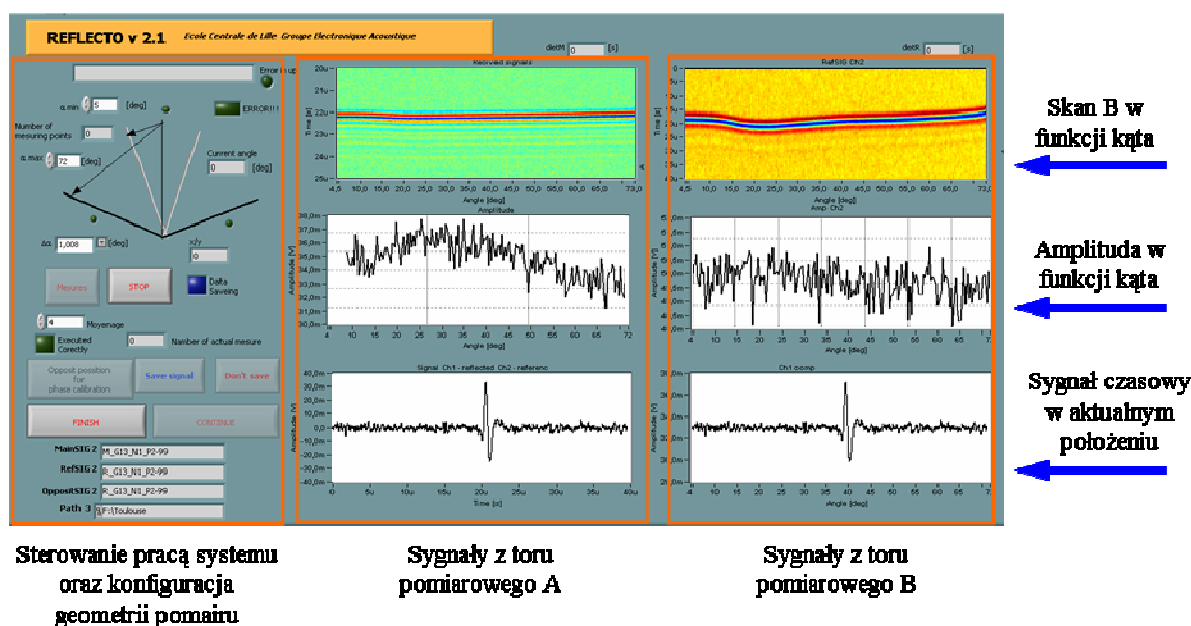
Rysunek III.18 Schemat blokowy systemu RMD.

Na rysunku III.18 pokazano schemat blokowy system *RMD* z zaznaczonymi torami pomiarowymi A i B. Zastosowanie drugiego toru pomiarowego (kompensacyjnego) wynika z potrzeby uwzględniania wpływu zmian warunków otoczenia na pomiar ultradźwiękowy w powietrzu. Szczegóły dotyczące tego zagadnienia opisano w rozdziale III.2.2.

Do sterowania systemem *RMD* opracowano w środowisku LabVIEW specjalne oprogramowanie o nazwie REFLECTO. Interfejs użytkownika programu w czasie pomiaru pokazano na rysunku III.19. Zadania realizowane przez program są następujące:

- inicjalizacja systemu,
- konfiguracja karty oscyloskopowej,
- konfiguracja geometrii pomiaru (zakres kątów, skok, liczba powtórzeń),
- realizacja zaprogramowanej sekwencji pomiarowej,
- zapis danych pomiarowych.

Opracowany program może współpracować z różnymi typami oscyloskopów. Mobilność systemu uzyskano dzięki wykorzystaniu komunikacji poprzez porty USB, co umożliwia użycie komputera przenośnego jako jednostki sterującej. Sposób zapisu danych pomiarowych jest identyczny jak w przypadku *SWMD*. Dla każdego kanału pomiarowego tworzony jest osobny plik binarny zawierający sygnały czasowe dla wszystkich położenia kątowych. Każde nowe powtórzenie pomiaru jest zapisywane w nowej parze plików po jednym dla każdego toru pomiarowego. Szum widoczny na przykładowych przebiegach amplitud w funkcji kąta (rys. III.19) wynika z przyjętej skali wykresów.



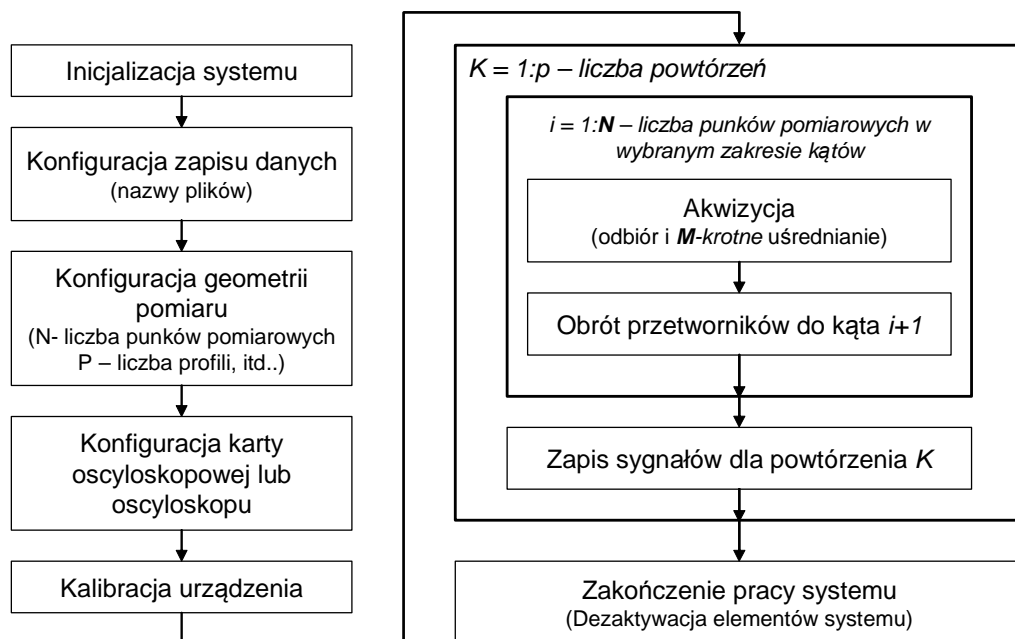
Rysunek III.19 Interfejs programu REFLECTO w czasie pomiaru.

Przebieg pomiaru pokazano w postaci schematu blokowego na rysunku III.20. Po uruchomieniu systemu RMD sprawdzana jest poprawność komunikacji z oscyloskopem i sterownikami silników krokowych urządzenia RMD. Następnie należy ustalić parametry zapisu danych oraz parametry pomiaru, z których najważniejsze to:

N - liczba punktów pomiarowych (liczba punktów charakterystyki $R(\theta)$, zazwyczaj dla dobrego odwzorowania charakterystyki wystarcza kilkanaście punktów),

θ_{min} i θ_{max} – kąt początku i końca pomiaru. Ustalenie parametrów materiałowych na drodze identyfikacji jest tym dokładniejsze im szerszy zakres kątów pokrywa charakterystyka R (teoretycznie od 0° do 90°). Ograniczeniem minimalnego i maksymalnego kąta θ są rozmiary przetworników, przez co w warunkach rzeczywistych uzyskuje się charakterystyki w zakresie od 5° do 70° . Tak duży zakres kątów uzyskuje się dzięki dużej odległości ($d \approx 25\text{ cm}$) przetworników od powierzchni próbki, co zapewnia także pracę w polu dalekim. Wadą większych odległości d jest wzrost tłumienia i zakłóceń pochodzących z powietrza,

K – liczba powtórzeń – w celu zmniejszenia wpływu zakłóceń o charakterze niestacjonarnym (zakłócenia wolnozmiennie np. zmiana temperatury otoczenia) stosuje się powtarzanie pomiaru dla jednego ustawienia urządzenia względem próbki (jeden obszar badania) uzyskując tym samym K charakterystyk $R(\theta)$, które są następnie uśredniane. Obecnie trwają prace nad optymalnym sposobem akwizycji z punktu widzenia minimalizacji zakłóceń. Dyskusję na ten temat podjęto między innymi w pracy [Kaczmarek i inni 2009]. Zazwyczaj stosuje się nie więcej niż 10 powtórzeń.



Rysunek III.20 Schemat blokowy działania programu REFLECTO.

Konfiguracja oscyloskopu pozwala optymalnie dobrać parametry akwizycji między innymi ilość uśrednień M , które mają wpływ na redukcję zakłóceń szybkochylnych. Kalibracja urządzenia polega na wykonaniu pomiarów referencyjnych na próbce szklanej w celu rejestracji sygnałów $e(t, \theta)$. Następnie po ustawieniu RMD na badanej powierzchni dokonuje się K -krotnej rejestracji sygnałów $s(t, \theta)$ i $s'(t, \theta)$. Charakterystykę współczynnika odbicia $R(\theta)$ uzyskuje się po przetworzeniu zebranych sygnałów w środowisku MatLAB. Parametry systemu RMD zestawiono w tabeli III-3.

Tabela III-3. Parametry robocze systemu RMD.

Parametr	Wartość
<i>Tryb pracy</i>	<i>bezkontaktowa</i> <i>(w wodzie lub powietrzu)</i>
<i>Położenie badanej powierzchni</i>	<i>poziome</i> <i>(inne po przygotowaniu odpowiedniego mocowania)</i>
<i>Liczba punktów pomiarowych N</i>	<i>dowolna, nie większa niż $N = ((\theta_{max} - \theta_{min})/\Delta\theta)+1$</i>
<i>Odległość pomiędzy punktami pomiarowymi $\Delta\theta$</i>	<i>0,018°</i>
<i>Zakres kątów</i>	<i>minimalny: 5°; maksymalny 90°</i>
<i>Pasma pracy</i>	<i>w zależności od zastosowanych przetworników</i> <i>(zazwyczaj ok 200kHz)</i>
<i>Czas akwizycji jednej charakterystyki</i>	<i>~10min</i> <i>(dla $N = 11$ bez powtarzania)</i>
<i>Ciężar urządzenia</i>	<i>~3kg</i>

III.2.2 Wielkości mierzone i przetwarzanie sygnałów

W systemie RMD jako pobudzenie przetworników nadawczych stosuje się sygnały impulsowe. Charakterystykę współczynnika odbicia $R(\theta)$ można wyznaczyć ze stosunku amplitud sygnałów odebranego $s(t)$ i wysłanego $w(t)$. Jednak w takim podejściu charakterystykę $R(\theta)$ jest obciążona błędem wynikającym z faktu, że poza badanym materiałem na sygnał odebrany $s(t, \theta)$ wpływ mają takie czynniki jak:

- transmitancja przetworników $h(t)$,
- zakłócenia na drodze propagacji w powietrzu $u(t)$,
- różny efekt rozbieżności wiązki dla różnych kątów $z(\theta)$.

Biorąc powyższe pod uwagę sygnał odniesienia $e(t)$ symbolicznie można wyrazić:

$$e(t, \theta) = w(t) * z(\theta) * u(t) \quad (\text{III.27})$$

Aby zatem uzyskać sygnał odniesienia $e(t)$ obarczony jak najmniejszym wpływem ww. czynników zaproponowano następującą procedurę. Przed rozpoczęciem pomiarów właściwych wykonuje się pomiar kalibrujący, w którym materiałem odbijającym jest referencyjna próbka szklana o grubości 14 mm odpowiadająca materiałowi idealnie sztywnemu i gładkiemu (w porównaniu z właściwościami szkieletu materiału porowatego). Pomiar wykonuje się w identycznej konfiguracji jak pomiary zasadnicze uzyskując grupę sygnałów odniesienia $e(t, \theta)$ dla całego zakresu kątów.

W trakcie pierwszych testów zaobserwowano dość znaczne fluktuacje sygnału odbieranego (przy ustalonym położeniu przetworników $\theta = \text{const.}$), których źródłem jest powietrze w obszarze propagacji. Rzeczywista konfiguracja układu pomiarowego sprawia, że droga propagacji fali w powietrzu jest stosunkowo długa wynosząc $2d$ (d odległość przetwornika od badanej powierzchni zazwyczaj od 20 cm do 25 cm). Zmiany parametrów powietrza w czasie na tak długiej drodze mogą mieć znaczący wpływ na amplitudę sygnałów odbieranego $A_{SI}(\theta)$ oraz sygnału odniesienia $A_S(\theta)$, a w konsekwencji również na współczynnik odbicia. Aby zminimalizować wpływ tych zakłóceń do układu pomiarowego dodano drugą parę przetworników (nadajnik i odbiornik). Przetworniki umieszczone nieruchomo naprzeciw siebie w odległości $2d$ tworząc drugi tor pomiarowy (tor B, nazywany również torem kompensacyjnym), w którym wpływ na sygnał odebrany $s'(t)$ mają jedynie warunki propagacji w powietrzu (brak ruchu przetworników i odbicia). Dla porządku główny tor pomiarowy (przetworniki ruchome) nazwano torem A. W trakcie pomiaru sygnały $s(t, \theta)$ oraz $s'(t, \theta)$ są rejestrowane jednocześnie. Na podstawie amplitud $A_S'(\theta)$ sygnałów $s'(t, \theta)$ wyznacza się zmiany amplitudy $\Delta A(\theta)$

$$\Delta A(\theta) = \frac{A_S'(\theta)}{A_S'(\theta_1)}, \quad (\text{III.28})$$

gdzie $A_S'(\theta_1)$ oznacza amplitudę sygnału $s'(t, \theta)$ dla pierwszego położenia kąтового.

Przy założeniu, że powietrze w obu torach pomiarowych podlega takim samym fluktuacjom amplituda sygnału $s(t, \theta)$ jest korygowana w następujący sposób

$$A_S(\theta) = \frac{A_{SI}(\theta)}{\Delta A(\theta)}, \quad (\text{III.29})$$

Analogicznej korekcie podlegają amplitudy sygnałów $e(t, \theta)$ dla idealnego reflektora.

Do obliczania charakterystyki współczynnika odbicia $R(\theta)$ w dziedzinie czasu brana jest wartość maksymalna amplitud sygnałów $A_S(\theta)=\max[A_S(t,\theta)]$ oraz $A_e=\max[A_e(t)]$ lub też wartość międzyszczytowa $A_S(\theta)=\max[A_S(t,\theta)]-\min[A_S(t,\theta)]$ oraz $A_e = \max[A_e(t)]-\min[A_e(t)]$.

$$R(\theta) = \frac{A_S(\theta)}{A_e(\theta_1)}, \quad (III.30)$$

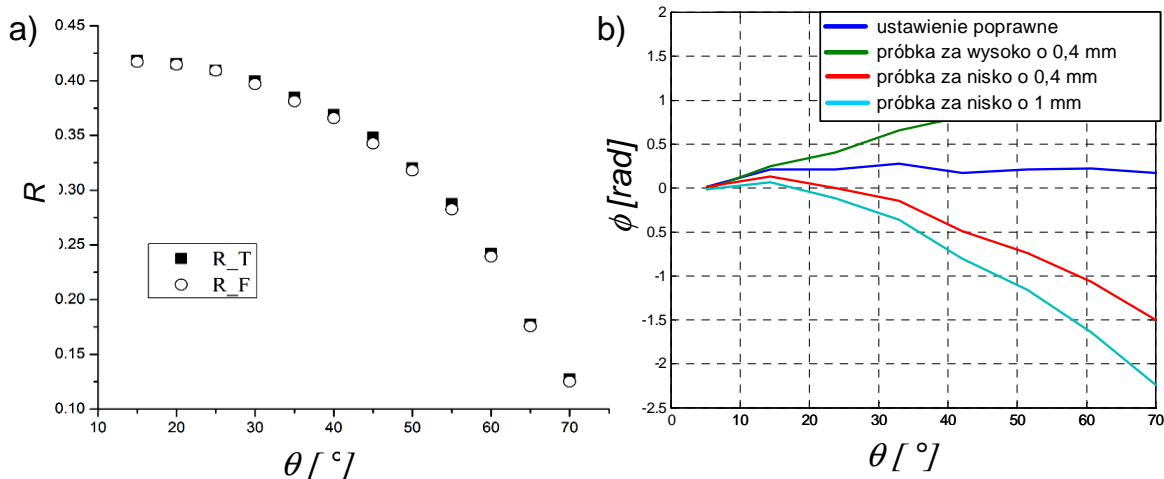
Przeprowadzając operację transformaty Fouriera na sygnale wysłanym oraz grupie sygnałów odebranych otrzymujemy ich widma

$$\mathfrak{S}(s(t,\theta)) = |S(f,\theta)|\exp(j\phi(f)), \quad E(f)\mathfrak{S}(e(t)) = |E(f)|\exp(j\phi(f)) \quad (III.31)$$

W ogólnym przypadku współczynnik odbicia może przyjmować wartości zespolone i być funkcją częstotliwości. Zależność współczynnika odbicia można wyznaczyć dla wybranych składowych widm w postaci

$$R(\theta, f_0) = \frac{|S(\theta, f_0)|}{|E(\theta, f_0)|} \quad (III.32)$$

gdzie f_0 oznacza wybraną częstotliwość, najczęściej jest to częstotliwość dominująca. Przykładową charakterystykę współczynnika odbicia – moduł i fazę z sygnałów czasowych lub też ich widm dla próbki gazobetonu pokazano na rysunku III.21a.



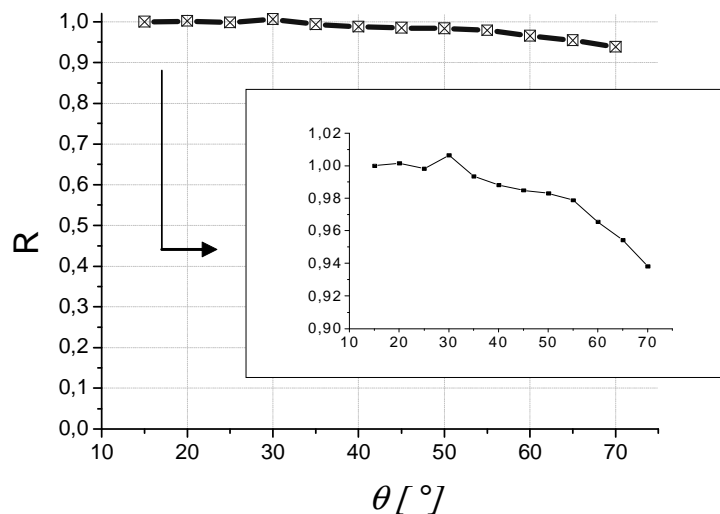
Rysunek III.21 a) Charakterystyka współczynnika odbicia R w funkcji kąta θ , R_T – obliczana z amplitud sygnałów czasowych, R_F – obliczana na podstawie widm, b) charakterystyka fazowa sygnałów $e(t,\theta)$ dla różnych ustawień próbki szkła.

Faza sygnałów $s(t, \theta)$, $e(t, \theta)$ jest wykorzystywana do pozycjonowania urządzenia względem powierzchni badanej próbki. Jeśli oś obrotu przetworników znajduje się nad lub pod badaną powierzchnią droga propagacji w powietrzu jest różna dla różnych kątów padania, co powoduje tym samym zmiany fazy sygnału w funkcji kąta θ .

$$\Delta\varphi(\theta, f) = \varphi(\theta_1, f) - \varphi(\theta, f) = \frac{2\pi f \cdot \Delta d}{c_{P_air}} \quad (\text{III.33})$$

gdzie c_{P_air} oznacza prędkość propagacji fal ultradźwiękowych w powietrzu, a Δd jest zmianą długości drogi propagacji. W sytuacji idealnego ustawienia urządzenia względem próbki zmiana fazy sygnału powinna być identyczna jak w modelu (dla szkła bliska zeru). W rzeczywistości ustawienie uznaje się za poprawne jeśli $\Delta\varphi < 0,5 \text{ rad}$, w przeciwnym razie należy skorygować położenie urządzenia. Przykład przebiegu fazy sygnału $e(t, \theta)$ w funkcji kąta θ dla różnych ustawień urządzenia względem próbki pokazano na rysunku III.21b.

III.2.3 Test na materiale wzorcowym



Rysunek III.22 Charakterystyka współczynnika odbicia R w funkcji kąta θ , zmierzona dla szklanego wzorca.

Jednym z testów działania systemu był pomiar charakterystyki R dla szklanego wzorca. Z modelowania wynika, że współczynnik odbicia od szkła powinien być bliski jedności w całym zakresie kątów, co wynika z dużej różnicy impedancji akustycznych pomiędzy powietrzem i szkłem. Na rysunku pokazano charakterystykę R dla szklanej próbki wzorcowej. Skalę R dobrano tak, aby pokazaną charakterystykę była

porównywalna z rezultatami dla innych materiałów. W zakresie małych kątów wartości R są bliskie jedności zgodnie z oczekiwaniami. Niewielki spadek wartości R (dochodzący do poziomu 0,94) obserwuje się dla większych kątów, co jest zgodne z modelem odbicia nieograniczonej fali płaskiej od idealnego ośrodka. Zatem działanie system RMD można uznać za poprawne.

III.3 Wnioski

Na potrzeby prowadzonych prac badawczych opracowano dwa oryginalne systemy pomiarowe. Ich konstrukcja poprzedzona licznymi doświadczeniami na układach laboratoryjnych sterowanych ręcznie pozwoliła zrealizować urządzenia spełniające założenia wynikające z wykorzystywanych w pracy modeli (Rozdział II) jak i wytyczne przyjęte we wstępie pracy doktorskiej tj:

- bezkontaktowe (w pełni nieinwazyjne) wykonanie pomiarów,
- badanie materiału przy dostępie tylko z jednej strony,
- możliwość realizacji pomiarów zarówno w laboratorium jak i w terenie,
- dostatecznie duża precyzja i relatywnie krótki czas realizacji badań.

Systemy te realizują pomiary propagacji fal powierzchniowych (System SWMD) oraz pomiary współczynnika odbicia fali w funkcji kąta padania (System RMD). W obu przypadkach urządzenia wykonawcze, których zadaniem jest odpowiednie pozycjonowanie przetworników w czasie pomiaru są sterowane komputerowo. W tym celu opracowano specjalnie oprogramowanie odpowiadające za konfigurację systemu, realizację pomiarów i akwizycję zebranych wyników. W systemie SWMD spełnienie kryterium pracy całkowicie bezkontaktowej przy badaniu propagacji fal powierzchniowych wymagało zastosowania sygnałów modulowanych częstotliwościowo typu chirp oraz odpowiedniego przetwarzania sygnałów. Do właściwego działania systemu RMD konieczne było opracowanie właściwej procedury kalibracji oraz dodanie drugiego (kompensacyjnego) toru pomiarowego, który pozwala uwzględnić wpływ otoczenia.

Realizacja przyjętych założeń dotyczących metodologii wykonywania pomiarów dla obu systemów została potwierdzona rezultatami uzyskanymi przy badaniu materiałów wzorcowych. Uzyskana zwarta i lekka konstrukcja urządzeń ułatwia ich obsługę w terenie.

Rozdział IV

Identyfikacja mechanicznych i strukturalnych parametrów betonu

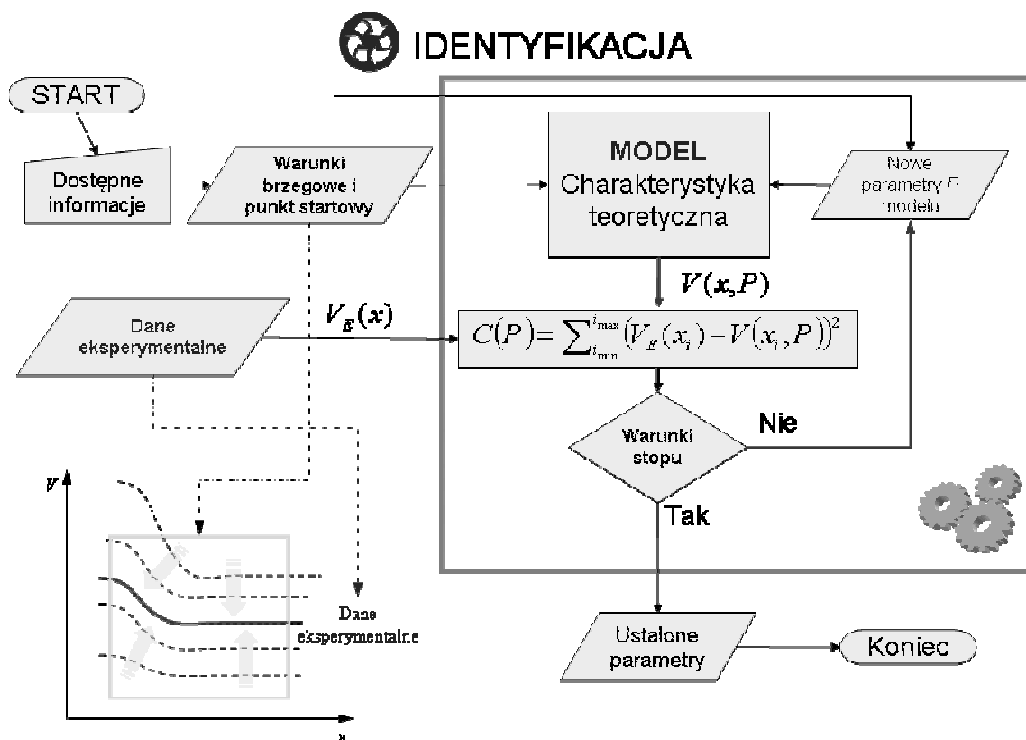
Rozdział dotyczy identyfikacji właściwości betonu poprzez rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego, w skrócie odwracanie. Procedura polega na znajdowaniu takich parametrów modelu, dla których jego przewidywania najlepiej pasują do zbioru danych eksperymentalnych. W celu znalezienia najlepszego dopasowania stosuje się różnego typu metody optymalizacyjne [Stachurski i inni 1999, Findeisen i inni 1987]. W zależności od złożoności modelu (liczby szukanych parametrów), oraz jego charakterystyki (znaczenia poszczególnych parametrów w modelach) rozwiązanie postawionego zagadnienia optymalizacyjnego może być mniej lub bardziej złożone [Stadnicki 2006]. W każdym przypadku osiągnięcie optymalnego rozwiązania wymaga wielokrotnego rozwiązania modelu wprost (Forward algorytm) z wykorzystaniem optymalizacji

Rozwój technik optymalizacyjnych rozpoczął się w latach 40tych XX wieku. Pojawienie się komputerów i szybki wzrost ich mocy obliczeniowych sprawiły, że możliwym stało się rozwiązywanie bardzo złożonych zagadnień optymalizacji. Dostępność i sprawne działania różnego rodzaju narzędzi optymalizacyjnych pozwala na rozwiązywanie nawet wielowymiarowych zagadnień w relatywnie krótkim czasie. Tematyka związana z rozwiązywaniem zagadnień odwrotnych jest między innymi silnie rozwijana na potrzeby geofizyki [Orozco 2003, Boiero i inni 2006, Feng i inni 2005] i medycyny. Umożliwia ona poznawanie budowy struktury gruntu lub narządów wewnętrznych organizmu na podstawie danych sejsmicznych lub ultrasonograficznych. Istnieją również próby identyfikacji struktury betonu z użyciem odwracania [Wardany 2005]. Najczęściej proces odwracania przeprowadza się po uprzednim wykonaniu niezbędnych pomiarów, niemniej jednak w literaturze można odnaleźć próby rozwiązywania zagadnienia odwrotnego w czasie rzeczywistym w trakcie pomiarów [Lai i inni 2002]. W obecnej chwili ilość dostępnych narzędzi optymalizacji jest na tyle duża, że często sam wybór optymalnej metody także stanowi pewien problem.

W niniejszej pracy rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego zostało zastosowane zarówno w identyfikacji parametrów na podstawie zarejestrowanej propagacji fal powierzchniowych jak i współczynnika odbicia. W każdym przypadku odwracanie wymaga

zdefiniowania modelu, funkcji celu oraz metody optymalizacyjnej. Schemat działania procedury rozwiązywania zagadnienia odwrotnego pokazano na rysunku IV.1.

Jeśli w procedurze identyfikacji wykorzystywany jest model wieloparametrowy warto zredukować liczbę niewiadomych ustalając niektóre parametry jako stałe. Można to zrobić na podstawie dostępnej wiedzy lub doświadczenia dotyczącego wrażliwości modelu (np. rozdziały: II.1.3, II.1.5, II.2.2). Im mniej parametrów pozostaje w procedurze optymalizacji tym szybsze i precyzyjniejsze jest jej działanie. Na podstawie dostępnej wiedzy można także ustawić ograniczenia poszukiwanych parametrów o ile wybrana procedura optymalizacji daje taką możliwość.



Rysunek IV.1 Schemat działania procedury rozwiązywania zagadnienia odwrotnego.

Według schematu pokazanego na rysunku IV.1 celem procedury optymalizacyjnej jest znalezienie parametrów modelu, dla których funkcja celu C dana równaniem IV.1 spełni jeden z warunków zakończenia optymalizacji.

$$C(P) = \sum_{i_{\min}}^{i_{\max}} (V_E(x_i) - V(x_i, P))^2 \quad (IV.1)$$

gdzie: $V_E(x_i)$ jest zbiorem danych eksperymentalnych zaś $V(x_i, P)$ zbiorem danych uzyskana z modelu dla parametrów P . Ustalenie minimum funkcji celu sprowadza się do wielokrotnego rozwiązania zagadnienia wprost (rozwiązania modelu) dla różnych wartości wektora parametrów P , które są proponowane przez funkcję optymalizacyjną na

podstawie poprzedniej iteracji. W rozpatrywanych przypadkach funkcję celu zdefiniowano jako sumę kwadratów różnic pomiędzy danymi eksperymentalnymi (V_E – *na schemacie*) i przewidywaniem modelu (V – *na schemacie*). Należy pamiętać, że szczegóły definiowania funkcji celu zależą od użytego algorytmu optymalizacyjnego. Procedura optymalizacyjna kończy poszukiwanie rozwiązania, jeśli spełniony będzie jeden z wymaganych warunków, np. osiągnięcie określonej wartości funkcji C , liczby iteracji, przyrostu zmiennych niezależnych itp. Rodzaje warunków zakończenia działania procedury także zależą od wybranej metody optymalizacyjnej, ale w każdym przypadku celem obliczeń jest znalezienie minimum funkcji C . Odpowiada to najlepszemu dopasowaniu przewidywań modelu do danych eksperymentalnych. Parametry modelu, dla których procedura została zakończona stanowią szukane rozwiązanie.

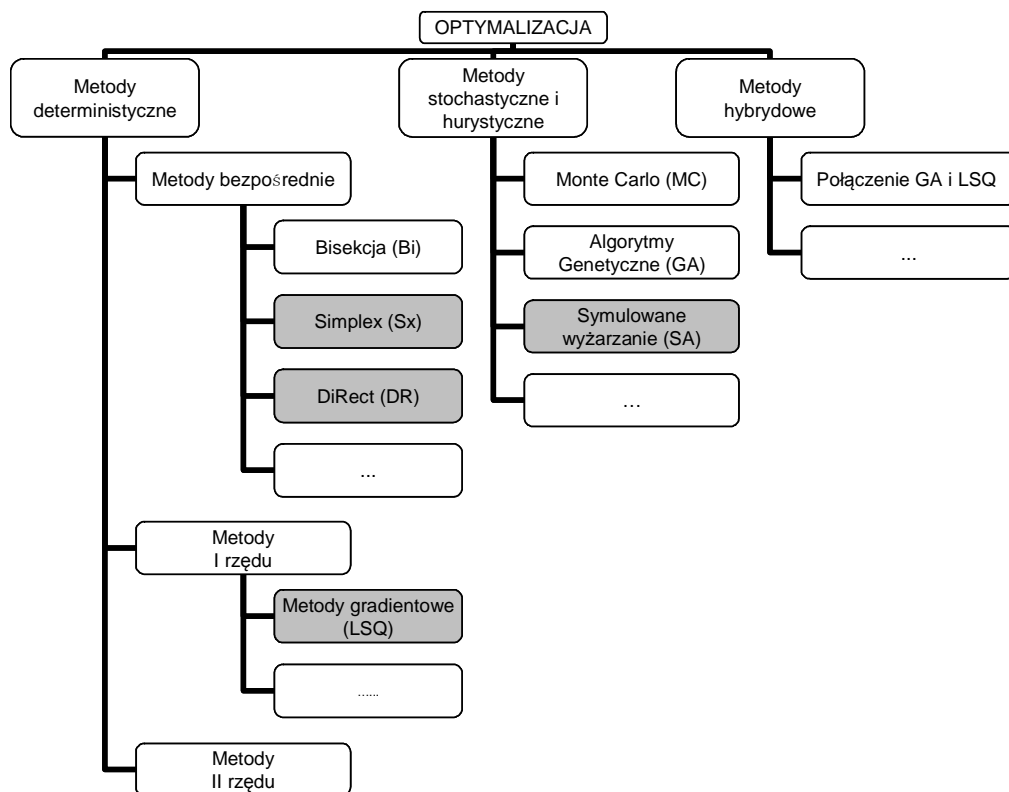
W kolejnych podrozdziałach przedstawiono krótki przegląd metod optymalizacyjnych, które mogą znaleźć zastosowanie w rozwiązywaniu problemu identyfikacji oraz porównanie ich działania i implementację w rozpatrywanych zagadnieniach z wykorzystaniem modeli Haskella, Gibsona i współczynnika odbicia. Pokazano również testy opracowanych programów na danych syntetycznych.

IV.1 Krótki przegląd metod optymalizacyjnych

Jedną z częściej przytaczanych klasyfikacji metod optymalizacyjnych przedstawiono na rysunku IV.2. Szarym kolorem wyróżniono metody użyte w pracy. Główne dwie grupy metod to **metody deterministyczne** oraz metody **stochastyczne**. W przypadku pierwszej grupy [Amborski 2009, Floudas i inni 2009] ekstremum funkcji celu jest szukane według schematu, w którym kolejne przybliżenia uzyskuje się na podstawie rezultatów znalezionych w poprzednich iteracjach. Zaletą tego typu metod jest duża szybkość działania nawet dla optymalizacji wieloparametrowej oraz łatwe definiowanie ograniczeń wartości parametrów. Wadą metod deterministycznych jest fakt, że są to algorytmy lokalne, czyli takie, które jako ostateczne rozwiązanie przyjmują pierwsze znalezione ekstremum bez względu czy będzie to ekstremum lokalne czy globalne. A zatem tego typu algorytmy nadają się do wielowymiarowych problemów, w których istnieje jedno ekstremum funkcji celu. W przypadku zastosowania ich dla problemu z funkcją celu, która posiada więcej niż jedno ekstremum lokalne nie ma gwarancji, że uzyskany wynik będzie poprawny.

Metody stochastyczne zaliczają się do metod optymalizacji globalnej, a zatem skutkiem ich działania powinno być znajdowanie ekstremum globalnego funkcji celu. Istnieje jednak zawsze niezerowe prawdopodobieństwo, że otrzymane rozwiązanie jest ekstremum lokalnym [Kusiak i inni 2009]. Wadą metod niedeterministycznych jest

stosunkowo długi czas dochodzenia do rozwiązania, który bardzo wzrasta ze wzrostem liczby parametrów optymalizacji. Czas obliczeń przy użyciu tych metod jest wielokrotnie dłuższy niż w przypadku metod deterministycznych. Pewną niedogodnością jest także trudność we wprowadzeniu ograniczeń wartości parametrów optymalizacji. Najczęściej ten problem rozwiązuje się poprzez wprowadzenie funkcji kary przy definiowaniu funkcji celu. Wśród metod stochastycznych dużą popularność zdobyły Algorytmy Genetyczne stosowane przy rozwiązywaniu różnorodnych problemów np. z zakresu geofizyki [Dal Morgo i inni 2004].



Rysunek IV.2 Klasyfikacja metod optymalizacyjnych.

Rozwiązaniem kompromisowym pomiędzy wyżej wymienionymi dwiema grupami metod optymalizacji może być zastosowanie **metod hybrydowych**. Przykładowo można zbudować algorytm, w którym szybko działająca procedura deterministyczna dająca rozwiązanie lokalne jest wielokrotnie wywoływana, ale za każdym razem parametry startowe procedury są dobierane stochastycznie. Istnieje wówczas duża szansa, że za którymś razem procedura doprowadzi do rozwiązania globalnego. Aby odróżnić rozwiązanie globalne od lokalnych należy porównać wartości funkcji celu – błędu dopasowania. Najlepszy globalny rezultat, odpowiada najniższa wartość (ekstremum) funkcji celu. Działanie metody hybrydowej może być szybsze, niż działanie algorytmu

stochastycznego dla tego samego problemu optymalizacji. Innym podejściem do metod hybrydowych jest poszukiwanie ekstremum globalnego jedną z metod tzw. „sztucznej inteligencji” np. metodą Algorytmów Genetycznych, a następnie zastosowanie metody poszukującej ekstremów lokalnych w celu dokładnego ustalenia położenia tego ekstremum. Działanie takich metod w większości przypadków przynosi dobre rezultaty.

W niniejszej pracy wykorzystano kilka różnych metod optymalizacyjnych zarówno z grupy metod deterministycznych jak i stochastycznych. Opracowano także algorytm hybrydowy, którego opis zawiera rozdział IV.6. W Aneksie I skrótkowo przybliżono wybrane metody optymalizacyjne, które wykorzystano w rozwijanych procedurach.

IV.2 Porównanie wybranych metod optymalizacyjnych

Dobór właściwego narzędzia optymalizacji jest stosunkowo trudnym zadaniem i w dużej mierze zależy od rodzaju postawionego problemu. Sytuacja jest względnie łatwa, jeśli funkcja celu posiada jedno minimum. Zadania optymalizacji występujące w niniejszej pracy są problemami mającymi wiele lokalnych ekstremów, wymagającymi łączenia optymalizacji lokalnej jak i globalnej. W przypadku optymalizacji globalnej pojawia się problem czy lepiej zastosować czasochłonne procedury heurystyczne czy korzystniej przeprowadzać wielokrotnie optymalizację lokalną rozpoczynaną z różnych punktów startowych. Jeśli tak to, jaka liczba repetycji będzie opłacalna czasowo w stosunku do optymalizacji globalnej. Celem poniższego rozdziału jest porównanie wydajności wybranych metod optymalizacyjnych. Wszystkie próby przeprowadzono dla tego samego modelu dwuparametrowego. Wykorzystano model służący do obliczania współczynnika odbicia opisany w rozdziale II.2.1. Testowanie procedur optymalizacyjnych na jednym z modeli rozważanych w pracy wybrano zamiast użycia innej funkcji testowej. W efekcie uzyskane rezultaty odnoszą się do rozwiązywania rzeczywistego problemu rozpatrywanego w pracy. Zagadnienie jest rozwiązywane jako problem najlepszego dopasowania krzywej modelowej do krzywej rzeczywistej. Dla celów weryfikacyjnych krzywa rzeczywista została wygenerowana tym samym modelem, który jest używany w algorytmie optymalizacji (krzywa syntetyczna) przyjmując parametry $x_1=1.5$ i $x_2=0.5$. W poniższych tabelach zestawiono rezultaty poszukiwania minimum funkcji celu dla przypadku danych idealnych (tabela IV-1) oraz przypadku, w którym do krzywej rzeczywistej dodano pewien poziom szumu (tabela IV-2). Wprowadzenia szumu w drugim przypadku dokonano poprzez dodanie do punktów krzywej syntetycznej losowo wybranych wartości.

Postawiony problem rozwiązano przy użyciu czterech różnych metod optymalizacyjnych. Każdą z nich zaimplementowano w odrębnym programie rozwiązującym zagadnienie odwrotne. Opracowane programy dla porządku nazwano następująco:

- InvRefDR – algorytm wykorzystujący metodę optymalizacji globalnej DiRect,
- InvRefSi – algorytm o działaniu lokalnym z wykorzystaniem metody Simplex,
- InvRefLSQ – algorytm wykorzystujący metodę gradientową zaimplementowaną w procedurze lsqnonlin,
- InvRefSA – algorytm bazujący na metodzie Symulowanego Wyżarzania.

Tabela IV-1. Porównanie wyników i efektywności algorytmów optymalizacyjnych dla przypadku danych idealnych.

Program	InvRefDR	InvRefSi	InvRefLSQ	InvRefSA
Parametr x1	1.5000	1.5016	1.5001	1.4981
Parametr x2	0.5000	4.9997	0.4998	0.49996
Czas obliczeń [s]	0.29	0.62	0.32	37.4
Liczba wywołań funkcji celu	13	49	16	3312
Wartości funkcji celu w znalezionym minimum	6.92e-033	4.99e-008	6.23e-012	5.31e-008

Tabela IV-2. Porównanie wyników i efektywności algorytmów optymalizacyjnych dla przypadku danych zaszumionych.

Program	InvRefDR	InvRefSi	InvRefLSQ	InvRefSA
Parametr x1	1.5041	1.5013	1.5029	1.5037
Parametr x2	0.5000	0.5002	0.4996	0.5002
Czas obliczeń [s]	1.39	0.71	1,12	41.6
Liczba wywołań funkcji celu	105	56	46	3312
Wartości funkcji celu w znalezionym minimum	1.508e-003	1.508e-003	1,508e-003	1.508e-003

Analizując przedstawione wyżej rezultaty można stwierdzić, że wszystkie metody odnalazły to samo minimum. Jedyną wyraźną różnicę stanowi liczba wywołań funkcji celu dla programu InvRefSA opartego na metodzie Symulowanego Wyżarzania. Wiąże się to bezpośrednio z czasem obliczeń, który w tym przypadku był około 40 razy dłuższy w stosunku do pozostałych metod. Korzystne rezultaty uzyskano dla programu InvRefDR opartego na metodzie DiRect, która jako algorytm globalny rozwiązała zagadnienie

w podobnym czasie, co algorytmy o działaniu lokalnym. Mankament tej metody jest trudność implementacji do zagadnień więcej niż dwuwymiarowych. Porównując rezultaty dla programów opartych na optymalizacji lokalnej lepsze rezultaty uzyskano dla programu InvRefLSQ wykorzystującego metody gradientowe. Na podstawie zebranych wniosków w dalszych rozważaniach skupiono się na wykorzystaniu metod gradientowych dla optymalizacji lokalnej oraz Symulowanego Wyżarzania dla optymalizacji globalnej.

Przedstawione obliczenia przeprowadzono na komputerze osobistym HP Compaq 8510w z procesorem Intel Core 2 Duo T8300 2,4GHz i pamięcią RAM 4GB. Wszystkie metody były zaimplementowane w środowisku Matlab 2007 w systemie operacyjnym Windows Vista 32bit.

IV.3 Identyfikacja parametrów ośrodka w oparciu o model Haskella – testy z danymi syntetycznymi.

Identyfikacja parametrów ośrodka na podstawie danych pomiarowych jest kluczowym celem diagnostyki stanu lub jakości materiałów. Dość często niemożliwe jest przeprowadzenie identyfikacji w sposób bezpośredni, czego przykładem jest postawiony w pracy problem diagnostyki betonu. Wykorzystywane modele nie pozwalają na analityczne wyznaczenie parametrów materiałowych lub strukturalnych opisujących stan betonu. Jednym z rozważanych modeli jest opisany w rozdziale II.1 model Haskella. Stosowanie do identyfikacji modelu Haskella jest podwójnie złożone, gdyż obok problemu poszukiwania parametrów materiału samo rozwiązanie równania dyspersyjnego (rozwiązanie wprost) wymaga użycia metod numerycznych optymalizacji. Szczegóły rozwiązywania zagadnienia wprost pokazano w rozdziale II.1.2. Przykłady identyfikacji makrostruktury ośrodka w oparciu o model Haskella pokazano np. w opracowaniach [Wathelet i inni 2004, Orozco 2003, Krstulovic-Opara i inni 1996].

Mając na uwadze złożoność problemu identyfikacji z wykorzystaniem modelu Haskella [Lowe 1995] celem podrozdziału jest:

- weryfikacja efektywności działania wybranych procedur optymalizacyjnych (LSQ i SA) pod kątem czasu obliczeń,
- porównanie dokładności uzyskiwanych rezultatów,
- sprawdzenie poprawności działania procedur w zależności od stopnia skomplikowania modelu (liczba niewiadomych)

Uzyskane w ten sposób informacje ułatwią właściwą konfigurację modelu oraz procedur optymalizacyjnych w warunkach rzeczywistych pod kątem efektywności

działania. Procedury LSQ i SA zaimplementowane w opracowanych programach nazwano odpowiednio InvHaskLSQ i InvHaskSA. W całym podrozdziale zastosowano taki sam sposób prezentowania wyników dla wszystkich przeprowadzonych testów. Funkcję celu dla procedury optymalizacyjnej zdefiniowano zgodnie ze wzorem IV.1. Jakość identyfikacji oceniano na podstawie błędu znormalizowanego w postaci

$$BN = \frac{\sum_{f=f_{\min}^1}^{f_{\max}} |V(f) - V_E(f)|}{\sum_{f=f_{\min}^1}^{f_{\max}} V_E(f)} \cdot 100 \% \quad (IV.2)$$

gdzie f_{\min} i f_{\max} odpowiadają górnej i dolnej częstotliwości w charakterystyce dyspersyjnej, zaś jako V_E przyjęto dane syntetyczne.

W rozpatrywanych zagadnieniach brany jest pod uwagę tylko mod podstawowy charakterystyki dyspersyjnej. Użycie modów wyższych rzędów jest także możliwe o ile będą ona mierzalne. Zastosowanie modelu Haskell'a do odwzorowywania propagacji fal w materiale niejednorodnym pozwala na przyjęcie dowolnej liczby warstw. Należy jednak uwzględnić, że na każdą warstwę o skończonej grubości przypadają cztery parametry oraz dodatkowo trzy parametry opisujące ostatnią warstwę – półprzestrzeń. Każdą warstwę charakteryzują dwie prędkości, prędkość propagacji fali podłużnej i poprzecznej, gęstość warstwy oraz jej grubość. Przykładowo, dla identyfikacji wszystkich parametrów w modelu dwuwarstwowym istnieje 7 zmiennych optymalizacji, dla modelu trójwarstwowego zaś będzie tych parametrów 11 itd. Tak duża liczba zmiennych przy ograniczonym zbiorze danych eksperymentalnych stanowi poważny problem dla rozwiązywania problemu odwrotnego. Każdy dodatkowy parametr optymalizacji wydłuża czas obliczeń i zwiększa prawdopodobieństwo niejednoznaczności. Zmniejszenie liczby poszukiwanych parametrów można zrealizować poprzez ustalenie niektórych parametrów za pomocą innych metod pomiarowych. Możliwe jest także przyjęcie niektórych parametrów jako stałe nie podlegające identyfikacji (o wartościach spodziewanych) zwłaszcza o ile nie mają one dużego wpływu na przewidywania modelu. Przeprowadzona analiza wrażliwości przedstawiona w rozdziale II.1.3 pokazuje, że gęstość warstw ma stosunkowo mały wpływ na charakterystykę dyspersyjną, drugim takim parametrem może być prędkość fali podłużnej. Podobne obserwacje można znaleźć w pracach z zakresu geofizyki [Dal Moro i inni 2006]. W warunkach eksperymentalnych wartość prędkości fali podłużnej można oszacować stosunkowo łatwo, ale jej dokładny pomiar wymaga znacznie bardziej skomplikowanych technik.

Rozwiązując zagadnienia wieloparametrowe należy tak przygotować model, aby wszystkie parametry przyjmowały wielkości podobnego rzędu. Dzięki temu procedura

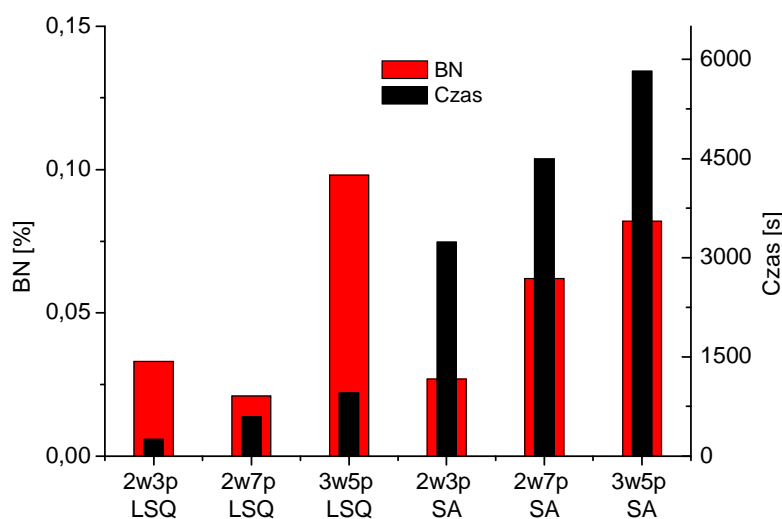
optymalizacyjna używa podobnych kroków przy zmianach wszystkich parametrów. Z tego względu w przypadku modelu Haskell'a zastosowanego do opisu fal w niejednorodnym betonie przyjęto wyrażać grubości warstw w cm, prędkości fal w km/s zaś gęstości w t/m^3 .

Rozwiązując zagadnienie odwrotne z wykorzystaniem modelu Haskell'a korzystano między innymi z algorytmu „*lsqnonlin*” (LSQ) w konfiguracji pozwalającej wprowadzać ograniczenia zmiennych modelu. Wprowadzenie ograniczeń jest korzystne, ponieważ wiadomo w jakim zakresie zawierają się wartości poszczególnych parametrów badanego materiału. Dzięki temu zwiększa się efektywność obliczeń i zmniejsza ryzyko, że procedura zatrzyma się w minimum lokalnym odpowiadającym niefizycznemu rozwiązaniu. Stosując metodę optymalizacji lokalnej do zagadnień, w których istnieją minima lokalne dużą rolę pełni wybór punktu startowego. Od tego wyboru zależy czy algorytm odnajdzie minimum globalne, czy też zakończy poszukiwania w minimum lokalnym. Rozwiązaniem tego problemu jak pisano wcześniej jest wielokrotne startowanie procedury lokalnej z różnych punktów startowych, co pokazano w rozdziale IV.6. Szczegóły przeprowadzonych identyfikacji z danymi syntetycznymi dla modelu Haskell'a zamieszczono w Aneksie II.

Rezultaty zbiorcze przeprowadzonych testów

Na rysunku IV.3 przedstawiono zestawienie czasu obliczeń i znormalizowanego błędu identyfikacji dla przeprowadzonych prób z danymi syntetycznymi (Aneks II). Pozwala to ocenić jakie rezultaty identyfikacji można uzyskać stosując różne metody optymalizacyjne oraz różne konfiguracje modelu Haskell'a. Zebrane rezultaty można zreasumować następująco:

- wykorzystywanie optymalizacji globalnej kilkakrotnie wydłuża czas obliczeń, nie dając pewności uzyskania poprawnego rozwiązania,
- czas obliczeń wzrasta proporcjonalnie do ilości szukanych parametrów,
- algorytm SA to samo zadanie realizuje kilkakrotnie dłużej niż LSQ,
- oba testowane algorytmy (LSQ i SA) odnajdują podobne wartości minimum funkcji celu oraz zbliżone wartości szukanych parametrów (dla danych syntetycznych $BN < 0,1 \%$).



Rysunek IV.3 Zestawienie czasu obliczeń i znormalizowanego błędu identyfikacji z zastosowaniem danych syntetycznych.

Podane w testach czasy trwania obliczeń należy traktować szacunkowo, gdyż mogą się one znacznie różnić w zależności od punktu z jakiego rozpoczyna się działanie programu identyfikacji. Stosując pokazane oprogramowanie do danych eksperymentalnych (rzeczywistych) należy spodziewać się nieco gorszych wyników z powodu błędów pomiarowych oraz faktu, że wykorzystywany model jest przybliżeniem badanego układu.

Z przedstawionego zestawienia widać, że stosowanie procedury LSQ z wielokrotnym jej wywołaniem jest korzystniejsze pod względem czasu obliczeń, zaś uzyskiwane dokładności w obu metodach są zbliżone. W rozdziale IV.6 pokazano opracowany algorytm, który realizuje zadanie wielokrotnej identyfikacji z użyciem LSQ.

IV.4 Identyfikacja parametrów ośrodka w oparciu o model Gibsona – testy z danymi syntetycznymi

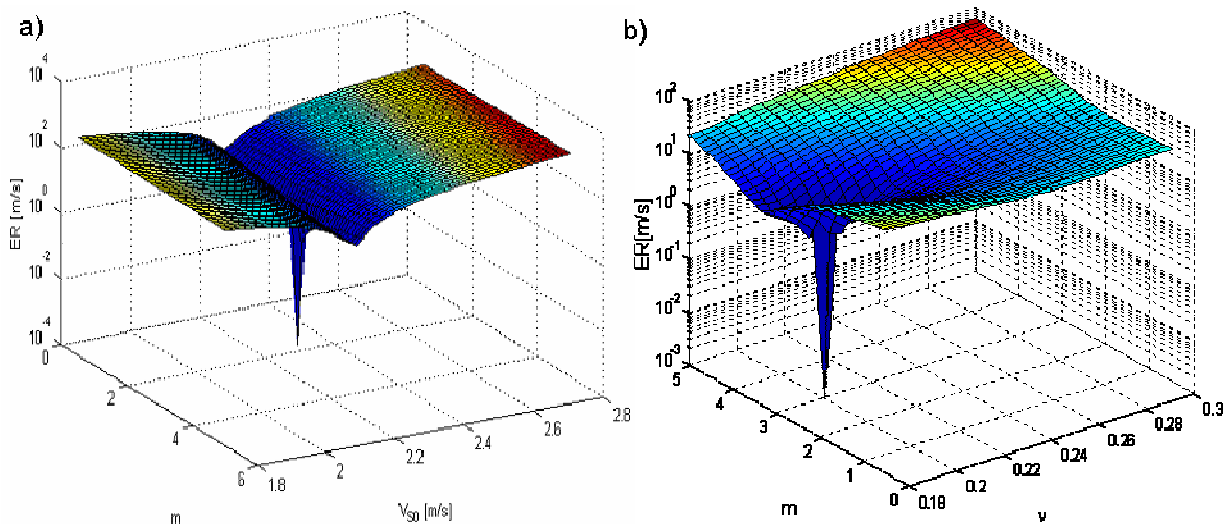
Poniżej przedstawiono analizę i testy rozwiązania problemu odwrotnego w oparciu o model Gibsona jako źródło teoretycznych krzywych dyspersyjnych. Szczegółowy opis modelu pokazano w rozdziale II.1.4. W przeciwieństwie do modelu Haskella w tym wypadku identyfikacja jest znacznie prostsza, gdyż model wprost posiada rozwiązanie analityczne, a optymalizacji podlegają najwyżej trzy parametry. Istnieje także możliwość redukcji liczby szukanych parametrów do dwóch i można to zrealizować na dwa sposoby. W pierwszym podejściu korzysta się z faktu małego wpływu liczby Poissona na przebieg

krzywej dyspersji. W rozdziale II.1.5 pokazano, że zmiana liczby Poissona w zakresie obejmującym najczęściej spotykane betony modyfikuje kształt charakterystyki dyspersyjnej średnio najwyżej o 1 %. Przyjmując zatem stałą wartość liczby Poissona, np. $\nu=0.2$, popełniany jest błąd nie przekraczający 1 %. Taki błąd można zaniedbać biorąc pod uwagę dokładność pomiaru eksperymentalnej charakterystyki dyspersyjnej oraz fakt, że przyjęta analityczna aproksymacja rozwiązania równania dyspersyjnego dla modelu Gibsona jest obciążona błędem rzędu 1-3 % [Vardoulakis i inni 1988]. W takim przypadku identyfikacji podlegają współczynnik niejednorodności m oraz prędkość fali poprzecznej na brzegu układu V_{SO} . Drugim sposobem na redukcję liczby szukanych zmiennych jest ustalenie prędkości V_{SO} . Można to osiągnąć korzystając z przybliżenia, że $V_R \approx 0.9V_S$, jeśli przyjmiemy np., że prędkość fali powierzchniowej na brzegu układu odpowiada prędkości fazowej na charakterystyce dyspersyjnej dla najwyższej częstotliwości. Wówczas możemy oszacować także wartość prędkości V_{SO} .

IV.4.1 Badanie wrażliwości funkcji błędu

Przeprowadzenie badania wrażliwości funkcji daje informacje pozwalające wybrać i przygotować algorytm optymalizacyjny. W tym celu należy wygenerować rozwiązania modelu dla wszystkich kombinacji analizowanych parametrów w rozpatrywanym zakresie. Następnie należy porównać je z charakterystyką syntetyczną wygenerowaną dla danego zestawu parametrów stanowiącą odniesienie aby wyznaczyć zgodnie z definicją funkcji błędu jej zależność od parametrów. Wizualizacja tak zdefiniowanej funkcji błędu pokazuje jej ewolucję przy zmianie parametrów. Model Gibsona jest stosunkowo prosty, dzięki czemu było możliwe przeprowadzenie takiego badania w przeciwieństwie do modelu Haskella, gdzie złożoność rozwiązania zagadnienia i większa liczba parametrów bardzo ograniczają jednoznaczność otrzymywanych rezultatów, przez co takie badania nie zostały wykonane.

Analiza została przeprowadzona przyjmując funkcję błędu zdefiniowaną równaniem IV.1. Parametrami modelu Gibsona są prędkość fali poprzecznej V_{SO} , i liczba Poissona ν reprezentujące właściwości na brzegu półprzestrzeni oraz współczynnik niejednorodności m . Na rysunku IV.4 przedstawiono wykresy 3D funkcji błędu dla dwóch przypadków. Dla lepszego zobrazowania istniejącego minimum wykresy pokazano w skali logarytmicznej. Syntetyczna charakterystyka dyspersyjna została wygenerowana dla $\nu=0.2$, $V_{SO}=2200$ m/s oraz $m=3$. Rysunku IV.4a pokazuje przypadek, gdy jako stałą przyjęto wartość liczby Poissona ($\nu=0.2$). Uzyskana w ten sposób funkcja błędu posiada jedno minimum globalnym. Rysunek IV.4b przedstawia powierzchnię funkcji błędu obliczoną dla ustalonego $V_{SO}=2200$ m/s. Ponownie funkcja błędu ma pojedyncze minimum.



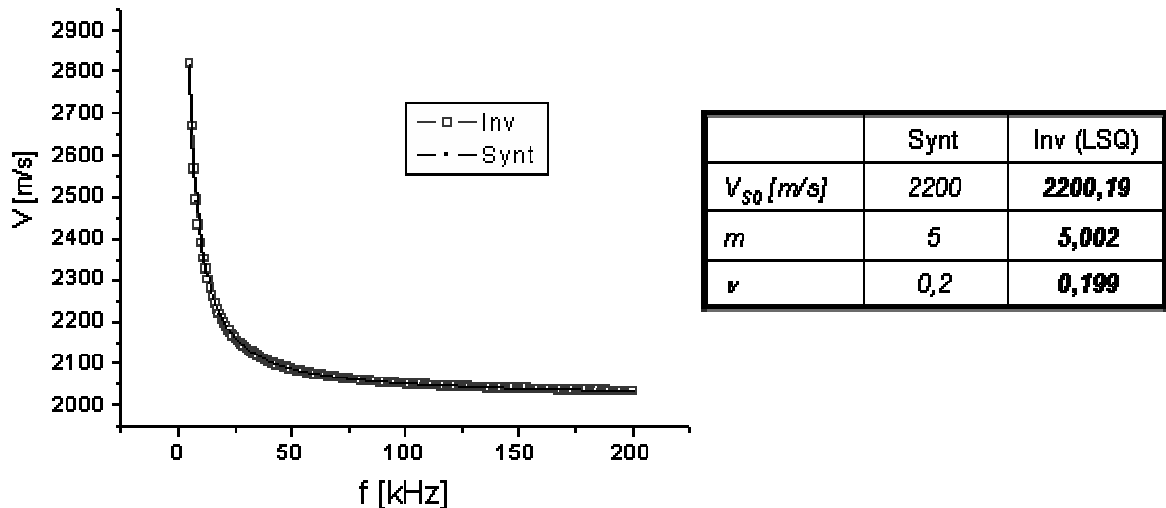
Rysunek IV.4 Funkcja błędu dla modelu Gibsona przy: a) ustalonym m , b) ustalonym V_{S0} .

Istnienie pojedynczego minimum w obydwu przypadkach jest bardzo korzystne z punktu widzenia rozwiązywania problemu identyfikacji. Pozwala bowiem zastosować algorytm optymalizacji lokalnej, którego działanie jest szybkie, a uzyskiwane wyniki są wiarygodne.

IV.4.2 Testy programu

Badania wrażliwości funkcji błędu potwierdziły zasadność stosowania metody optymalizacji lokalnej w zagadnieniu identyfikacji parametrów modelu Gibsona. Znając wrażliwość i ograniczenia rozważanego modelu oraz charakter funkcji błędu można zbudować procedurę rozwiązującą zagadnienie odwrotne. Model Gibsona wraz z gradientową procedurą optymalizacji lokalnej LSQ zaimplementowano w programie o nazwie InvGibLSQ. Do poniższych rozważań zastosowano tak jak poprzednio funkcję optymalizacji lokalnej lsqnonlin (dostępnej w bibliotece Matlaba). Elementarnym testem poprawności algorytmu jest próba identyfikacji parametrów dla zadanej krzywej syntetycznej (wygenerowanej tym samym modelem Gibsona, który stosuje się w procedurze odwracania). Dla tego celu przyjmujemy $V_{S0}=2200$ m/s, $m=5$ oraz $\nu=0,2$. Granice zmian parametrów dla algorytmu optymalizacyjnego ustalono w przedziałach od 1800 m/s do 2800 m/s dla V_{S0} oraz od -20 do $+30$ dla m . Wartość liczby Poissona na podstawie wcześniejszej dyskusji ustalono jako stałą $\nu = 0,2$. Rezultat rozwiązania problemu odwrotnego dla tego przypadku pokazano na rysunku IV.5. Opracowany program charakteryzuje się krótkim czasem wykonywania obliczeń w porównaniu z programami wykorzystującymi model Haskella, zaś uzyskane parametry modelu dokładnie odwzorowują te wartości, których użyto do wygenerowania krzywej syntetycznej. Podobnie efektywne działanie procedury uzyskuje się dla innych zestawów

danych. W przypadku stosowania syntetycznej krzywej dyspersyjnej dokładność odwrócenia zależy jedynie od zdefiniowanego w procedurze optymalizacyjnej poziomu akceptacji rozwiązania.



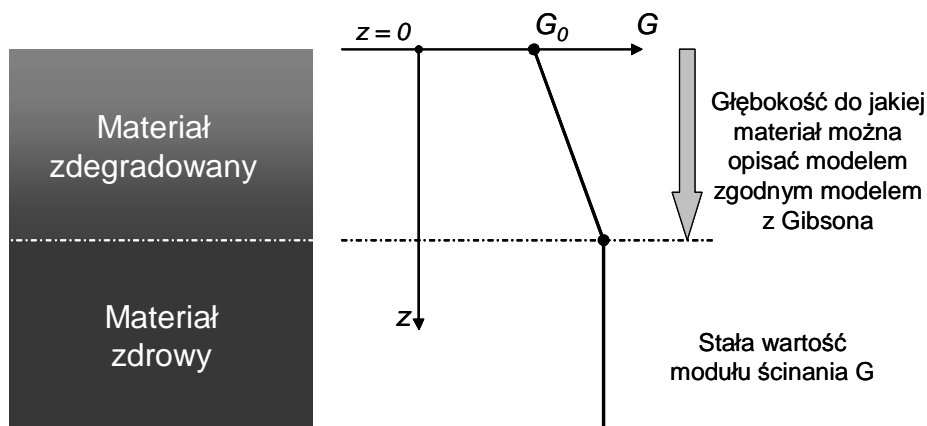
Rysunek IV.5 Porównanie charakterystyk dyspersyjnej syntetycznej *Synt* i teoretycznej *Inv*, uzyskanej na drodze rozwiązania problemu odwrotnego.

Prostota modelu Gibsona, w tym niewielka liczba parametrów potrzebna do wyliczenia teoretycznej charakterystyki dyspersyjnej oraz właściwości funkcji błędu, decydują o skuteczności wszystkich rozważanych algorytmów optymalizacji do rozwiązania problemu odwrotnego. Zarówno algorytmy stochastyczne jak i deterministyczne pozwalają uzyskać poprawne rezultaty, przy czym te drugie umożliwiają w łatwy sposób wprowadzać ograniczenia zakresu poszukiwań i w większości przypadków charakteryzują się krótszym czasem obliczeń.

IV.5 Procedura szacowania głębokości degradacji w oparciu o model Gibsona

W rozdziale przedstawiono propozycję algorytmu do określenia głębokości degradacji materiału z wykorzystaniem modelu Gibsona. Opracowany algorytm nazwano DDS (*Degradation Depth Search*). Jak pokazano w rozdziale II.1.4, w modelu Gibsona przyjmuje się ośrodek o ciągłej, liniowej zmianie modułu sztywności postaciowej z głębokością. W proponowanym algorytmie wykorzystano tę właściwość ograniczając jednakże zmiany sztywności do pewnej skończonej głębokości. Rozpatrując materiał zdegradowany od powierzchni przyjmuje się, że moduł sztywności postaciowej zmienia się liniowo z głębokością aż do granicy degradacji (jak pokazano na rysunku IV.6),

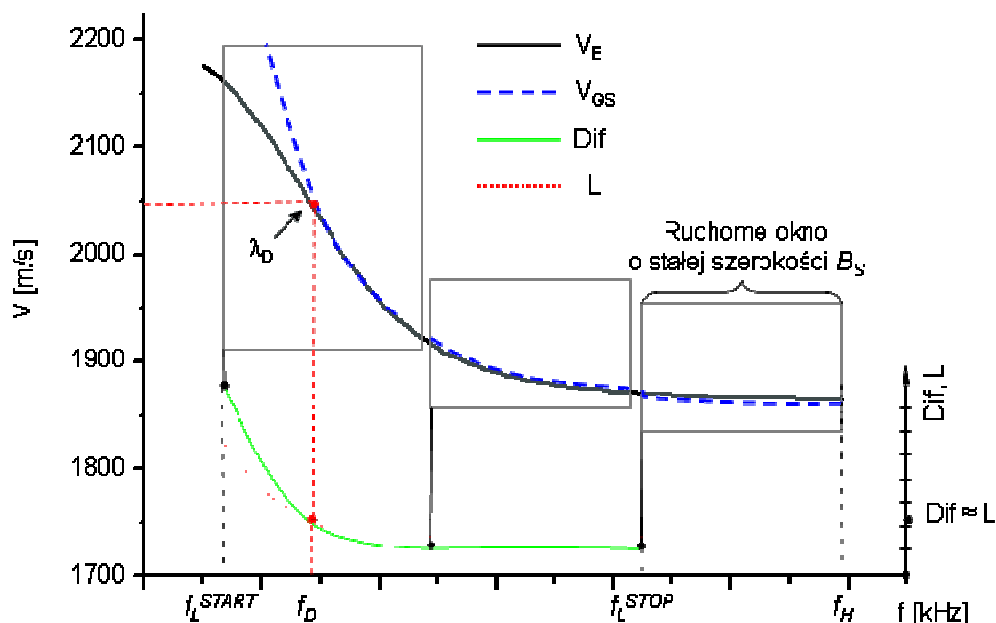
a następnie pozostaje stały w nie objętej degradacją „zdrowej” części materiału. Mając na uwadze fakt, że głębokość wnikania fali jest związana z jej długością rozważono hipotezę, iż w przyjętym układzie do pewnej długości fal ważny będzie model Gibsona, zaś powyżej tej długości będzie się pojawiała, a dalej rosła rozbieżność pomiędzy przewidywaniem modelu Gibsona, a prędkością fali w takim układzie.



Rysunek IV.6 Ilustracja układu o częściowo zdegradowanym materiale (G – moduł ścinania, z – głębokość).

IV.5.1 Koncepcja algorytmu

Zadaniem opracowanej procedury jest odszukanie największej głębokości, dla której zachodzi zgodność dyspersyjnej charakterystyki odpowiadającej rozważanemu układowi o częściowo zdegradowanym materiale z charakterystyką uzyskaną z modelu Gibsona. W tym celu wykorzystuje się fakt, że fala powierzchniowa wnika w przybliżeniu na głębokość równą jej długości. Przy znanej prędkości propagacji głębokość wnikania fali można powiązać z jej częstotliwością. A zatem im niższa częstotliwość tym większa głębokość wnikania fali. Ostatecznie, więc procedura DDS poszukuje takiej najniższej częstotliwości, dla której charakterystyki w częściowo zdegradowanym układzie i uzyskane z modelu Gibsona pozostają zgodne. Sytuację taką przedstawia rysunek II.12, na którym krzywej dyspersyjnej w częściowo zdegradowanym układzie (o rozkładzie liniowym modułu G) będzie odpowiadała charakterystyka uzyskana z modelu Haskell'a (strzałką zaznaczono najniższą częstotliwość, dla której charakterystyki są zgodne). Realizacja tak postawionego zadania wymaga wielokrotnego rozwiązania problemu odwrotnego z użyciem modelu Gibsona. W tym celu w programie DDS użyto aplikacji opisanej powyżej o nazwie InvGibLSQ.



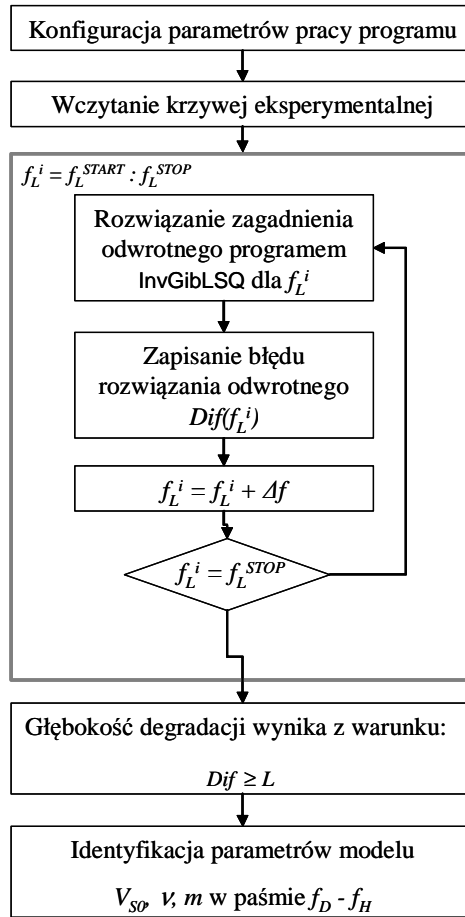
Rysunek IV.7 Graficzne przedstawienie działania programu DDS.

Po ustaleniu parametrów pracy programu i wczytaniu danych do identyfikacji V_E rozpoczyna się działanie pętli głównej, co zilustrowano na rysunku IV.7 oraz na schemacie blokowym (rys. IV.8), a przebiega ono następująco:

- w pierwszej iteracji ($i=1$) z charakterystyki eksperymentalnej V_E wycinany jest fragment (okno) V_{ES} o szerokości B_S i dolnej częstotliwości $f_L^i = f_L^{START}$ gdzie $V_{ES}(f_L^i) = V_E(f \in (f_L^i, f_L^i + B_S))$,
- dla wyciętego fragmentu V_{ES} rozwiązuje się zagadnienie odwrotne (krzywa V_{GS}), a uzyskany błąd dopasowania jest zapisywany do zmiennej $Dif(f_L^{START})$ wyrażonej zależnością

$$Dif(f_L^i) = \frac{|V_{ES}(f_L^i) - V_{GS}(f_L^i)|}{V_{ES}(f_L^i)} \quad (IV.3)$$

- w kolejnej iteracji okno jest przesuwane o krok Δf i proces identyfikacji przeprowadza się dla nowej pozycji okna. Uzyskany błąd jest zapisywany jako kolejny element wektora $Dif(f_L^i)$,
- proces powtarza się aż do przesunięcia okna do końca charakterystyki ($f_L^i = f_L^{STOP}$), wartości Dif są małe w zakresie częstotliwości, dla których model zgodny jest z charakterystyką eksperymentalną (wysokie częstotliwości) i rosną w obszarze gorszej zgodności (niskie częstotliwości),



Rysunek IV.8 Schemat blokowy działania programu DDS.

- na podstawie wektora Dif obliczany jest próg akceptacji L jako średnia z kilku (przyjęto 10) kolejnych wartości względem i -tej iteracji, gdzie a jest stałym współczynnikiem (krzywa L na rysunku IV.4) w postaci

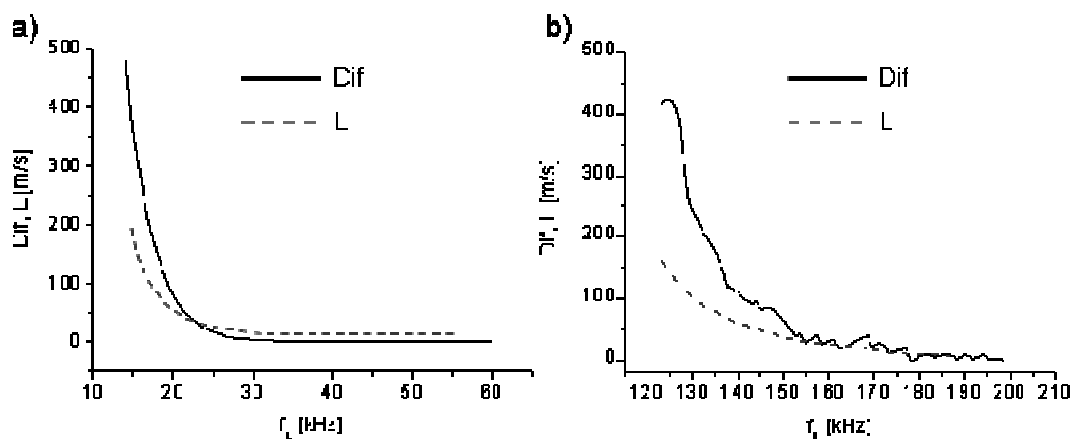
$$L(i) = \frac{a}{10} \cdot \sum_{k=i}^{i+10} Dif(f_L^k) \quad (IV.4)$$

- częstotliwość degradacji f_D jest pierwszą częstotliwością, dla której zajdzie nierówność $Dif < L$ świadcząca o tym, że model zaczyna odbiegać od charakterystyki V_E .
- dla częstotliwości f_D z krzywej V_E ustalana jest λ_D , a co za tym idzie także głębokość degradacji $d_{DEG} = \lambda_D$,
- w ostatnim kroku rozwiązuje się zagadnienie odwrotne w paśmie $(f_D - f_H)$ w celu jak najdokładniejszego ustalenia parametrów modelu (V_{SO}, ν, m) .

Współczynnik a w równaniu IV.4 sprawia, że w obszarze zgodności krzywych zachodzi zależność $L < Dif$. Doświadczalnie ustalono, iż najlepsze rezultaty działania programu uzyskuje się dla a z przedziału 1,5–3. Adaptacyjny charakter progu L pozwala

zmniejszyć wpływ przypadkowych wahań krzywej Dif w przypadku przetwarzania danych rzeczywistych obciążonych szumem i błędami pomiarowymi. Ponadto zaobserwowano, że najlepsze wyniki pracy programu otrzymuje się, gdy B_S stanowi około 20-40 % pasma V_E . Zachowanie stałego pasma B_S (stałej szerokości okna), zapewnia identyczne, pod względem ilości próbek, warunki rozwiązywania procedury optymalizacyjnej w każdej iteracji, dzięki czemu poszczególne wartości zmiennej Dif mogą być wzajemnie porównywane.

Przykład przebiegu krzywej Dif oraz proggu L dla danych syntetycznych pokazano na rysunku IV.9a, zaś dla danych rzeczywistych na rysunku IV.9b. W przypadku, gdy krzywa Dif przecina próg L w kilku miejscach jako wynik poszukiwań brane jest przecięcie dla najniższej częstotliwości. W przedstawionym przykładzie dla danych rzeczywistych będzie to wartość $f_D = 155kHz$. Odczytując wartość prędkości z charakterystyki $V_E(f_D)$ oblicza się długość fali i tym samym głębokość degradacji. Rezultaty działania programu na danych syntetycznych pokazano w kolejnym rozdziale.



Rysunek IV.9 Przykłady krzywych Dif i L dla danych: a) syntetycznych, b) eksperymentalnych.

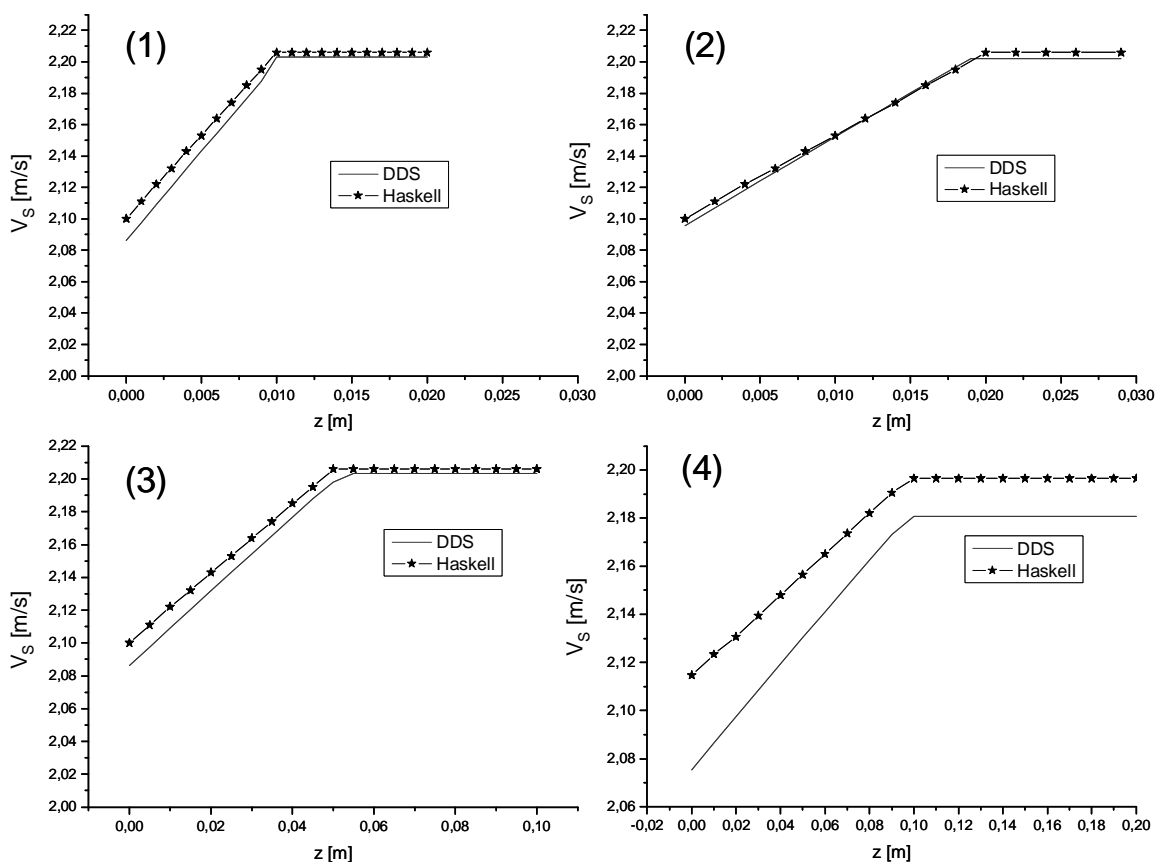
IV.5.2 Weryfikacja procedury dla danych syntetycznych.

Potwierdzeniem poprawności działania procedury DDS są otrzymane wyniki zawarte w tabeli IV-3. Porównano w niej rezultaty otrzymane za pomocą procedury DDS z danymi syntetycznymi. Źródłem danych syntetycznych były wyniki symulacji krzywej dyspersyjnej uzyskane dla 10-cio warstwowego modelu Haskella. Grubości wszystkich warstw były równe, a ich suma daje wypadkową głębokość degradacji. Parametry warstw zostały tak dobrane, aby spełniały założenie skokowo-liniowej zmiany modułu ścinania w funkcji głębokości. Pozostałe parametry modelu były identyczne dla czterech przedstawionych przypadków. Otrzymane rezultaty identyfikacji zamieszczono w tabeli

IV-3. Znając prędkość fali poprzecznej na powierzchni V_{S0} oraz współczynnik niejednorodności m można odtworzyć profil prędkości fali poprzecznej $V_S(z)$ w funkcji głębokości. Wartość d (głębokość degradacji) określa do jakiej głębokości zachodzi zmiana prędkości fali poprzecznej.

Tabela IV-3. Porównanie wyników uzyskanych za pomocą metody DDS z wartościami teoretycznymi.

Przypadek	Dane	Głębokość degradacji d [mm]	Prędkość fali poprzecznej na powierzchni V_{S0} [m/s]	Liczba Poissona ν	Współczynnik niejednorodności m
1	Syntetyczne	10	2100	0,30	10
	Identyfikacja	10,3	2076	0,35	10,4
2	Syntetyczne	20	2100	0,30	5
	Identyfikacja	19,32	2095	0,28	5,49
3	Syntetyczne	50	2100	0,30	2
	Identyfikacja	51,5	2086	0,31	2,22
4	Syntetyczne	100	2100	0,30	1
	Identyfikacja	96,66	2076	0,34	1,07



Rysunek IV.10 Profile prędkości fali poprzecznej uzyskane za pomocą metody DDS dla różnych głębokości degradacji zasymulowanych modelem Haskell.

Uzyskane dla poszczególnych przypadków zmiany prędkości fali poprzecznej w funkcji głębokości przedstawiono na rysunkach IV.10. Wyniki i dyskusje programu dla danych eksperymentalnych przedstawiono w rozdziale V.2.

IV.6 Program Chmura punktów

Rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego w celu odtworzenia struktury rzeczywistego ośrodka na podstawie zmierzonej dla niego charakterystyki dyspersyjnej obciążone jest niejednoznacznością. Jedną z przyczyn tej niejednoznaczności są niedokładności pomiarowe oraz lokalne niejednorodności materiału, co skutkuje rozrzutem eksperymentalnych krzywych dyspersyjnych. Źródłem niejednoznaczności identyfikacji jest także wykorzystywany model, który zwykle w uproszczony sposób opisuje badany materiał. Istotny może być także fakt, że przy większej liczbie parametrów możliwe są takie ich kombinacje, które różniąc się między sobą dadzą podobne dopasowanie danych eksperymentalnych i modelu. Oznacza to, że różne komplety parametrów modelu dają zbliżone charakterystyki dyspersji, a więc mogą mieć podobną wartość z punktu widzenia funkcji błędu. Podobny problem niejednoznaczności omawia się w piśmiennictwie z dziedziny sejsmiki [Socco i inni 2008, Orozco 2003].

Należy zauważyć, że przy wykorzystaniu do identyfikacji procedur optymalizacji lokalnej istnieje prawdopodobieństwo odnalezienia minimum lokalnego, często w pobliżu minimum globalnego. W celu ograniczenia problemu niejednoznaczności można stosować algorytmy globalne. Ich działanie jest jednak znacznie wolniejsze nie dając gwarancji, iż znalezione minimum jest minimum globalnym. Proponowanym sposobem postępowania jest przedstawianie wyników optymalizacji w postaci zbioru (chmury) rozwiązań. Opracowany algorytm można zaliczyć do grupy metod optymalizacji hybrydowej, gdyż wykorzystuje zarówno metodę stochastyczną jak i deterministyczną. Przykłady identyfikacji metodami hybrydowymi spotyka się również dla innych zagadnień np. w inżynierii lądowej do poszukiwania źródeł wody [Kumar i inni 2005]. W niniejszym rozdziale przedstawiono opis działania opracowanej procedury oraz pokazano jej testy z danymi syntetycznymi.

IV.6.1 Koncepcja algorytmu

Schemat blokowy działania procedury, którą nazwano chmura punktów przedstawiono na rysunku IV.11. Jest to rozwinięcie algorytmu rozwiązywania problemu odwrotnego z wykorzystaniem modelu Haskell'a i procedury optymalizacji lokalnej *LSQ* opisanych wcześniej. Działanie programu jest następujące:

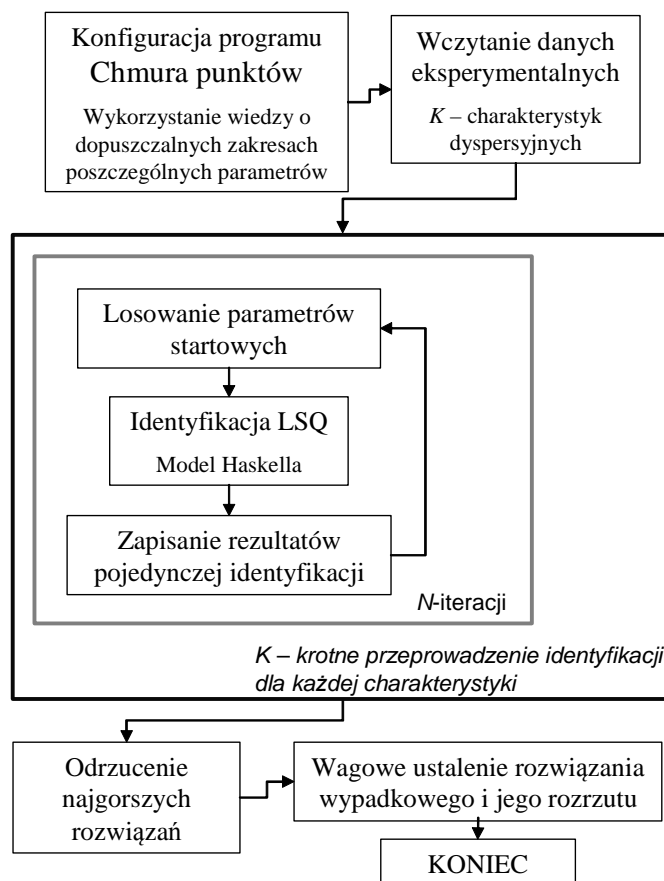
Krok I - ustalanie parametrów pracy programu, takich jak; liczba szukanych parametrów modelu (liczba niewiadomych – pozostałe parametry modelu muszą być precyzyjnie ustalone), warunki zakończenia pojedynczej iteracji oraz liczba powtórzeń identyfikacji, liczba wyselekcjonowanych wyników oraz granice doboru parametrów modelu. Konfiguracja początkowa ma zasadnicze znaczenie dla jakości i czasu działania procedury. Szczególnie dotyczy to liczby parametrów optymalizacji.

Krok II – wczytanie grupy krzywych eksperymentalnych. W wyniku stosowanego w pomiarach uśredniania przestrzennego dla każdego punktu pomiarowego otrzymuje się zbiór K eksperymentalnych charakterystyk dyspersyjnych. Szczegółowe informacje na ten temat można znaleźć w rozdziale III.1. Wykorzystanie zbioru charakterystyk zamiast jednej krzywej wypadkowej pozwala uwzględnić rozrzut krzywych pomiarowych w procesie identyfikacji.

Krok III – pierwsza iteracja pętli zewnętrznej polega na przeprowadzeniu N iteracji pętli wewnętrznej dla pierwszej charakterystyki ze zbioru K . Na początku każdej iteracji pętli wewnętrznej z przyjętego zakresu losowane są parametry startowe identyfikacji (losowanie Monte Carlo - podejście stochastyczne) poczym następuje identyfikacja programem *InvHaskLSQ* opisanym w rozdziale IV.3 (*LSQ* - podejście deterministyczne). Otrzymane rezultaty zapisuje się w tablicy rozwiązań. Pętla wewnętrzna powtarzana jest N -krotnie, co daje N kompletów szukanych parametrów z przypisanym do każdego kompletu błędem identyfikacji.

Krok IV – wykonanie pętli zewnętrznej dla wszystkich K charakterystyk. W ten sposób uzyskuje się $K \cdot N$ kompletów parametrów identyfikacji wraz z odpowiadającymi im błędami.

Krok V – pozostawienie najlepszych rozwiązań. Na tym etapie odrzuca się określoną liczbę najgorszych rozwiązań. O odrzuceniu lub akceptacji rozwiązania decyduje odpowiadający rozwiązaniu błąd dopasowania. Należy podkreślić, że kryterium decydujące o odrzuceniu danego rozwiązania można zdefiniować na kilka sposobów np: odrzuceniu podlegać będzie określona liczba najmniej zbieżnych rozwiązań lub odrzucane są wszystkie te rozwiązania, których błąd dopasowania przekracza założony przez użytkownika poziom. Można także tak skonfigurować algorytm, aby działał do momentu uzyskania określonej liczby wyników poniżej założonego progu błędu. To ostatnie rozwiązanie daje najlepsze rezultaty ale trudno przewidzieć jak długo potrwa identyfikacja.



Rysunek IV.11 Schemat blokowy procedury Chmura punktów.

Krok VI – ustalenie średniej wartości parametrów i ich rozrzutu spośród pozostawionych rezultatów. Błąd każdej identyfikacji stanowi wagę przy ustalaniu wyniku wypadkowego. Im większy jest błąd tym mniejszy jest wpływ danego rozwiązania na uśredniony wynik końcowy. W programie Chmura punktów wprowadzono algorytm, który ustala wypadkowy profil prędkości w postaci średniej ważonej parametrów \bar{p} zgodnie z równaniem

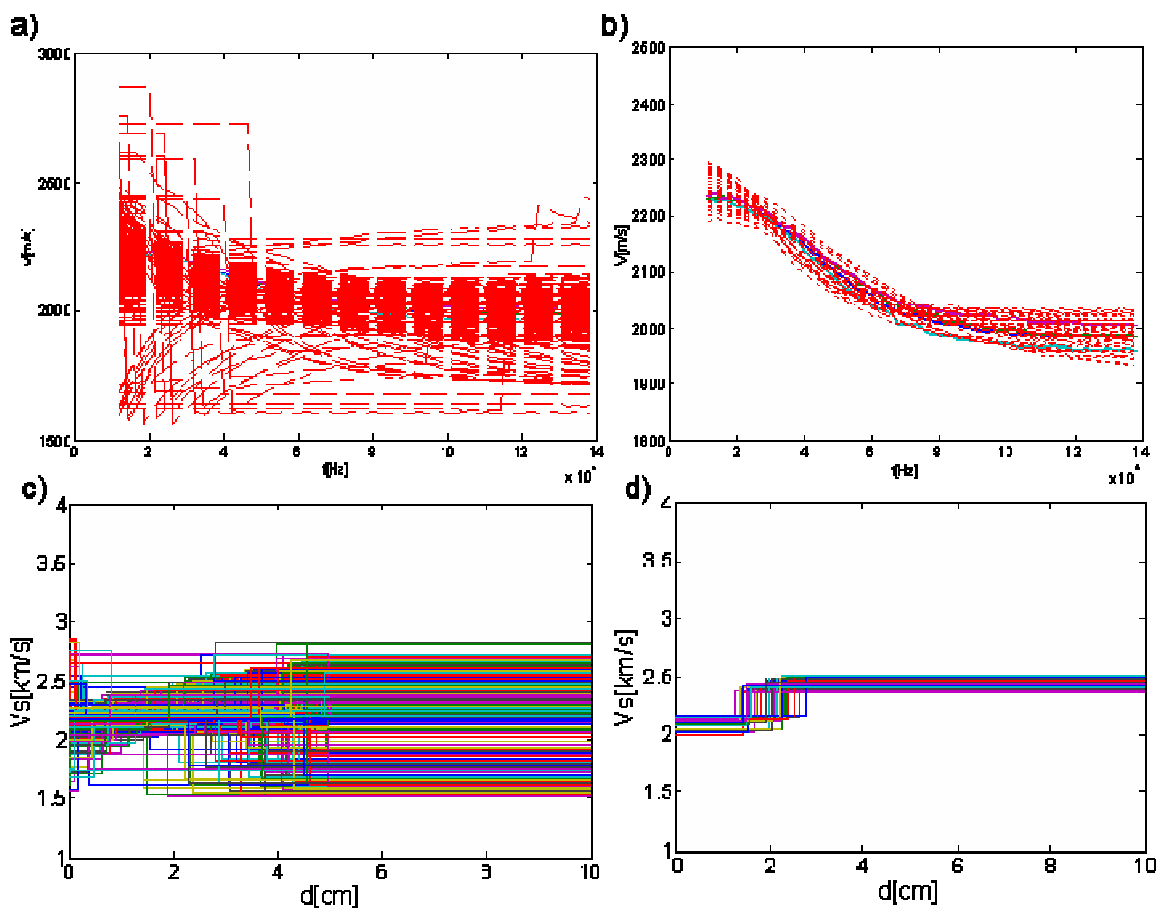
$$\bar{p} = \sum_{i=1}^n (p_i g_i) \text{ gdzie } g_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{b_i}}, \quad (\text{IV.5})$$

w którym wagami g_i są znormalizowane błędy identyfikacji zaś b_i oznacza błąd dopasowania dla i -tej iteracji. Wykresy obrazujące działanie programu pokazano w rozdziale następnym (rys. IV.12). Przedstawiona struktura algorytmu pozwala uwzględnić rozrzut krzywych eksperymentalnych w procesie identyfikacji parametrycznej poprzez korzystanie ze wszystkich krzywych pomiarowych, a nie jedynie z charakterystyki

uśrednionej. Losowy dobór parametrów startowych zmniejsza ryzyko zakończenia optymalizacji w minimum lokalnym. Wybór tylko najlepszych rozwiązań oraz uwzględnianie ich wag podnosi dokładność i jednoznaczność ostatecznego wyniku.

IV.6.2 Weryfikacja programu dla danych syntetycznych.

Poniżej przedstawiono przykładowe rezultaty działania programu Chmura punktów dla testowego zbioru krzywych syntetycznych. Zbiór testowy składał się z pięciu charakterystyk teoretycznych wygenerowanych dla różnych (choć zbliżonych) parametrów (szczegóły w tabeli IV-4). Sztucznie narzucony rozrzut krzywych miał na celu jak najwierniejsze oddanie przypadku rzeczywistego, w którym zmierzone charakterystyki także podlegają pewnemu rozrzutowi. Procedura wykonała 300 identyfikacji w czasie 60 minut⁴. Wszystkie dopasowania charakterystyk dyspersyjnych pokazano na rysunku IV.12a. Uwzględniając błędy poszczególnych identyfikacji wybieranych jest 50 najlepszych rozwiązań, które pokazano na rysunku IV.12b.



Rysunek IV.12 Wyniki działania programu Chmura punktów dla danych syntetycznych przy poszukiwaniu trzech parametrów, a) charakterystyki dyspersyjne dla 300 iteracji, b) wybranych 50 najlepszych identyfikacji, c) profile $V_S(z)$ dla 300 identyfikacji, d) profile $V_S(z)$ dla najlepszych 50 identyfikacji.

⁴ Wszystkie obliczenia w pracy wykonywano na tym samym komputerze klasy AMD Turion(tm).64 X2 1,60GHz oraz 2GB pamięci operacyjnej

Trzy poszukiwane parametry modelu dla wszystkich 300 identyfikacji pokazano w postaci profili prędkości propagacji fal poprzecznych V_S w funkcji głębokości na rysunku IV.12c. Rysunek IV.12d obrazuje profile dla wybranych najlepszych rozwiązań, z których następnie wyliczono ważone średnie szukanych parametrów zgodnie z równaniem IV.5. Pojedynczy skok prędkości V_S w pokazanych profilach wynika z faktu zastosowania modelu dwuwarstwowego. Najważniejsze parametry przeprowadzonej identyfikacji zamieszczono w tabeli IV-4. W części tabeli Dane syntetyczne zamieszczono parametry modelu, dla których wygenerowano krzywe syntetyczne oraz wartości odchylenia standardowego σ tych parametrów (parametry zmieniano przy generowaniu zestawu krzywych testowych). Parametry drugiej warstwy dla wszystkich krzywych testowych były jednakowe. W części tabeli „Identyfikacja” czcionką pogrubioną zaznaczono wartości średnie ustalonych parametrów struktury wraz z ich odchyleniem standardowym. Rozbieżności pomiędzy wartościami modelowymi i wynikami identyfikacji zamieszczono w części tabeli „Różnice”. Uzyskane rozbieżności są mniejsze niż odchylenie standardowe dla poszczególnych parametrów, co stanowi potwierdzenie poprawności działania opracowanego programu.

Tabela IV-4. Parametry i rezultaty identyfikacji przy poszukiwaniu 3-ech parametrów programem Chmura punktów.

Warstwa	Dane syntetyczne			Identyfikacja				Różnice [%]	
	1	σ [%]	2	1	σ [%]	2	σ [%]	1	2
Prędkość podłużna [m/s]	4280	1,3	4600	4300	-	4600	-	-	-
Prędkość poprzeczna [m/s]	2105	2,3	2425	2115	2,0	2442	1,7	0,5	0,7
Grubość [cm]	1,91	3,7	-	1,90	20,5	-	-	0,5	-
Gęstość [kg/m ³]	1900	-	2200	1900	-	2200	-	-	-

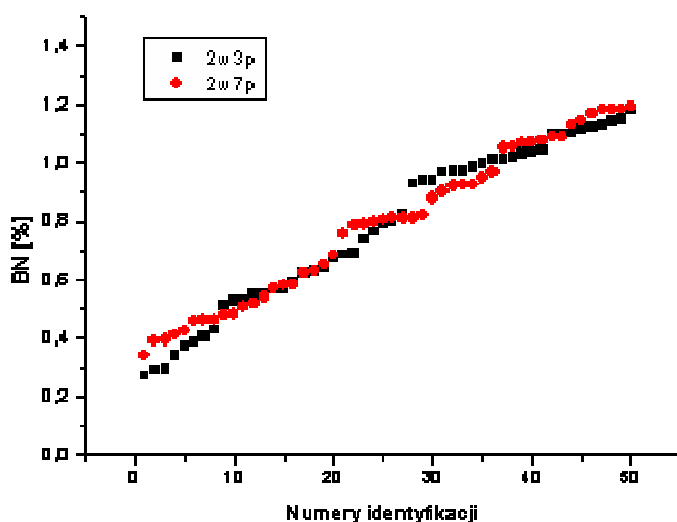
Mniejsza wartość odchylenia standardowego w procesie identyfikacji od odchylenia wynikającego z rozrzutu krzywych syntetycznych może wynikać z faktu, że program znalazł więcej dokładnych rozwiązań dla krzywych bliższych średniej krzywej syntetycznej.

Podobna weryfikację przeprowadzono dla bardziej złożonego modelu, w którym przyjęto wszystkie siedem parametrów jako szukane zmienne optymalizacji. Próbę przeprowadzono na tym samym zestawie krzywych testowych co poprzednio przy identycznych ustawieniach parametrów pracy programu (identyczne warunki zakończenia, liczba iteracji itp.). Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli IV-5.

Tabela IV-5. Parametry i rezultaty identyfikacji przy poszukiwaniu 7-miu parametrów programem Chmura punktów.

Warstwa	Dane syntetyczne			Identyfikacja				Różnice [%]	
	1	σ [%]	2	1	σ [%]	2	σ [%]	1	2
Prędkość podłużna [m/s]	4280	1,3	4600	4153	10,4	4300	9,5	3,0	6,5
Prędkość poprzeczna [m/s]	2105	2,3	2425	2120	2,4	2467	4,4	0,7	1,7
Grubość [cm]	1,91	3,7	-	1,85	23,8	-	-	3,1	-
Gęstość [kg/m ³]	1900	-	2200	2098	7,8	2088	6,6	10,4	5,1

Program Chmura punktów tym razem potrzebował 110 minut na rozwiązanie postawionego zadania, czyli prawie dwa razy dłużej niż poprzednio. Największe różnice dopasowania towarzyszyły wartościom gęstości oraz prędkości propagacji fal podłużnych, co potwierdza wnioski przedstawione w rozdziale II.1.5. W przypadku pozostałych zmiennych identyfikacji tj. prędkości propagacji fal poprzecznych oraz grubości otrzymane rezultaty są bardzo zbliżone do wyników otrzymanych przy identyfikacji modelem trójparametrowym, a tym samym są zbliżone do wartości teoretycznych (parametrów dla krzywych syntetycznych).

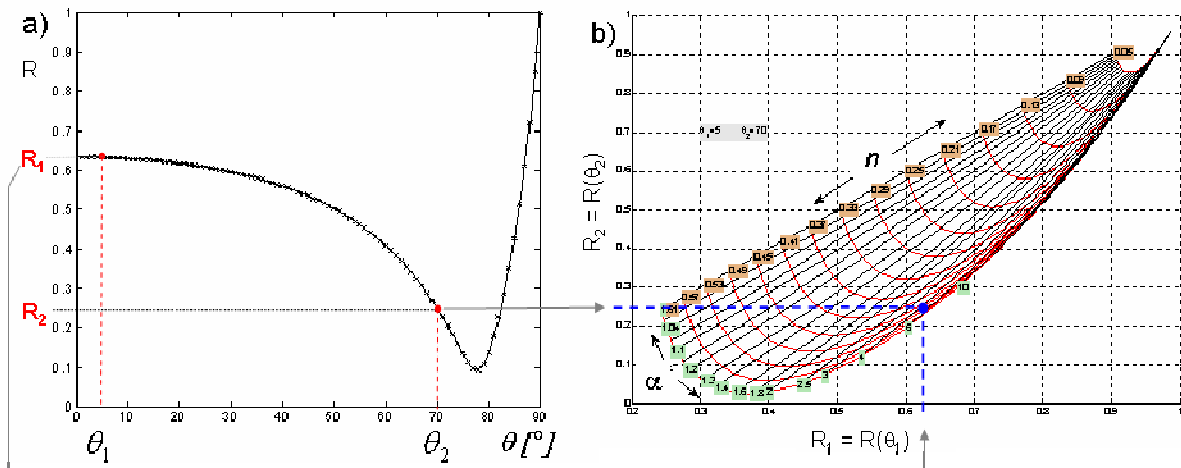


Rysunek IV.13 Wartości znormalizowanego błędu dopasowania BN dla najlepszych wybranych wyników (2w3p – szukane 3 parametry, 2w7p – szukanych 7 parametrów).

Na rysunku IV.13 zestawiono znormalizowane błędy identyfikacji BN (równanie IV.2) dla obu analizowanych przypadków ($2w3p - 3$ niewiadome, $2w7p - 7$ niewiadomych). Zestawione dane pokazują, że uzyskiwane błędy są dość zbliżone w obu konfiguracjach (najmniejszy uzyskany błąd wynosi odpowiednio $0,27\%$ dla $2w3p$ i $0,34\%$ dla $2w7p$, zaś błędy średnie dla wyselekcjonowanych rozwiązań są identyczne i wynoszą $0,83\%$). Na podstawie analizy błędów można wnioskować, że w przypadku krzywych syntetycznych dodanie niewiadomych w mniejszym stopniu wpływa na dokładność identyfikacji, ale istotnie wydłuża czas pracy programu.

IV.7 Identyfikacja parametrów struktury na podstawie charakterystyki współczynnika odbicia

Rozwiązywanie uproszczonego dwuparametrowego modelu zjawiska odbicia fal od materiału porowatego można przeprowadzić na drodze obliczeń analitycznych. Korzystając z zależności II.75 i II.76 można zbudować nomogram (rys. IV.14b), z pomocą którego mając wyznaczone dla dwóch wybranych kątów θ_1 i θ_2 współczynniki odbicia R_1 i R_2 (rys. IV.14a). Nanosząc wartości R_1 i R_2 na nomogram można odczytać odpowiadające im porowatość n i krętość α .



Rysunek IV.14 Ustalanie porowatości i krętości na podstawie charakterystyki R (rys. a) i nomogramu (rys. b).

Rozwiązanie modelu z trzema i więcej parametrami wymaga zastosowania procedur identyfikacji. Niemniej jednak jest to zagadnienie znacznie prostsze aniżeli identyfikacja z użyciem modelu Haskella, ponieważ istnieje analityczne rozwiązanie

modelu wprost. Uwzględniając błędy danych eksperymentalnych zastosowanie identyfikacji za pomocą procedur optymalizacji pozwala zwiększyć wiarygodność rozwiązania, ponieważ w obliczeniach bierze udział cała charakterystyka, a nie jedynie dwa wybrane punkty jak w przypadku modelu dwuparametrowego.

IV.7.1 Koncepcja algorytmu

W opracowanym algorytmie wykorzystano model pozwalający generować teoretyczne charakterystyki współczynnika odbicia opisany w rozdziale II.2.1, w którym szukanymi były parametry struktury materiału tj. porowatość n , przepuszczalność k_0 oraz krętość α . Uwzględnienie przepuszczalności we wcześniej opisanym modelu współczynnika odbicia w funkcji kąta $R(\theta)$ wymaga zapisania go w postaci

$$R = \left| \frac{\bar{\gamma} \cdot K_0 \cdot l_2 - n \cdot \gamma \cdot \omega^2 \cdot \rho}{\bar{\gamma} \cdot K_0 \cdot l_2 + n \cdot \gamma \cdot \omega^2 \cdot \rho} \right| \quad (IV.6)$$

gdzie

$$\bar{\gamma} = \omega \sqrt{\left(\frac{\rho}{K_0} \right) \cdot (1 - \sin^2(\theta))} \quad (IV.7)$$

$$\gamma = \omega \sqrt{\left(\frac{\rho}{K_0} \right) \cdot \left(\alpha - \sin^2(\theta) + \frac{i \cdot \eta \cdot n}{\rho \cdot k_0 \cdot \omega} \right)} \quad (IV.8)$$

$$l_2 = \left(\frac{\omega \cdot \rho}{K_0} \right) \cdot \left(\alpha + \frac{i \cdot \eta \cdot n}{\rho \cdot k_0 \cdot \omega} \right) \quad (IV.9)$$

gdzie: K_0 oznacza moduł ściśliwości objętościowej powietrza (Bulk modulus) , ρ stanowi gęstość powietrza, η oznacza lepkość powietrza, zaś ω to częstość kołowa fali padającej. W modelu przyjmuje się, że pory struktury są całkowicie otwarte, a zatem powierzchniowa impedancja przepływu $T = 0$. Funkcję celu C , której minimum poszukuje algorytm identyfikacji można zapisać

$$C(n, k_0, \alpha) = \sum_{\theta_{MIN}}^{\theta_{MAX}} |R_E(\theta) - R_T(\theta, n, k_0, \alpha)| \quad (IV.10)$$

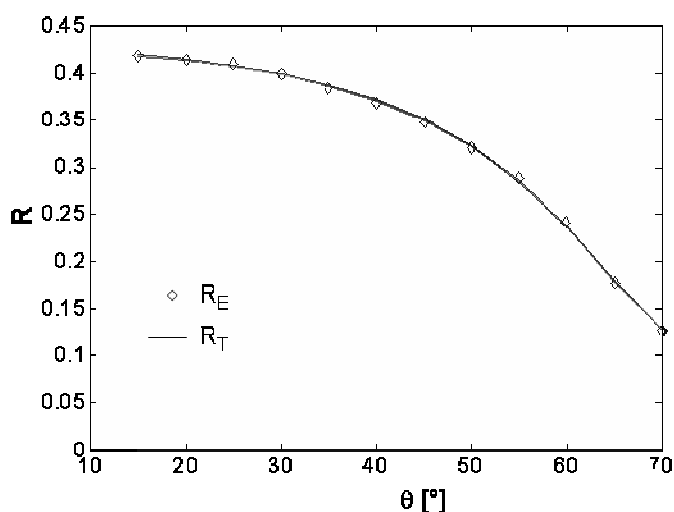
gdzie odpowiednio R_E to charakterystyka eksperymentalna, a R_T teoretyczna.

Do rozwiązywania zagadnienia odwrotnego użyto metody SIMPLEX (rozdział IV.1), która daje dobre wyniki przy poszukiwaniu do trzech parametrów. Wierzchołkami Simplexa są szukane trzy parametry. W programie wykorzystano również podejście typu Chmura punktów, czyli wielokrotne rozwiązywanie zadania identyfikacji dla różnych

punktów startowych. Pozwala to zmniejszyć niejednoznaczność rozwiązań w przypadku niższych porowatości, dla których model wykazuje niższą wrażliwość. Jako kryterium zakończenia poszukiwań przyjęto osiągnięcie zakładanej liczby rozwiązań o błędzie dopasowania poniżej określonego progu. Tak przyjęte kryterium wydłuża pracę procedury identyfikacyjnej, niemniej jednak szybkie działanie modelu wprost pozwala na realizację obliczeń w dość krótkim czasie nie przekraczającym kilku minut. Po wykonaniu określonej liczby akceptowalnych iteracji obliczana jest średnia ważona oraz odchylenie standardowe dla poszukiwanych parametrów modelu.

IV.7.2 Weryfikacja procedury dla danych syntetycznych.

Weryfikację procedury identyfikacji strukturalnych parametrów materiałowych na podstawie charakterystyki współczynnika odbicia przeprowadzono dla czterech charakterystyk syntetycznych.



Rysunek IV.15 Przykładowy rezultat identyfikacji na podstawie charakterystyki współczynnika odbicia i modelu trójparametrowego (R_E - dane eksperymentalne, R_T - 20 najlepszych rozwiązań).

Parametry modelu przy generowaniu danych teoretycznych zostały tak dobrane, aby pokrywać jak najszerszy zakres parametrów spotykanych w materiałach porowatych dla budownictwa. Graficzny przykład odtworzenia charakterystyki współczynnika odbicia dla materiału o wysokiej porowatości pokazano na rysunku IV.15. Teoretyczne parametry materiałowe oraz uzyskane wartości na drodze identyfikacji dla modelu trójparametrowego wraz z ich odchyleniami standardowymi i różnicami względem danych syntetycznych zamieszczono w tabeli IV-6. W tabeli zamieszczona także wyniki estymacji przy wykorzystaniu modelu dwuparametrowego, gdzie zmiennymi są porowatość

i krętość. Model ten opisuje mniej efektów fizycznych (zawiera więcej uproszczeń) ale daje jednoznaczne rozwiązania bez względu na wielkość poszczególnych parametrów.

Tabela IV-6. Wyniki identyfikacji parametrów materiałowych na podstawie syntetycznych charakterystyk współczynnika odbicia dla modelu dwu oraz trzyparametrowego.

Porowatość	Parametr modelu	Dane syntetyczne	Identyfikacja modelem dwuparametrowym		Identyfikacja modelem trzyparametrowym		
		Wartość	Wartość	Różnice [%]	Wartość	Odchylenie standardowe [%]	Różnice [%]
Niska	Porowatość [%]	20	20	0	51,7	172	159
	Krętość	5	5	0,01	5,13	97	2,6
	Przepuszczalność (wykładnik)	-16	-	-	-16,36	2,7	2,3
Średnia	Porowatość [%]	30	30	0	38,8	30	29
	Krętość	1,6	1,6	0	3,63	134	127
	Przepuszczalność (wykładnik)	-12	-	-	-12,10	0,8	0,8
Średnia	Porowatość [%]	50	50	0	50	0,6	0,02
	Krętość	2	2	0	2	2	0,5
	Przepuszczalność (wykładnik)	-11	-	-	-11	0,09	<0,01
Wysoka	Porowatość [%]	80	80	0	80	<10e-4	<10e-4
	Krętość	1,1	1,1	0	1,1	0,09	0,09
	Przepuszczalność (wykładnik)	-9	-	-	-9	0,01	0,01

W przypadku modelu trzyparametrowego zgodnie z obserwacjami zamieszczonymi w rozdziale II.2.2 można zauważyć, że najlepsze dopasowania uzyskano dla średniej i wysokiej porowatości. Charakteryzuje się ono również małym odchyleniem standardowym. W przypadku niskiej porowatości poprawnie zidentyfikowana (małe odchylenie standardowe) została jedynie przepuszczalność. Rezultaty średnie otrzymane dla krętości i porowatości nie odbiegają istotnie od wartości teoretycznej niemniej jednak charakteryzują się one bardzo dużym odchyleniem standardowym.

IV.8 Wnioski

W powyższym rozdziale przedstawiono zagadnienia obejmujące opracowanie procedur estymacji parametrów ośrodka na podstawie danych eksperymentalnych. W tym celu niezbędne było powiązanie modeli teoretycznych z algorytmami optymalizacji. Pokazana analiza dotyczyła między innymi wyboru metody optymalizacji do rozwiązywania wybranych zagadnień. Z porównania czasu obliczeń wynika, że dla

rozpatrywanego problemu modelowania propagacji fal powierzchniowych uzyskanie jednego rozwiązania przy użyciu algorytmu SA zabiera tyle czasu co 60-cio krotne rozwiązanie procedurą LSQ. Wydaj się więc korzystniejszym stosowanie metod optymalizacji lokalnej uruchamianej wielokrotnie, aniżeli jednokrotne rozwiązanie z użycie algorytmu o działaniu globalnym, gdyż nie daje ono większej wiarygodności odnalezienia poprawnego rozwiązania. Przeprowadzone próby pokazują także, że wzrost liczby szukanych zmiennych modelu zwiększa niejednoznaczność rozwiązania oraz znacząco wydłużą czas obliczeń. Stanowi to argument do podejmowania wysiłku celem redukcji ilości niewiadomych poszukiwanych na drodze odwracania.

W rozdziale zaprezentowano autorską procedurę obliczania głębokości degradacji bazującą na modelu Gibsona, nazwany w skrócie DDS. Przeprowadzona weryfikacja dla danych syntetycznych dała bardzo obiecujące wyniki zarówno jeśli chodzi o ustalanie samej głębokości degradacji jak i parametrów rozpatrywanego ośrodka.

Drugim autorski programem, którego zasadę działania oraz weryfikację zaprezentowano w tym rozdziale jest program Chmura punktów służący do estymacji parametrów ośrodka z wykorzystaniem modelu Haskella. Przeprowadzone testy pokazały bardzo dobrą zgodność parametrów otrzymanych w procesie identyfikacji z parametrami, dla których wygenerowane zostały charakterystyki testowe. Jest to pierwsze potwierdzenie poprawności stworzonego oprogramowania. Praca z programem pokazała, że w dalszej perspektywie rozwoju programu Chmura punktów należałoby raczej przyjmować jako kryterium zakończenia procesu identyfikacji określoną liczbę rozwiązań charakteryzujących się odpowiednio małym błędem. Niewątpliwą przewagą programu Chmura punktów nad podejściem prostej identyfikacji jest dużo mniejsze ryzyko zakończenia działania w niewłaściwym (lokalnym) minimum oraz możliwość oszacowania dokładności identyfikacji na podstawie otrzymywanych rozrzutów szukanych parametrów.

W drugiej części rozdziału zaprezentowano działanie i weryfikację opracowanego oprogramowania opracowanego do estymacji parametrów struktury ośrodka na podstawie charakterystyki współczynnika odbicia. Działanie programu wykazało, iż najlepsze rezultaty w przypadku danych syntetycznych otrzymuje się dla średnich i wysokich porowatości przez co użyteczność tego podejścia w diagnostyce nieniszczącej ogranicza się do betonów już zdegradowanych oraz innych materiałów budowlanych charakteryzujących się wyższą porowatością jak na przykład gazobeton.

Rozdział V

Wyniki i dyskusja

Efektom realizacji prezentowanej pracy są systemy pomiarowe (SWMD oraz RMD) umożliwiające ustalenie ważnych z punktu widzenia diagnostyki parametrów materiałowych w sposób nieniszczący i bezkontaktowy. W poprzednich rozdziałach zaprezentowano budowę i działanie opracowanych urządzeń pomiarowych oraz przedstawiono funkcje i testy opracowanego oprogramowania do identyfikacji. W poniższym rozdziale przedstawiono wykorzystanie SWMD i RMD dla wybranych materiałów. Pomiary wykonano dla materiałów testowych (próbki laboratoryjne) o dobrze znanych właściwościach, a także na rzeczywistych obiektach (pomiar w terenie). Zebrane dane wykorzystano między innymi do identyfikacji właściwości badanych materiałów za pomocą opracowanych w pracy algorytmów. W pierwszej kolejności pokazano wyniki pomiarów niewymagające stosowania procedur identyfikacji. Przedstawione przykłady identyfikacji pozwalają dokonać oceny działania stosowanych procedur dla materiałów rzeczywistych. Jako główne kryterium oceny przyjęto dokładność identyfikacji, czyli zbieżność z rezultatami referencyjnymi uzyskanymi z innych metod, w tym także na drodze pomiarów niszczących.

V.1 Opis badanych materiałów

Poniżej przedstawiono szczegółowy opis materiałów użytych do wykonania pomiarów. W niektórych przypadkach dokonano identyfikacji parametrów materiałów niejednorodnych z wykorzystaniem opracowanego oprogramowania.

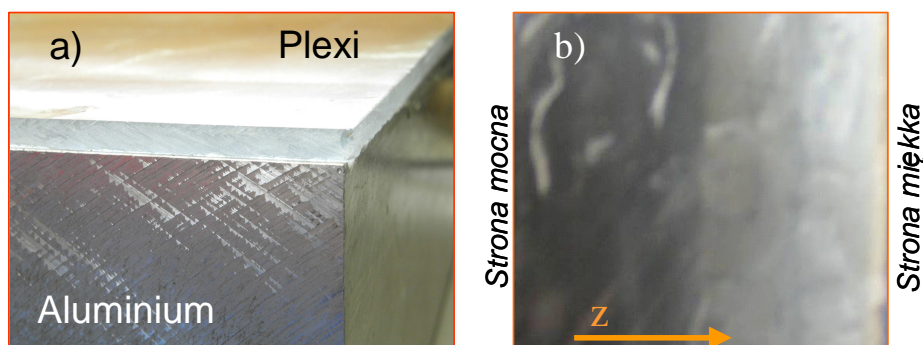
Próbka Plexi-Alu

Dla kompleksowej oceny systemu pomiarowego przygotowano próbkę składającą się z bloku aluminium, do którego przyklejona została płyta plexi. Taka konfiguracja pozwala symulować układ wielowarstwowy typu zdegradowany beton składający się ze „słabej warstwy” (plexi) o grubości $5,5\text{ mm}$ i „mocnej warstwy” (aluminium) o grubości 100 mm . Jako kleju użyto żywicy epoksydowej. Grubość warstwy kleju wynosiła około $0,05\text{ mm}$ i ocenia się, że nie wprowadza ona zauważalnej zmiany charakterystyki

dyspersyjnej. Wybrane własności materiałów, z których wykonano próbkę zamieszczono w tabeli V-1, a na rysunku V.1a przedstawiono wygląd próbki Plexi-Alu.

Tabela V-1. Wybrane własności materiałów użytych do wykonania próbki Plexi-Alu.

Materiał	ρ [kg/m ³]	V_P [m/s]	V_S [m/s]	V_R [m/s]	d [mm]
Aluminium ⁵	2800	6420	3104	2910	100
Plexi ⁶	1180	2450	1320	-	5,5
Żywica epoksydowa ⁷	1158	2500	1112	-	~0,05



Rysunek V.1 Badane materiały (fotografie): a) próbka Plexi-Alu, b) zaprawa cementowa (strzałka w kierunku rosnącej z głębokością porowatości).

Zaprawa cementowa o zmiennej porowatości

Elementem testowym o względnie dobrze określonej strukturze jest belka o wymiarach 50x20x7,4 cm wykonana z zaprawy cementowej o zmieniającej się porowatości w funkcji głębokości z (rys. V.1b). W celu uzyskania informacji o gęstości, porowatości, oraz prędkości w funkcji głębokości z badanej belki wycięto próbkę cylindryczną o średnicy 36,5 mm. Następnie tą próbkę pocięto na krążki o grubości ~16 mm. Każdy z krążków, z pewnym przybliżeniem, reprezentuje materiał z głębokości, z której został pobrany. Biorąc pod uwagę, że tarcza użyta do cięcia miała grubość 2.5 mm można założyć, że z kolejnych krążków wyznacza się parametry z głębokości 8 mm, 27 mm, 45.5 mm i 64 mm. Dla każdego krążka wykonano pomiar prędkości fali podłużnej i poprzecznej metodą echa z użyciem przetworników o częstotliwości środkowej 0,5 MHz. Na pobranych próbkach wykonano także pomiary gęstości i porowatości. Zmierzone parametry zamieszczono w tabeli V-2.

⁵ Pomiary prędkości podłużnej i poprzecznej zostały wykonane w laboratorium na tej samej próbce co pomiar fali powierzchniowej, metodą przejścia, błąd pomiaru ~0,1%

⁶ Pomiary prędkości podłużnej i poprzecznej zostały wykonane w laboratorium na tej samej próbce co pomiar fali powierzchniowej, metodą echa, błąd pomiaru ~0,1%

⁷ Dane z artykułu. [Wu T., Liu Y. 1999]

Tabela V-2. Parametry zaprawy cementowej o zmiennej porowatości.

Parametr \ Próbką	1	2	3	4
Wysokość [mm]	16,5	16,0	16,1	16,1
V_P [m/s]	4459	4414	2875	2198
V_S [m/s]	2463	2270	1464	1073
v	0,280	0,320	0,335	0,344
Masa [g] Próbka nasycona wodą	39,95	35,94	30,17	25,51
Masa [g] Próbka sucha	36,62	31,73	21,76	14,43
Masa [g] Próbka w zanurzeniu	22,54	19,17	13,18	8,62
Objętość [cm ³] ⁸	17,41	16,77	16,99	16,89
Gęstość [g/cm ³] ⁹	2,295	2,143	1,775	1,510
Porowatość [%]	19,1	25,1	49,6	66

Belki betonowe przygotowane w projekcie SENSO

Znaczna część badań eksperymentalnych prezentowanej pracy była realizowana w ramach projektu o nazwie SENSO¹⁰ („Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton„ – Strategia badań nieniszczących w ochronie konstrukcji betonowych) finansowanego przez rząd francuski (1996-1999). Jednym z etapów projektu były badania przygotowanych w warunkach laboratoryjnych belek betonowych. Parametry próbek zostały tak dobrane, aby pokryć szeroki zakres rodzajów betonu stosowanych w budownictwie. Próbki przygotowano w 9-ciu grupach odpowiadających różnym rodzajom betonu. Wszystkie grupy liczyły po 11 identycznych próbek, co w sumie daje zbiór 99 próbek betonowych. Próbki starano się wykonać jako jednorodne, bez zbrojenia. W ramach jednej grupy próbki były wylewane jednocześnie i miały takie same wymiary 12x25x50 cm. Charakterystykę materiałów poszczególnych grup zamieszczono w tabeli V-3.

W projekcie SENSO brało udział kilka ekip z różnych laboratoriów w celu dokonania badań tych samych próbek różnymi metodami. Pomiary wykonane były przy

⁸ wynika z masy wypartej wody - przy pomiarze w zanurzeniu

⁹ wyliczona z masy wypartej wody

¹⁰ <http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/SENSO/accueilSENSO.htm>

pomocy metod; elektrooporowych [Lataste i inni 2009], pojemnościowych, radarowych [Dérobert i inni 2009], podczerwieni oraz akustycznych (ultradźwiękowych). W ramach metod akustycznych stosowano między innymi; pomiary prędkości propagacji metodą impakt-echo, metodą przejścia, metodą fali powierzchniowej [Abraham i inni 2009, Piwakowski i inni 2009] Pomiary tłumienia realizowano metodą wstecznego rozpraszania [Garnier i inni 2009] oraz na podstawie propagacji fal powierzchniowych. Dane pomiarowe uzyskiwane z poszczególnych metod były następnie archiwizowane w funkcji parametrów betonu zmierzonych metodami niszczącymi.

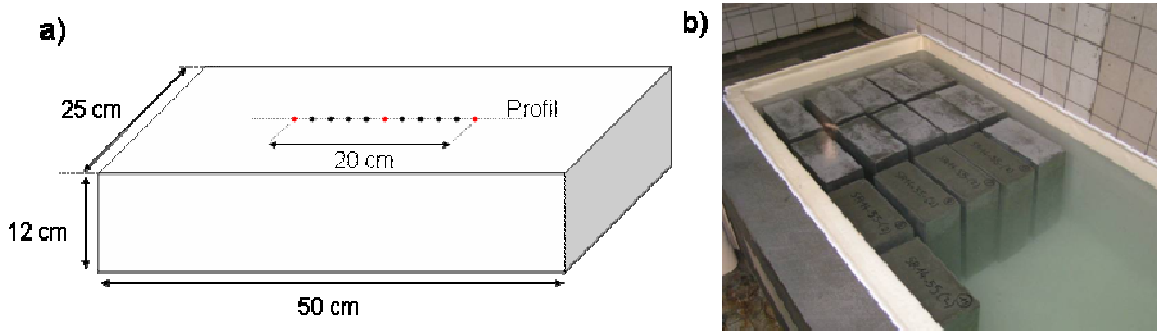
Tabela V-3. Charakterystyka grup próbek betonowych.

Nazwa grupy	G1	G2	G3	G3a	G4	G5	G6	G7	G8
Stosunek woda/cement	0,31	0,47	0,57	0,59	0,57	0,57	0,58	0,63	0,90
Typ kruszywa	Kwarcowe otoczkowe					Kwarcowe łamane	Wapienne łamane	Kwarcowe otoczkowe	
Rozmiar kruszywa [mm]	0-14	0-14	0-14	0-14	0-20	0-14	0-14	0-14	0-14
Porowatość [%]	12,5	14,3	15,5		14,2	15,2	14,9	16,9	18,1
Moduł Younga [GPa]	35,8	30,9	29,5		30,8	33,3	39,4	29,2	22,9
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	77,2	55,6	45,8		46,8	53,3	44,5	44,3	27,5

Ostatnim etapem programu SENSO była fuzja danych [Ploix i inni 2009], w której dokonywano korelacji zebranych wyników pomiarowych pod kątem oceny takich parametrów betonu jak moduł Younga, wytrzymałość na ściskanie, porowatość i zawartość wody. Szczegółowe informacje na temat projektu SENSO można znaleźć w licznych publikacjach [NDTC'09 2009].

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów prędkości i tłumienia fal powierzchniowych uzyskane przy pomocy systemu SWMD. W projekcie SENSO zebrane wyniki zostały wykorzystane jako składnik biblioteki danych służącej identyfikacji parametrów betonu w ramach fuzji danych. Pomiary propagacji fal ultradźwiękowych z użyciem SWMD były wykonywane wzdłuż i w sąsiedztwie zaznaczonego na rysunku a profilu pomiarowego. Pomiarów dokonywano dla różnego stopnia nasycenia belek wodą. Jak wynika z tabeli V-3 belki charakteryzowały się porowatością od 12,5 % do 18,1 % przy nasyceniu wodą 0 %, 40 % 60 % 80 % oraz 100 %. Pozwoliło to określić wpływ porowatości i obecność wody w betonie na prędkość i tłumienie fali powierzchniowej. Zawartość wody w betonie

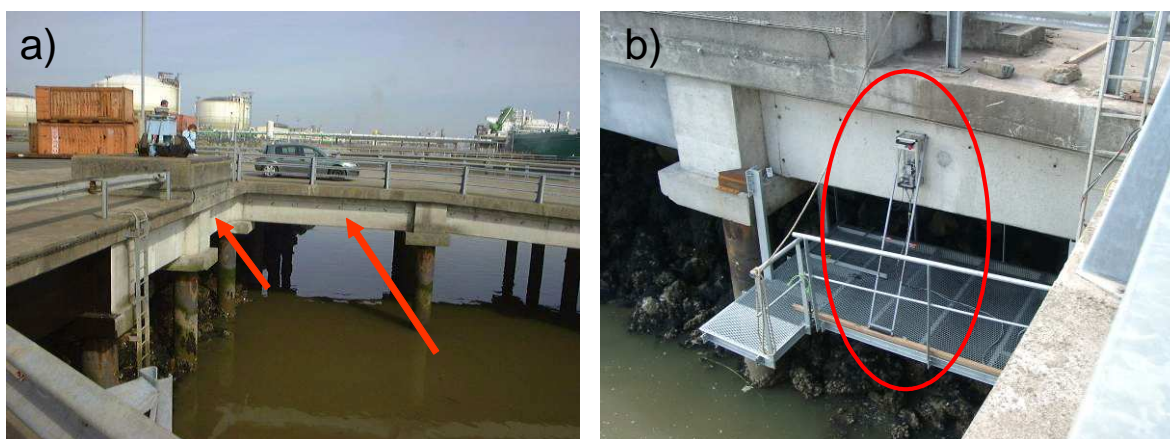
stanowi istotny aspekt, gdyż konstrukcje betonowe często pracują w różnych warunkach wilgotnościowych. Spotykane wilgotności dla betonów zawierają się od kilku procent dla obiektów poddawanych silnemu nasłonecznieniu do wilgotności 100 % dla budowli pracujących w zanurzeniu. W badaniach uwzględniono również wpływ wielkości i rodzaju kruszywa użytego do wykonania próbek.



Rysunek V.2 Testowe belki betonowe: a) wymiary belki oraz położenie profilu pomiarowego, b) część belek poddana całkowitej saturacji wodą słodką.

Infrastruktura portowa w St. Nazair (Francja)

Jednym z badanych obiektów w ramach projektu SENSO było przęśło rampy transportowej w porcie St. Nazaire we Francji pokazane na rysunku V.3.



Rysunek V.3 Przęśło betonowe rampy transportowej w porcie St-Nazaire, a) strefy wykonywania pomiarów zaznaczono strzałkami, b) przykład pomiaru propagacji fal powierzchniowych na jednym z fragmentów przęśła przy użyciu SWMD.

Wybudowana w 1992 roku infrastruktura portowa jest poddawana działaniu słonej wody powodującej degradację jonami chloru. Jednym z celów tych badań było ustalenie głębokości wnikania jonów chloru i powiązaną z nią głębokością degradacji strukturalnej. Przeprowadzone pomiary pozwoliły sprawdzić działanie opracowanych narzędzi

diagnostycznych na rzeczywistym obiekcie. Istotną zaletą wyboru tego miejsca jest fakt, że znany jest profil degradacji chlorem ustalony na podstawie badań niszczących, dzięki czemu możliwe jest porównanie uzyskanych wyników z danymi referencyjnymi.

Próbki gazobetonu do pomiarów współczynnika odbicia

Jak pokazano wcześniej, zaprezentowana w pracy metoda reflektometryczna na chwilę obecną sprawdza się w przypadku materiałów o stosunkowo wysokiej porowatości, wyższej niż posiada tzw. „zdrowy” beton. W tym celu do testowania metody wykorzystano próbki gazobetonu na osnowie piaskowej produkowane przez trzy różne firmy (YTONG, Solbet, H+H). Gazobeton, mimo że charakteryzuje się względnie dużą porowatością ma porównywalną do zwykłych betonów przepuszczalność gazową, dzięki czemu z punktu widzenia transportu gazu i innych substancji (np. wilgoci) może stanowić fizyczny model betonu zdegradowanego. W tabeli V-4 podano parametry charakteryzujące przebadane gazobetonu.

Tabela V-4. Wybrane własność gazobetonów użytych w pomiarach.

	Gęstość ρ [kg/m³]	Porowatość objętościowa [%]	Przepuszczalność 10⁻¹³m²
YTONG	563	76	2.92
SOLBET	560	77	2.70
H+H	550	72	8.49

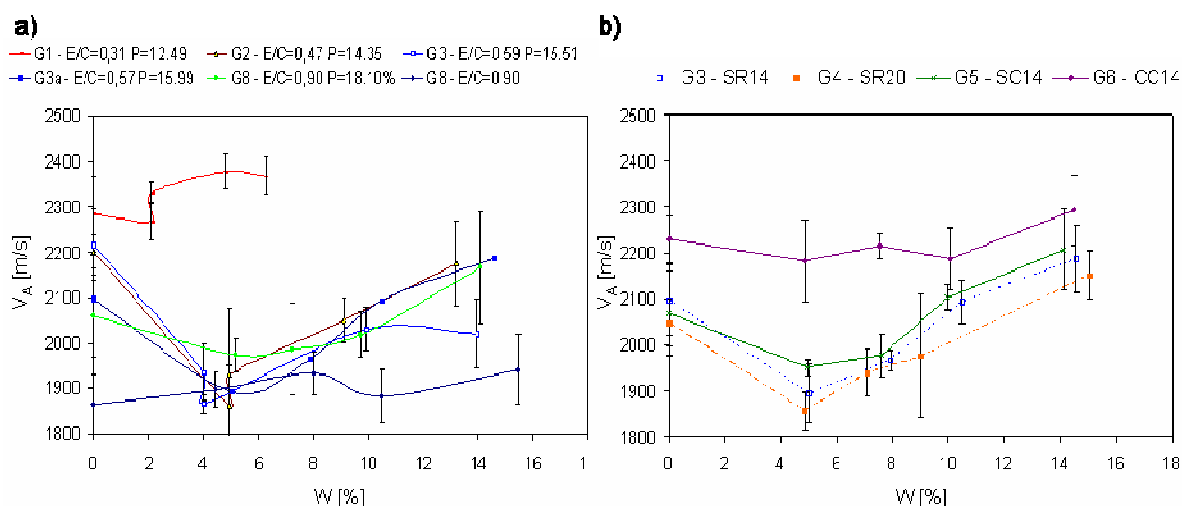
V.2 Wyniki badań dla belek betonowych

Wykorzystanie opracowanego systemu do pomiaru fal powierzchniowych SWMD (rozdział III.1) w kolejnych etapach projektu SENSO wraz z dostępem wyników badań innymi metodami (zakres pomiarów w projekcie SENSO omówiono w rozdziale V.1) pozwolił ocenić jego działanie z różnymi gatunkami betonu i w zróżnicowanych warunkach fizycznych. Zdobyte w ten sposób doświadczenie pozwoliło wprowadzić niezbędne modyfikacje sprzętu i oprogramowania, a także lepiej przygotować się do badań w warunkach terenowych. W poniższym podrozdziale zaprezentowano wyniki pomiarów propagacji fal powierzchniowych dla próbek betonowych opisanych wcześniej. W analizie wyników zbadano wpływ parametrów strukturalnych ośrodka na prędkość i tłumienie propagujących się fal. Podczas przeprowadzonych kilku sesji pomiarowych przebadano prawie 320 różnych próbek. Przyjmując, że średnio na każdej próbce wykonywano 11 profili pomiarowych, a każdy profil składał się z 15 punktów zarejestrowano i przetworzono

prawie 53 tysiące sygnałów. Tak duża liczba pomiarów pozwala dostatecznie dobrze uśrednić otrzymane wyniki, sprawdzić powtarzalność realizacji pomiarów oraz znacznie zmniejszyć wpływ niejednorodności lokalnych w betonie na wyniki końcowe. Różne rodzaje użytego betonu oraz różne stany jego przygotowania i eksploatacji pozwoliły sporządzić zestawienia wpływu poszczególnych czynników na pomiar propagacji fal powierzchniowych. Do porównań użyto uzyskiwane na drodze eksperymentalnej wartości prędkości obserwowanej fal powierzchniowych oraz wartości tłumienia (rozdział III.1.2).

Wpływ zawartości wody na prędkość propagacji

Na rysunku V.4a zestawiono wpływ zmiany obserwowanej prędkości fal powierzchniowych V_A w funkcji objętościowej zawartości wody W dla betonów różniących się jedynie porowatością. Objętościowa zawartość wody zawiera się w przedziale od 0 % do 16 % co odpowiada nasyceniu od 0 % do 100 %. Należy zaznaczyć, że wartości nasycenia 0 % i 100 % są przybliżone gdyż fizycznie nie możliwym jest osiągnięcie takich stanów choćby z powodu obecności porów zamkniętych. Rezultat dla próbek z grupy G1 odbiega od pozostałych, co tłumaczy się niską porowatością ($P=12,49\%$) tego rodzaju betonu, a tym samym trudności z nasyceniem wodą. Pozostałe krzywe przy zawartości wody powyżej ~4 % wykazują tendencje liniowe. Dla $W < 4\%$ rośnie wpływ efektów kapilarnych skutkujących zmianą tendencji krzywych [Villain i inni 2009].

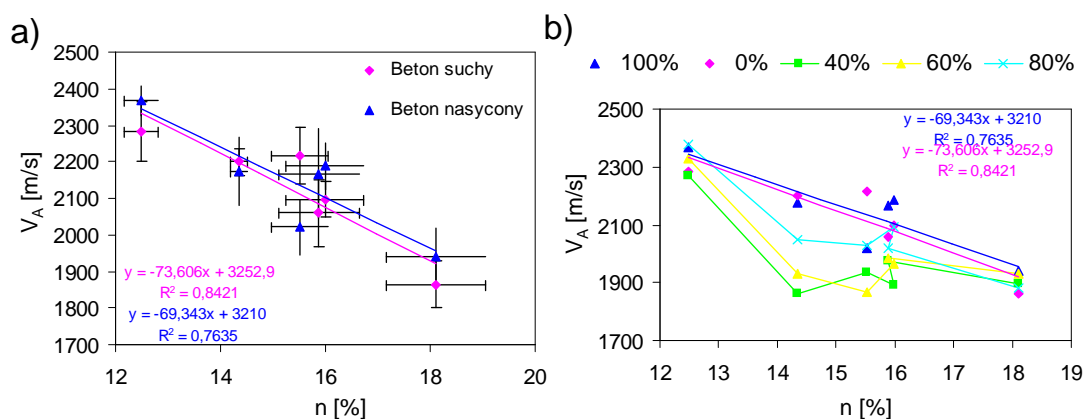


Rysunek V.4 Prędkość V_A w betonie w funkcji zawartości wody W w zależności od porowatości P (a) oraz rodzaju użytego kruszywa (b), parametry betonów w tabeli V-3.

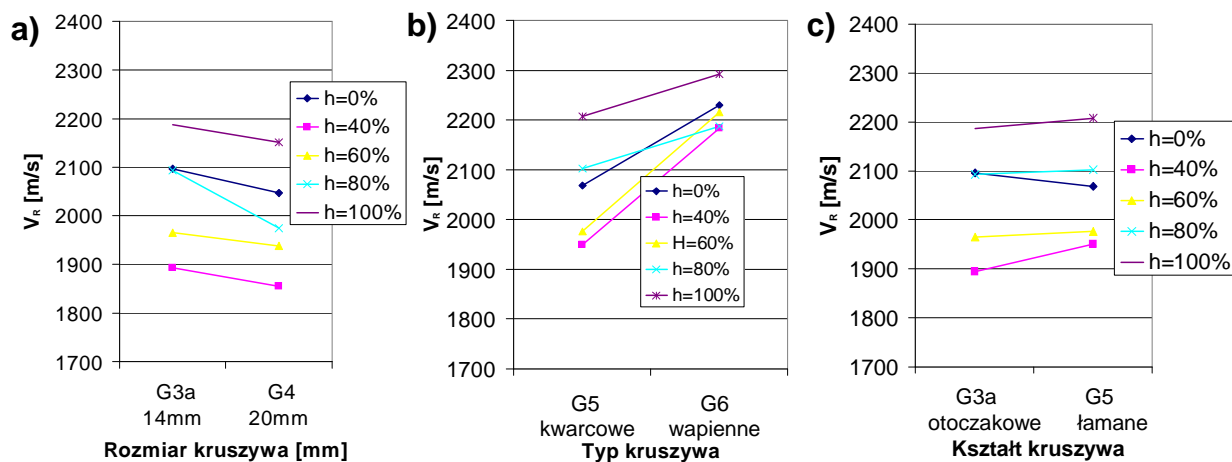
Na rysunku V.4b pokazano wpływ zmiany prędkości V_A w funkcji objętościowej zawartości wody W dla betonów o niemal jednakowej porowatości oraz identycznym rodzajem i rozmiarem kruszywa. Trzy grupy betonów (G3, G4, G5) wykazują bardzo

zbliżone tendencje $V_A(W)$ do rezultatów pokazanych powyżej, jedynie beton na bazie kruszywa wapiennego (G6) odbiega od pozostałych charakteryzując się wyższą prędkością i mniejszą zależnością od nasycenia (krzywa najwyżej położona). Porównując wyniki dla grup G3 i G4 różniących się jedynie wielkością kruszywa odpowiednio 14 mm i 20 mm widać niewielki wzrost prędkości (rzędu 3 %) w przypadku kruszywa o drobniejszej gramaturze.

Wpływ porowatości na prędkość propagacji



Rysunek V.5 Wpływ porowatości na prędkość propagacji fal powierzchniowych dla belek z grup G1, G2, G3, G3a, G7, G8; a) przy skrajnych nasyceniach 0% i 100%, b) przy wszystkich badanych stanach nasycenia.



Rysunek V.6 Wpływ parametrów kruszywa na prędkość propagacji fal powierzchniowych; a) zmiana rozmiaru kruszywa, b) zmiana typu kruszywa, c) zmiana kształtu kruszywa.

Poniżej przeanalizowano wpływ porowatości na prędkość fal powierzchniowych dla różnego stopnia nasycenia betonu wodą S . Do porównania wybrano grupy próbek oparte na tym samym typie i rozmiarze kruszywa. Biorąc pod uwagę dwa skrajne stany

(rys. V.5a) betonu suchego ($S=0\%$) i betonu całkowicie nasyconego ($S=100\%$) obserwuje się spadek prędkości ze wzrostem porowatości. Porównując naniesione linie trendu widać jedynie niewielką różnicę pomiędzy dwoma skrajnymi stopniami nasycenia. Pokazana na rysunku V.5b zależność prędkości od porowatości dla betonów nasyconych częściowo także wykazuje globalny spadek prędkości przy wzroście porowatości niemniej jednak są to przebiegi dużo bardziej nieregularne zwłaszcza w środkowym przedziale zakresu porowatości. Niejednoznaczność rezultatów zależności prędkości od porowatości spowodowaną wpływem wilgotności można zminimalizować używając do oceny wilgotności np. metody elektryczne.

Wpływ rozmiaru i kształtu kruszywa

Zebrane dane pozwoliły ocenić jaki wpływ na prędkość propagacji fal powierzchniowych mają niektóre parametry kruszywa użytego w produkcji betonu. Przedstawione poniżej rezultatybrane do określenia wartości średniej były obarczone rozrzutem od 3 % do 6 %, a zatem większym niż wpływ poszczególnych czynników na prędkość V_A (dla zachowania przejrzystości wykresów nie pokazano przedziałów błędów). Na rysunku V.6a pokazano zależność pomiędzy prędkością fal powierzchniowych i rozmiarem kruszywa. Analiza pokazuje niewielki spadek prędkości przy wzroście rozmiaru kruszywa. Niemal identyczną tendencję widać przy wszystkich stopniach nasycenia wodą. Większe kruszywo powoduje spadek prędkości o około 0,5-1 %.

Analizując wpływ rodzaju użytego kruszywa zauważono, że beton wykonany na bazie kruszywa wapiennego charakteryzuje się większą prędkością fal niż beton oparty na kruszywie sylikatowym. Ponadto zauważono, że badanie propagacji fal powierzchniowych jest mniej wrażliwe na zawartość wilgoci w przypadku betonów zawierających granulaty wapienne (rys. V.6b). Maksymalne różnice prędkości spowodowane różnicą kruszywa dochodzą do 11 % dla nasyczeń częściowych (40 % i 60 %).

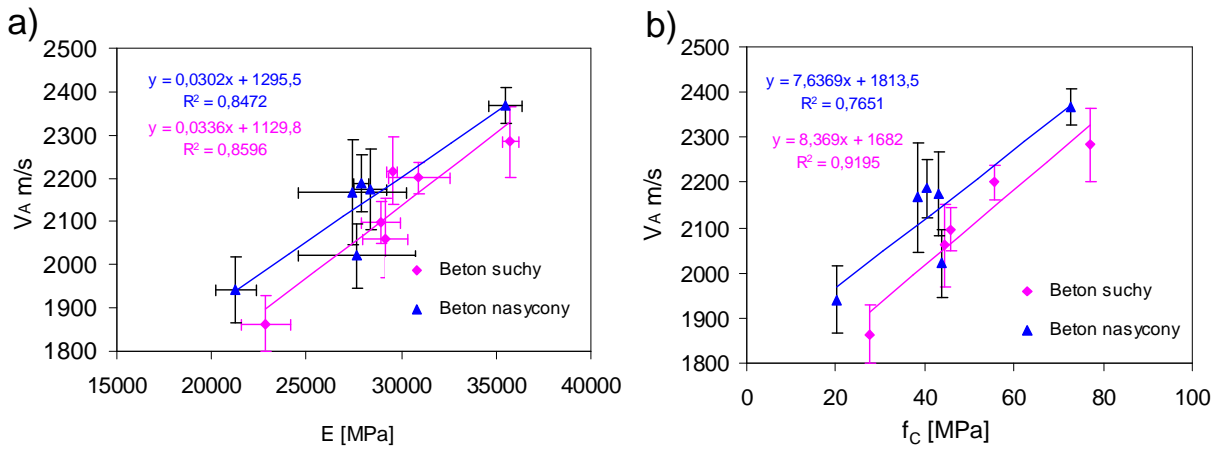
Kolejnym rozpatrywanym czynnikiem było badanie wpływu kształtu kruszywa na prędkość fal powierzchniowych. Na rysunku V.6c widać, że wpływ kształtu granulatu na prędkość fal powierzchniowych jest nieznaczny i nie przekracza 3 %. W warunkach rzeczywistych informacje na temat rodzaju, rozmiaru i kształtu użytego w produkcji betonu kruszywa są stosunkowo łatwe do ustalenia. Jeśli nie istnieje dokumentacja szczegółowa zawierająca tego typu dane, wystarczy odkuć lub oszlifować niewielki fragment z dowolnego miejsca badanej konstrukcji.

Odniesienie prędkości do parametrów mechanicznych betonu

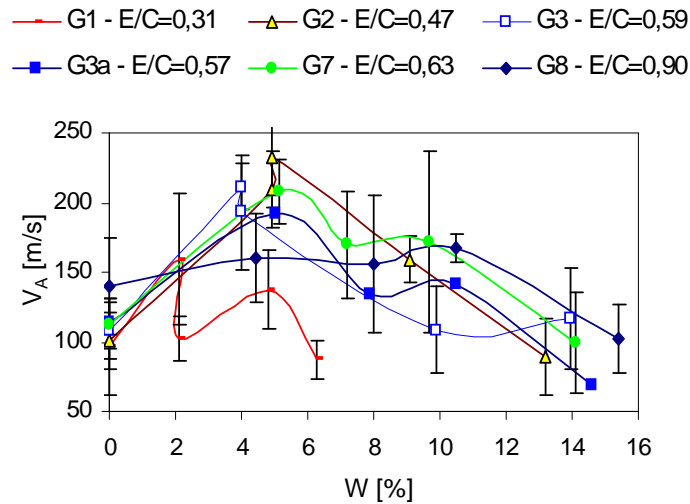
Poniżej pokazano zestawienie prędkości fal powierzchniowych z modułem Younga E (rys. V.7a) oraz z wytrzymałością na ściskanie R_C (rys. V.7b). Do zestawienia wybrano grupy betonów oparte na tym samym typie kruszywa (grupy G1, G2, G3, G3a, G7, G8) w dwóch skrajnych stanach nasycenia wodą. W obydwu przypadkach (E i R_C) obserwuje się quasi liniowy wzrost wartości parametru ze wzrostem prędkości V_A . Jednocześnie należy zauważyć, że betony suche wykazują wyższą wartość parametru E i R_C przy tej samej prędkości aniżeli betony nasycone. Pokazuje to, że stan nasycenia może mieć istotny wpływ przy ustalaniu parametrów mechanicznych betonu na podstawie prędkości propagacji fal powierzchniowych.

Na rysunku V.8 pokazano tłumienie fal powierzchniowych w funkcji zmian nasycenia wodą dla betonów różniących się stosunkiem wody do cementu (E/C), a co za tym idzie o różnej porowatości. Widać, że dla betonu suchego i całkowicie nasyconego tłumienie przyjmuje bardzo podobne wartości. Nieco wyższe tłumienia wykazują materiały nasycone częściowo. Przetwarzając zarejestrowane sygnały zauważono powtarzalność (stosunkowo mały rozrzut) wartości prędkości. Z kolei otrzymane jednocześnie charakterystyki tłumienia są mało powtarzalne oraz nie wykazują zauważalnych prawidłowości. Należy stąd wnioskować, że na istniejącym etapie rozwoju metody pomiarowej i przetwarzania sygnałów wykorzystanie informacji zawartych w tłumieniu jest trudne ze względu na problemy interpretacyjne i mało wiarygodne.

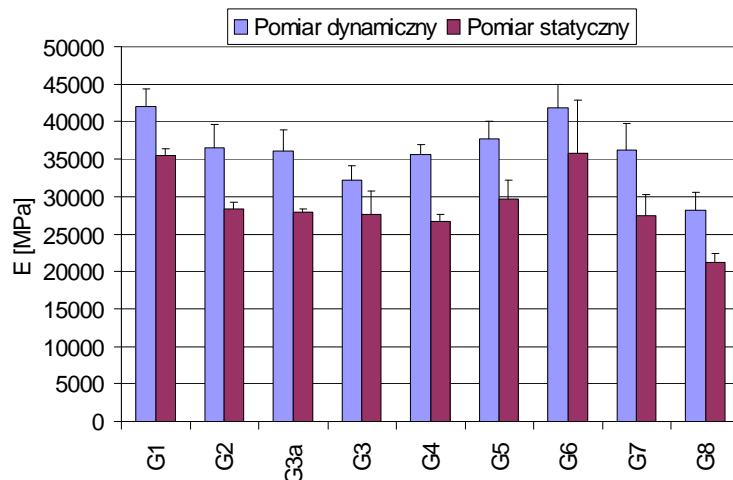
Ograniczone wymiary badanych próbek laboratoryjnych umożliwiły dokonanie pomiarów prędkości fal podłużnych metodą transmisji, co w połączeniu ze znaną gęstością pozwoliła wyznaczyć wartości modułu Younga E według równania 1.2. Na rysunku V.9 pokazano porównanie wartości modułu Younga wyznaczonego metodami niszczącymi (pomiar statyczny) oraz metodami ultradźwiękowymi (pomiar dynamiczny) dla wszystkich grup badanych próbek betonowych. Uzyskane rezultaty wykazują bardzo dobrą korelację pomiarów nieniszczących z pomiarami niszczącymi. Porównując wyniki widać, że wszystkie rezultaty pomiarów dynamicznych charakteryzują się wartościami wyższymi o około 20 % aniżeli rezultaty pomiarów statycznych. Podobne obserwacje odnośnie wartości modułu Younga wyznaczanego na podstawie pomiarów ultradźwiękowych zauważono we wcześniejszych badaniach [Popovics 1995]. Zebrane wyniki stanowią bazę wiedzy, która może posłużyć między innymi jako źródło danych o betonach oraz w procedurach identyfikacji do wprowadzenia ograniczeń zakresu zmian poszczególnych parametrów. Otrzymane wnioski mogą być także wykorzystane przy korygowaniu wyników identyfikacji parametrycznej, w której nie uwzględnia się np. wilgotności.



Rysunek V.7 Zależność prędkości fal powierzchniowych V_A od parametrów mechanicznych:
 a) modułu Younga E , b) wytrzymałości na ściskanie f_c .



Rysunek V.8 Zależność tłumienia od objętościowej zawartości wody dla różnych grup betonów.



Rysunek V.9 Wartości modułów Younga dla poszczególnych grup belek betonowych (beton nasycony).

V.3 Rezultaty identyfikacji na podstawie pomiarów fal powierzchniowych

Identyfikacja parametrów materiałowych na podstawie danych eksperymentalnych będąca podstawą decyzji diagnostycznych stanowi ostateczny cel opracowanego systemu pomiarowego i oprogramowania. Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego, które jest składnikiem tej identyfikacji przeprowadzono zarówno dla danych z pomiarów wykonanych w laboratorium jak i w terenie. Materiały, dla których przeprowadzono identyfikację opisano w poprzednim podrozdziale. W przypadku pomiarów propagacji fal powierzchniowych rezultatami identyfikacji są zazwyczaj profile prędkości fali poprzecznej w funkcji głębokości. Jeśli dla badanego materiału znana jest również przybliżona wartość gęstości oraz prędkości propagacji fal podłużnych (dla wielu materiałów typu skały istnieje związek pomiędzy prędkościami fali podłużnej i poprzecznej) wówczas możliwe jest oszacowanie liczby Poissona ν (rów. I.1) oraz modułu Younga E (rów. I.2) na podstawie zależności:

Pomiary laboratoryjne próbki Plexi-Alu

Charakterystyki dyspersyjne uzyskane z pomiarów próbki materiału dwuwarstwowego Plexi-Alu użyto do oceny procedur identyfikacji. Niskie tłumienie i jednorodna struktura materiałów wchodzących w skład próbki pozwalają uzyskiwać silne sygnały o wysokim stosunku sygnału do szumu, co jest korzystne z punktu widzenia ich przetwarzania oraz identyfikacji parametrów materiałowych. Do identyfikacji użyto programów DDS z zaimplementowanym modelem Gibsona i Chmura punktów wykorzystujący model Haskella.

Przypadek układu Plexi-Alu nie jest dobrym przykładem dla zastosowania modelu Gibsona, gdyż badana próbka składa się z dwóch jednorodnych bardzo różniących się właściwościami materiałowymi warstw, w modelu zaś zakłada się ciągłą zmianę własności.

Tabela V-5. Rezultaty identyfikacji z użyciem programu DDS dla próbki Plexi-Alu.

	Głębokość pierwszej warstwy (degradacji) d [mm]	Prędkość fali poprzecznej na powierzchni V_{so} [m/s]	Liczba Poissona ν	Współczynnik niejednorodności m
Dane odniesienia	5,5	1320	Plexi - 0,30 Alu - 0,35	-
Identyfikacja	8,4	1266	0,5	71,72
Różnice	56%	5%	43%	-

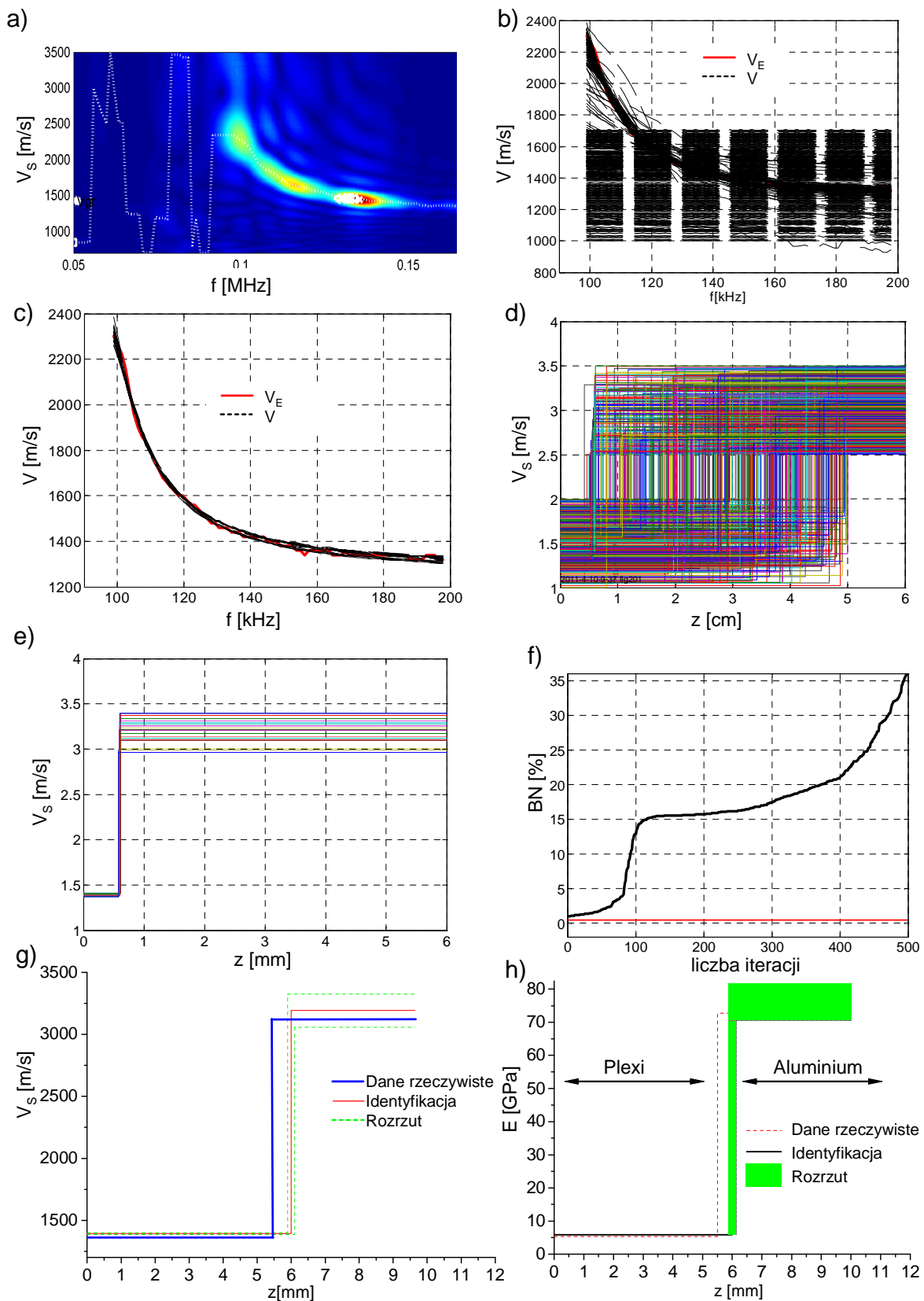
Rezultaty otrzymane z programu DDS przedstawiono w tabeli. Dane odniesienia pochodzą z pomiarów wykonanych innymi metodami. Porównując wyniki identyfikacji z wartościami odniesienia widać, że względnie precyzyjnie ustalona została jedynie prędkość fali poprzecznej w warstwie powierzchniowej V_{s0} , zaś wartość głębokości degradacji (w tym wypadku powinna odpowiadać grubości warstwy plexi) oraz liczby Poissona znacznie różnią się od wartości rzeczywistych. Mimo ewidentnych rozbieżności modelu i makrostruktury próbki przeprowadzono identyfikację parametrów w celu ustalenia przewidywań programu DDS w takiej sytuacji, a także dla porównania wyników z obu użytych programów. Stosunkowo duży skok parametrów skutkuje bardzo wysokim współczynnikiem niejednorodności, co w efekcie może też być przyczyną znacznego błędu oceny głębokości degradacji. Pomimo ewidentnych rozbieżności rezultaty pokazują, że opracowana procedura przewiduje dla części poszukiwanych parametrów sensowny rząd wielkości.

Te same eksperymentalne charakterystyki dyspersyjne uzyskane dla próbki Plexi-Alu wykorzystano do identyfikacji parametrów z użyciem programu Chmura punktów. Przyjęto makrostrukturę w postaci jednej warstwy na półprzestrzeni, zaś szukanymi parametrami były: prędkość propagacji fali poprzecznej w pierwszej warstwie, grubość pierwszej warstwy oraz prędkość propagacji fali poprzecznej w drugiej warstwie (półprzestrzeni). Pozostałe parametry układu przyjęto jako znane równe wartościom odniesienia. Otrzymane rezultaty przedstawia tabela V-6.

Tabela V-6. Rezultaty identyfikacji z użyciem programu Chmura punktów dla próbki Plexi-Alu.

Warstwa	Dane odniesienia				Rezultaty identyfikacji					
	V_p	V_s	ρ	d	V_s	Różnice	σ	d	Różnice	σ
	[m/s]	[m/s]	[kg/m ³]	[mm]	[m/s]	[%]	[%]	[mm]	[%]	[%]
I (Plexi)	2450	1320	1180	5,5	1394	5,6	0,9	6,0	9,1	1,5
II (Alu)	6420	3104	2800	100	3191	2,6	4,2	-	-	

Program Chmura punktów wykonał 500 iteracji, z których wybrano 23 najlepsze rezultaty do obliczenia wartości średniej. Jako wstępne kryterium wyboru najlepszych rezultatów wybrano poziom znormalizowanego błędu identyfikacji z progiem $BN < 0,5\%$ (równanie IV.2). Ponieważ wstępnie założonego progu BN nie uzyskała żadna identyfikacja posłużono się charakterystyką rozkładu błędów BN (rys. V.10) wybierając 23 wyniki charakteryzujące się najmniejszym błędem (w początkowym, liniowym zakresie krzywej BN).



Rysunek V.10 Etapy identyfikacji parametrów dla próbki Plexi-Alu (opis w tekście).

W tabeli V-6 zamieszczono także różnice pomiędzy otrzymanymi wartościami parametrów i odpowiadającymi im danymi odniesienia, a także odchylenie standardowe σ wyrażone w procentach. Rezultaty działania programu Chmura punktów wykazują znacznie lepszą zgodność w stosunku do wyników uzyskanych programem DDS, czego dowodem są znacząco mniejsze wartości różnic oraz odchyłeń standardowych dla poszczególnych parametrów. W przypadku identyfikacji V_S dla pierwszej warstwy oraz jej grubości d zaobserwowano większe wartości różnic aniżeli odchyłeń standardowych. Może to być spowodowane błędem systematycznym pomiaru (np. niedokładne ustawienie urządzenia SWMD na powierzchni próbki) lub też niedostatecznie precyzyjnie dobranym wielkościami, które nie podlegają identyfikacji (prędkość V_p oraz gęstość ρ).

Etapy procesu identyfikacji realizowanej programem Chmura punktów pokazano na rysunku V.10, a ich rezultatem są:

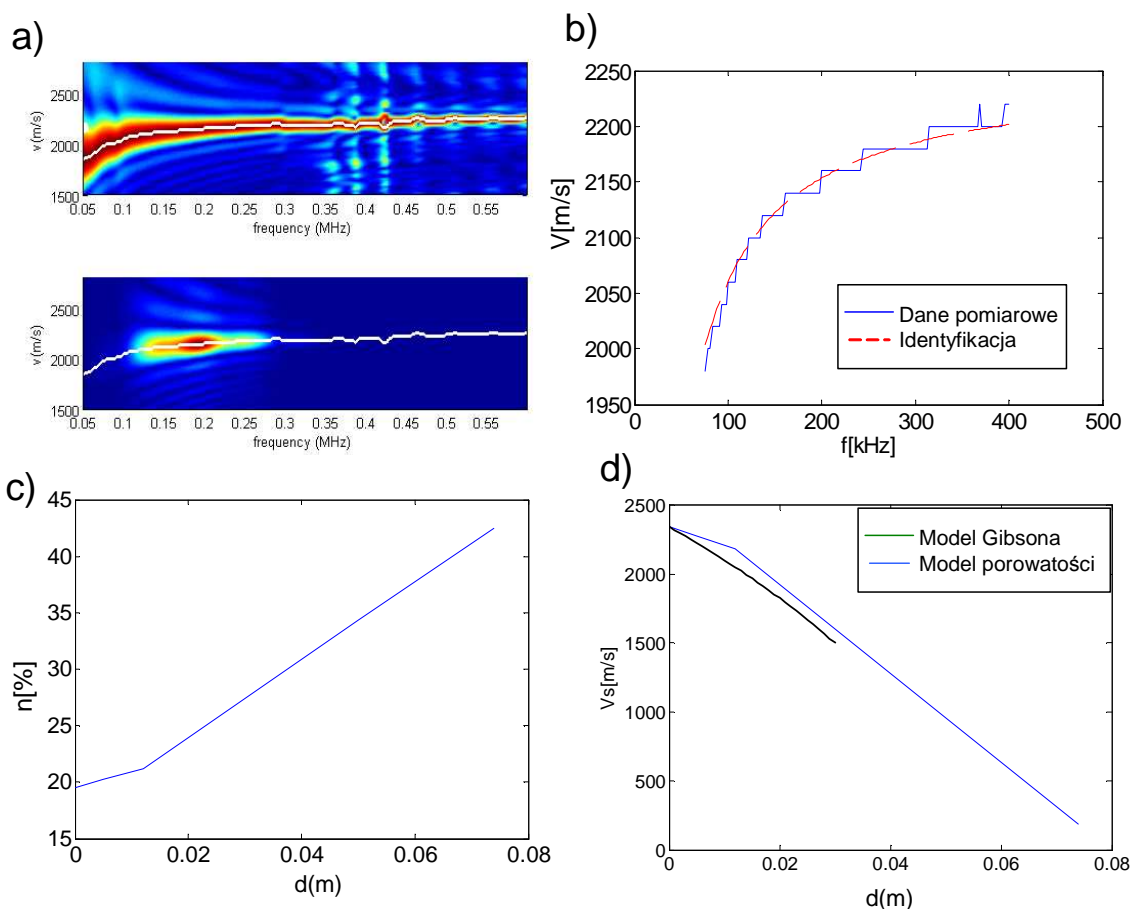
- a) mapa V - f uzyskana z danych eksperymentalnych,
- b) modelowe charakterystyki dyspersyjne $V(f)$ dla wszystkich (500) identyfikacji wraz z charakterystyką eksperymentalną $V_E(f)$,
- c) 23 najlepiej dopasowane $V(f)$ do $V_E(f)$,
- d) profile prędkości poprzecznej w funkcji głębokości $V_S(z)$ dla wszystkich identyfikacji,
- e) profile dla wybranych najlepszych identyfikacji,
- f) wartości BN w funkcji ilości identyfikacji (linią czerwoną oznaczono próg akceptacji 0,5 %),
- g) średni profil $V_S(z)$ wraz z rozrzutem i naniesionym profilem rzeczywistym,
- h) profil modułu Younga w funkcji głębokości $E(z)$ ustalony na podstawie $V_S(z)$.

Odcinki pionowe charakterystyk z rysunków d, e, g i h służą jedynie do pokazania granicy warstw układu. Wykorzystując podane wcześniej zależności oraz wartości prędkości propagacji fal podłużnych i gęstości oszacowano wartości modułu Younga dla poszczególnych warstw. Otrzymane wartości są zbliżone do danych referencyjnych dla materiałów warstw badanej próbki, co pokazano na rysunku V.10h. Analizując przebieg BN (rys. V.10f) widać, że około 80 iteracji charakteryzuje się stosunkowo małym błędem, poczym następuje skokowy wzrost wartości BN . Taki charakter zmian BN może być wskaźnikiem jak dobierać próg akceptacji. Ustalenie kryteriów optymalnej konfiguracji programu Chmura punktów wymaga dalszych prac.

Pomiary laboratoryjne zaprawy cementowej

Pomiary wykonane metodą fal powierzchniowych niejednorodnej zaprawy cementowej pokazały, że tylko testy przeprowadzone od strony większej gęstości dają możliwość zaobserwowania obecności fal. Zatem przypadek ten jest nietypowy

w porównaniu z materiałami degradowanymi gdyż dla badanej zaprawy parametry mechaniczne spadają z głębokością. Zaletą tego przykładu jest to, że zmiana własności następuje w sposób ciągły. Próby identyfikacji parametrów struktury wykorzystujące model Haskell'a nie dały poprawnego wyniku i związane to jest z trudnościami numerycznymi znajdowania pierwiastków równania dyspersyjnego modelu Haskell'a. Opracowana procedura numerycznego rozwiązywania modelu Haskell'a okazała się zawodna. w przypadku materiału, w którym następuje gwałtowny spadek wartości parametrów z głębokością.



Rysunek V.11 Dane i wyniki identyfikacji parametrów zaprawy cementowej przy użyciu modelu Gibsona; a) jedna z eksperymentalnych map V - f (pokazana w różnej skali czułości), b) charakterystyki dyspersyjne pochodzące z pomiarów oraz identyfikacji, c) rozkład porowatości w funkcji głębokości, d) profil prędkość fali poprzecznej uzyskany na drodze identyfikacji i modelu porowatości.

Znacznie lepsze rezultaty uzyskano stosując model Gibsona. W identyfikacji wykorzystano podstawowy program rozwiązujący zagadnienie odwrotne InvGibLSQ. Stosowanie procedury DDS w tym wypadku jest nieuzasadnione, gdyż w badanym materiale zmiana parametrów zachodzi w całej głębokości, a zatem nie ma takiej

głębokości, którą można by uznać za granice degradacji. Na rysunku V.11a pokazano eksperymentalną charakterystykę dyspersyjną wyznaczoną dla badanej zaprawy cementowej. Wykorzystując model Gibsona w procedurze identyfikacji dokonano dopasowania modelowej charakterystyki dyspersyjnej do charakterystyki eksperymentalnej. Rezultat dopasowania charakterystyk pokazano na rysunku V.11b. Wykorzystując informacje o porowatości n uzyskane z badań niszczących (rys. V.11c) w połączeniu z modelem opisującym zależność prędkości fali poprzecznej V_s i porowatości dany równaniem $V_s = V_{s0}(1 - bn)$ (b jest stałą) [Goueygou i inni 2009a] uzyskano profil prędkości propagacji fali poprzecznej, który bardzo dobrze koreluje z profilem uzyskanym na drodze identyfikacji. Obydwa profile pokazano na rysunku V.11d. Pokazany profil prędkości pochodzący z modelu Gibsona sięga jedynie do głębokości ~ 3 cm. Ograniczenie stanowi największa długość fali jaka wynika z dolnej częstotliwości modelowej charakterystyki dyspersyjnej (70k Hz).

Pomiary terenowe w St. Nazaire

Pomiary przeprowadzone na betonowych elementach rampy portowej w St. Nazaire (Francja) oraz przeprowadzona na ich podstawie identyfikacja parametrów materiału stanowią najistotniejszy fragment części eksperymentalnej niniejszej pracy w zakresie badań polowych. Prezentowany przykład stanowi kompleksowy test systemu na rzeczywistym obiekcie, począwszy od realizacji pomiarów i przetwarzania danych, a skończywszy na procesie identyfikacji parametrycznej. Ponadto rozpatrywany beton został niezależnie przebadany w sposób niszczący, dzięki czemu znane są ważniejsze jego parametry, w tym głębokość degradacji. Tym samym możliwe jest porównanie rezultatów identyfikacji z danymi referencyjnymi. Głównymi celami badań było określenie głębokości degradacji spowodowanej niekorzystnym działaniem jonów chloru, ustalenie profilu prędkości fali poprzecznej w funkcji głębokości oraz stopnia degradacji. Do określenia stopnia degradacji SD zastosowano formułę dana wzorem V.1.

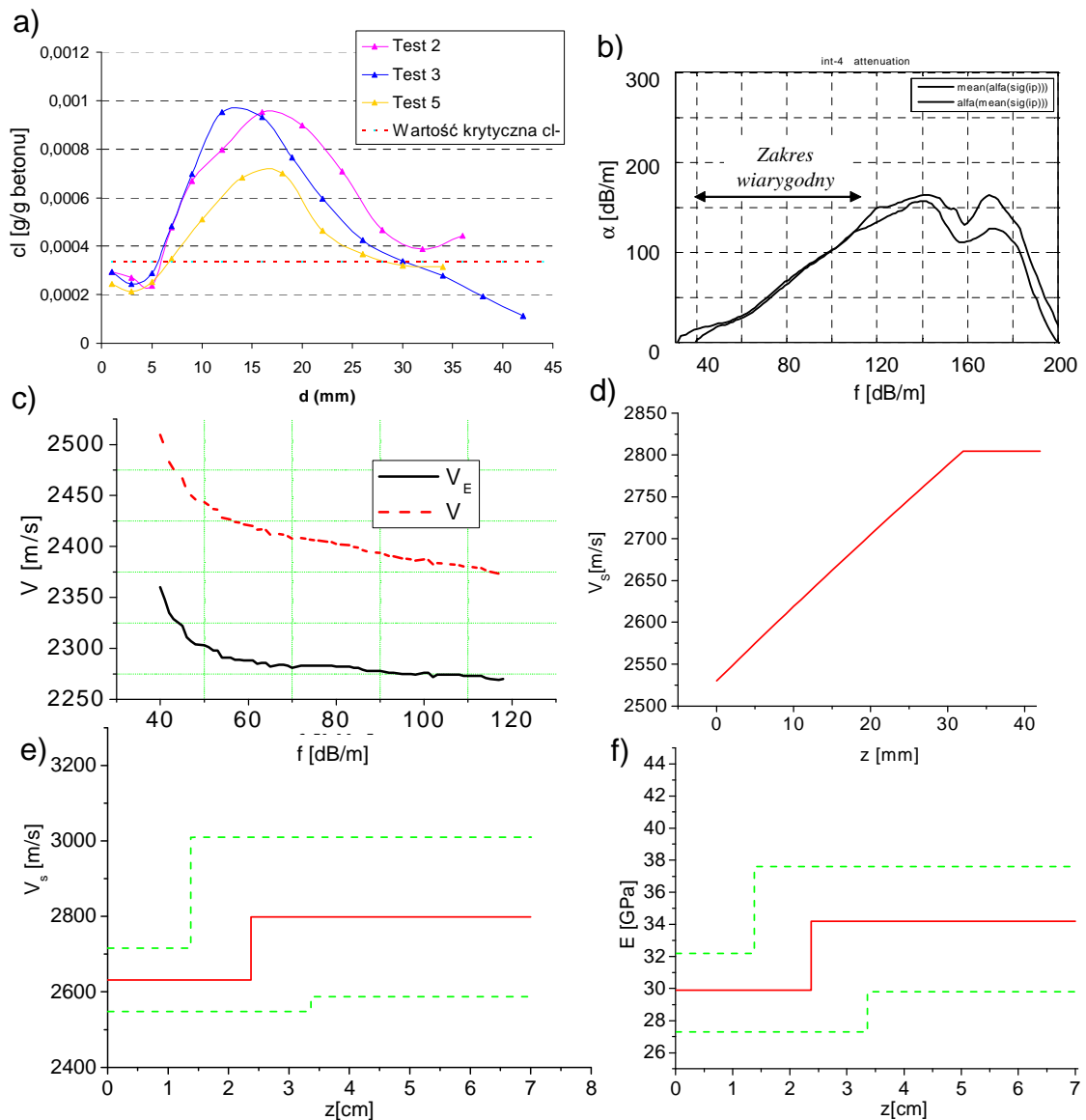
$$SD = \frac{V_{s2} - V_{s1}}{V_{s2}} \times 100\% \quad (V.1)$$

gdzie V_{s1} i V_{s2} oznaczają prędkość fali poprzecznej odpowiednio przy powierzchni warstwy zdegradowanej i w głębi materiału. Proces rozwiązywania zagadnienia odwrotnego przeprowadzono z użyciem programu DDS oraz Chmurą punktów tzn. stosując zarówno model Gibsona jak i Haskella. W konfiguracji modelu Haskella przyjęto układ dwóch warstw oraz ustalono jako stałe prędkości fal podłużnych i gęstości dla obu warstw. Otrzymane rezultaty zamieszczono w tabeli V-7.

Tabela V-7. Rezultaty identyfikacji dla betonu z St. Nazaire.

Wyniki	Głębokość degradacji d [mm]	Prędkość fali poprzecznej na powierzchni V_{s1} [m/s]	Prędkość fali poprzecznej w głębi V_{s2} [m/s]	Stopień degradacji [%]	BN [%]
rzeczywiste	36-40	2530	brak danych-	brak danych	-
identyfikacja DDS	32	2529	2830	10,6	0,96
identyfikacja Chmura punktów	23,7	2632	2799	6,0	2,24

Na rysunku V.12a pokazano zmierzony w badaniach niszczących rozkład zawartość jonów chloru w funkcji głębokości z zaznaczonym poziomem krytycznym [SENSO 2009]. Jako koniec obszaru zdegradowanego przyjęto głębokość, dla której zawartość jonów chloru spada poniżej poziomu krytycznego. Rysunek V.12b przedstawia zmierzone charakterystyki tłumienia fal powierzchniowych. Dwie pokazane krzywe stanowią wartości średnie dla dwóch sposobów uśredniania. W jednym przypadku oblicza się średnią charakterystykę tłumienia z charakterystyk tłumienia dla wszystkich sygnałów czasowych. W drugim przypadku tłumienie oblicza się z uśrednionych sygnałów czasowych. Zaznaczony zakres wiarygodny określa obszar dobrego stosunku sygnału do szumu. W tym zakresie obie krzywe pokrywają się, a charakterystykę tłumienia można przybliżyć zależnością liniową (równanie II.38). Badany beton charakteryzuje się wysokim tłumieniem sięgającym 150 dB/m , co daje średni współczynnik $Q=16,6$. W takiej sytuacji zasadnym jest uwzględnienie wpływu tłumienia na dyspersję zgodnie z podejściem zaproponowanym w rozdziale II.1.7. Na rysunku V.12c pokazano dyspersyjną charakterystykę eksperymentalną V_E oraz charakterystykę reprezentującą dyspersję związaną z makroniejednorodnością układu V , po uwzględnieniu wpływu tłumienia zgodnie z aproksymacją zaproponowaną w rozdziale II.1.7. Na rysunku V.12d pokazano odtworzony profil prędkości propagacji fal poprzecznych w funkcji głębokości uzyskany z programu DDS (model Gibsona). Rysunek V.12e przedstawia profil prędkości fali poprzecznej V_s uzyskany przy użyciu programu Chmura punktów (model Haskella). Na podstawie ostatniego z profili wyliczono wartości modułu Younga E w funkcji głębokości (rys. V.12f). Do obliczeń wykorzystano wartości prędkości propagacji fal podłużnych i gęstości uzyskane na drodze innych pomiarów (dostępnych w projekcie SENSO).



Rysunek V.12 Rezultaty badań betonu rampy portowej w St. Nazair ; a) rozkład zawartości jonów chloru, b) charakterystyka tłumienia, c) charakterystyki dyspersyjne z i bez efektu tłumienia, d) profil prędkości V_s ustalony programem DDS, e) profil prędkości V_s ustalony programem Chmura punktów, e) przebieg modułu Younga w funkcji głębokości na podstawie danych z programu Chmura punktów (linie zielone przerywane oznaczają granice odchylenia standardowego, linia czerwona ciągła określa wartość średnią parametru).

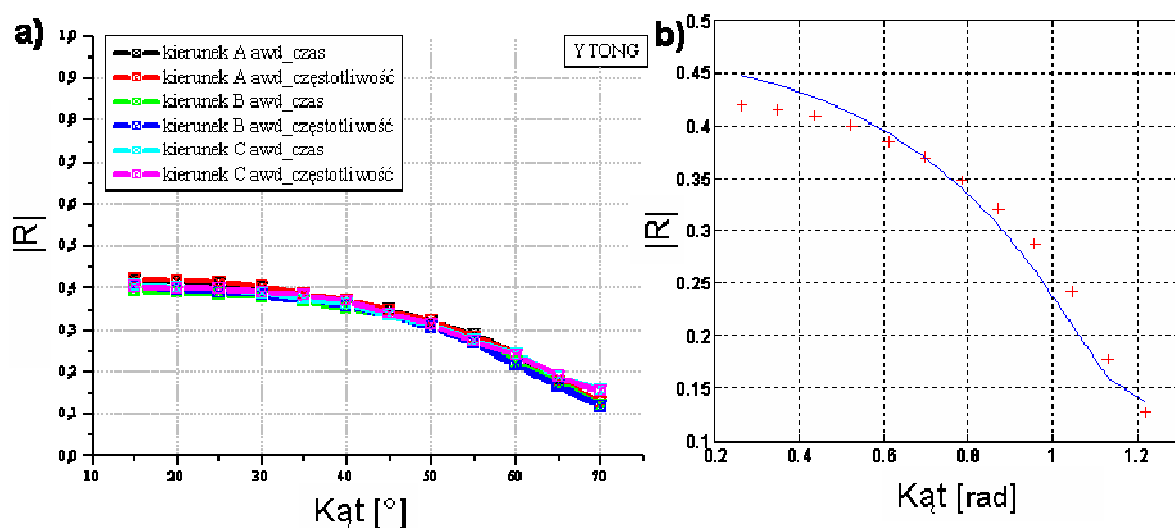
Porównując otrzymane wyniki (tabela V-7) można stwierdzić, że wyniki uzyskane przy pomocy programu DDS są bliższe wartościom rzeczywistym aniżeli rezultaty otrzymane z programu Chmura punktów. Należy zauważyć, że w tym przypadku badany materiał charakteryzuje się ciągłą zmianą parametrów wraz z głębokością (o czym może świadczyć ciągła, a nie skokowa zmiana stężenia jonów chloru). Taka struktura bliższa jest opisowi modelu Gibsona aniżeli Haskella.

Identyfikacja prędkości fali poprzecznej w warstwie przypowierzchniowej także wypadła lepiej dla programu DDS. Model teoretyczny w programie Chmura punktów

skonfigurowano w układzie dwóch warstw, zaś jako niewiadome przyjęto wszystkie siedem parametrów tj. gęstości, prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych dla obu warstw oraz grubość pierwszej warstwy. Wyniki identyfikacji programem Chmura punktów były obarczone odchyleniem standardowym, które wynosiło dla identyfikacji prędkości V_{S1} , V_{S2} oraz głębokości d odpowiednio 3,2 %, 7,5 % i 41,8 %.

Większe rozbieżności parametrów przy identyfikacji programem Chmura punktów aniżeli programem DDS mogą być spowodowane tym, iż struktura dwuwarstwowa użytego modelu Haskella jest mniej adekwatna do rozpatrywanego przypadku materiału aniżeli struktura o ciągłej zmianie parametrów (jak w modelu Gibsona).

V.4 Rezultaty identyfikacji w oparciu o charakterystykę współczynnika odbicia



Rysunek V.13 a) Zależność współczynnika odbicia w funkcji kąta padania; a) wyniki eksperymentalne dla różnych kierunków (ścianek) badanej próbki, b) rezultaty identyfikacji (model - krzywa ciągła, eksperyment – krzywa punktowa).

Badania reflektometryczne pozwalające uzyskać charakterystykę współczynnika odbicia R wykonywano dla szerokiej grupy materiałów. Jednakże biorąc pod uwagę wnioski wynikające z analizy modelu (rozdział II.2.2) oraz otrzymane rezultaty eksperymentalne można stwierdzić, że na obecnym etapie opracowania metody, wyniki zbliżone do rzeczywistych uzyskano dla nielicznych przypadków w tym pn. gazobetonu firmy YTONG. Wyniki dla dwóch pozostałych gazobetonów nie są wiarygodne z powodu bardzo dużego rozrzutu. Przyczyną tego rozrzutu może być faktyczna niejednorodność materiału ale problem w tym zakresie wymaga dalszych badań. Na rysunku V.13a

pokazano charakterystyki współczynnika odbicia dla próbki gazobetonu YTONG, która została przebadana w trzech kierunkach. Wykres na rysunku V.13b pokazuje uśrednioną krzywą eksperymentalną (krzywa punktowa) oraz krzywą uzyskaną na drodze identyfikacji (krzywa ciągła).

Tabela V-8. Rezultaty identyfikacji dla pomiarów gazobetonu.

YTONG	Krętość	Porowatość objętościowa [%]	Przepuszczalność $10^{-13}m^2$
Dane rzeczywiste	brak danych	76	$2.92 \cdot 10^{-13}$
Identyfikacja	2,66	65-75	$8.10 \cdot 10^{-11}$

Porównanie rezultatów identyfikacji z wartościami rzeczywistymi zamieszczono w tabeli V-8. **Dobre wyniki odwracania otrzymano dla porowatości, znacząca rozbieżność dotyczy przepuszczalności.** Rzeczywista wartość krętości dla badanej próbki nie jest znana. Próby identyfikacji dla innych materiałów cementowych (zapraw lub betonów) nie dały zadowalających rezultatów pod względem powtarzalności wyników i zgodności otrzymywanych parametrów z wartościami oczekiwanymi (rzeczywistymi). Potwierdza to wnioski wynikające z analizy wrażliwości modelu przeprowadzonej w rozdziale II.2.2.

V.5 Dyskusja doświadczeń z użytkowania systemów pomiarowych

Doświadczenia zebrane podczas tworzenia systemów pomiarowych, wprowadzanych później modyfikacji, a także przeprowadzone pomiary zaowocowały wiedzą mogącą wpłynąć na jakość realizowanych badań. Jest to szczególnie ważne przy badaniu zdegradowanych betonów charakteryzujących się zazwyczaj dużą niejednorodnością i silnym tłumieniem. Najistotniejsze doświadczenia związane z systemem SWMD przedstawiono poniżej.

- Ustawienie SWMD względem powierzchni. Bardzo ważne okazuje się równoległe ustawienie urządzenia SWMD względem badanej powierzchni. Błąd równoległości ustawienia powoduje w trakcie przesuwania się głowicy odbiorczej zmianę długość drogi propagacji w powietrzu (odległość pomiędzy odbiornikiem i powierzchnią próbki), powodując tym samym błąd pomiaru prędkości. Dla błędu położenia rzędu $1,5 \text{ mm}$ na długości profilu pomiarowego o długości 200 mm błąd prędkości wynosi około 3 %.

- Uśrednianie przestrzenne. Z powodu silnych niejednorodności spotykanych w materiałach betonowych zaleca się stosowanie uśredniania przestrzennego badanego materiału, o czym mowa w rozdziale III.1. Realizuje się to poprzez rejestrację kolejnych profili w różnych miejscach badanego obiektu. Odległość pomiędzy położeniem kolejnych profili musi być na tyle duża, aby obszary propagacji w każdym profilu nie zachodziły na siebie. Ograniczenie stanowi wielkość obszaru poddanego badaniu.
- Wykorzystanie pasma wiarygodnego. W czasie przetwarzania sygnałów zaleca się wykorzystywanie danych pomiarowych jedynie dla częstotliwości z pasma wiarygodnego. Za pasmo wiarygodne zarówno dla prędkości jak i tłumienia uznaje się zakres częstotliwości z dobrym stosunkiem sygnału do szumu, o czym szerzej pisano w rozdziale III.1.2.

Ważniejsze spostrzeżenia zebrane dla systemu RMD są następujące:

- Ustawienie RMD. Duży wpływ na jakość otrzymanych wyników ma właściwe (możliwe dokładne) ustawienie urządzenia względem badanego materiału, tak aby oś obrotu przetworników leżała dokładnie na powierzchni.
- Warunki pomiaru. Istotny wpływ na propagację sygnału mają ruchy termiczne powietrza, warto zatem stosować osłony lub jeśli to możliwe przeprowadzać pomiary w zamkniętych pomieszczeniach/komorach.
- Uśrednianie sygnałów. Stosowanie kilku (nawet do kilkunastu) powtórzeń pomiaru i ich uśredniania pozwala znacznie zmniejszyć wpływ błędów przypadkowych (pochodzących np. z fluktuacji powietrza).
- Pomiar referencyjny. Pomiar na szklanym wzorcu warto wykonać tuż przed pomiarem badanego materiału aby zachowane były podobne warunki propagacji (parametry powietrza).

V.6 Wnioski

W powyższym rozdziale zaprezentowano wyniki działania opracowanych w pracy systemów pomiarowych oraz programów realizujących identyfikację strukturalną i mechaniczną parametrów diagnostycznych betonów. Uzyskanie wiarygodnych wyników końcowych wymaga poprawnego działania urządzeń pomiarowych, oprogramowania wykonującego akwizycję i przetwarzanie danych oraz programów realizujących identyfikację szukanych parametrów. Zgodność wyników otrzymywanych na podstawie proponowanych pomiarów z wynikami odniesienia stanowi kryterium poprawności działania systemów jako całości.

Pokazane wyniki dotyczą obu rozwijanych w pracy metod pomiarowych. W prezentacji rezultatów skupiono się głównie na wynikach badań propagacji fal powierzchniowych, gdyż metoda reflektometryczna wymaga dalszego rozwijania i na obecnym etapie zadowalające wyniki otrzymuje się tylko dla nielicznych materiałów. Oznacza to między innymi, że potencjalnie możliwe do wyznaczenia metodą reflektometryczną parametry takie jak porowatość czy przepuszczalność betonu należy wyznaczać innymi metodami.

W przypadku materiałów przebadanych z użyciem fal powierzchniowych zaprezentowano wyniki badań dla makroniejednorodnych materiałów modelowych (próbka Plexi-Alu, próbka zaprawy cementowej), materiałów wzorcowych (zestaw belek betonowych z projektu SENSO) i dla rzeczywistego obiektu (pomiar St. Nazaire). Szeroki zakres badań pozwala ocenić pracę systemu jako całości, ale także poszczególnych jego elementów. Badania przeprowadzone na materiałach testowych stanowią pierwszy etap weryfikacji działania procedur zaś jej potwierdzeniem są wyniki pomiarów terenowych w porcie St. Nazaire, które są w dużym stopniu zgodne z niezależnymi danymi rzeczywistymi zebranymi dla badanego obiektu. Na podstawie części eksperymentalnej realizowanej pracy można wysnuć następujące wnioski:

- Otrzymane na drodze identyfikacji rezultaty dla danych z St. Nazaire wskazują, że istotny wpływ na dokładność działania programu Chmura punktów ma jakość danych eksperymentalnych, w szczególności rozrzut charakterystyk dyspersyjnych. Należy zatem położyć duży nacisk na jakość i staranność przeprowadzanych pomiarów.
- Zróżnicowane rezultaty identyfikacji otrzymywane w zależności od zastosowanego modelu (Haskella lub Gibsona) sugerują, że wybór optymalnego modelu dla rozwiązania określonego zadania wymaga wnikliwej analizy.
- Badania betonowych belek w ramach projektu SENSO stanowią bazę wiedzy o wpływie różnych czynników (własności betonu) na propagację fal powierzchniowych. Dzięki zebranych informacjom można wnioskować, które własności badanego materiału można zaniedbać z powodu małego wpływu na propagację fal powierzchniowych, a które z nich należy uwzględnić.
- Zaprezentowane obliczenia modułu Younga na podstawie pomiarów ultradźwiękowych dobrze korelują z wartościami rzeczywistymi.
- Informacje o tłumieniu fal ultradźwiękowych w betonie zostały wykorzystane do uwzględnienia wpływu tłumienia na dyspersję dla przypadku betonu silnie tłumiącego.
- Dane o tłumieniu mogą też stanowić także źródło dodatkowych sugestii o jakości badanego materiału.

Warto również dodać, iż poza prezentowaną pracą system SWMD był także z powodzeniem stosowany przy poszukiwaniu wad struktur kompozytowych [Safinowski i inni 2006].

Pokazane wyniki badań reflektometrycznych dotyczą tylko jednego wybranego materiału, dla którego uzyskano względnie dobre rezultaty, co na obecnym etapie rozwoju metody bardzo ogranicza jej zakres zastosowań. Dotychczasowe doświadczenia związane z badaniami charakterystyki współczynnika odbicia pokazują znaczny potencjał wykorzystania tego podejścia w diagnostyce nieniszczącej. Niemniej jednak pełne wykorzystanie metody reflektometrycznej wymaga jej dalszego rozwijania zarówno od strony realizacji pomiarów jak i modeli teoretycznych wykorzystywanych w procesie identyfikacji.

Rozdział VI

Podsumowanie i wnioski końcowe

W pracy podjęto problematykę rozwijania narzędzi pomiarowych związanych z nieniszczącą diagnostyką bezkontaktową degradacji strukturalnej i mechanicznej materiałów budowlanych, zwłaszcza betonów. Po przeprowadzonej analizie literaturowej dotyczącej kontroli nieniszczącej betonu (rozdział I) w pracy skupiono się nad rozwinięciem dwóch metod wykorzystujących propagację fal ultradźwiękowych, tj. metod opartych na analizie dyspersji fal powierzchniowych w ośrodku makroniejednorodnym oraz analizie współczynnika odbicia fal od materiałów porowatych. W związku z wybranymi metodami w rozdziale II omówiono trzy wybrane modele opisujące rozpatrywane zjawiska propagacji. Dwa z nich (model Haskella i model Gibsona) opisują propagację fal powierzchniowych zaś trzeci dotyczy zjawiska odbicia fal. Modele te z odpowiednimi programami posłużyły do badań wrażliwości, w których wykazano jaki wpływ na ich przewidywania mają poszczególne parametry. W części teoretycznej dotyczącej fal powierzchniowych podjęto próbę aproksymacji składowej dyspersji pochodzącej od tłumienia. Analiza wrażliwości modelu reflektometrycznego pokazała ograniczone możliwości jego stosowania do materiałów silnie porowatych (betony mocno zdegradowane i gazobetony).

Do realizacji części eksperymentalnej pracy niezbędne było opracowanie i wykonanie dwóch sterowanych komputerowo systemów pomiarowych omówionych w rozdziale III. W ramach pracy powstały: przenośny system do bezkontaktowych pomiarów propagacji fal powierzchniowych (SWMD) oraz przenośny system do bezkontaktowych pomiarów charakterystyki współczynnika odbicia (RMD). Opracowane urządzenia mogą pracować zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i terenowych, zaś wykorzystanie powietrza jako ośrodka sprzęgającego przenoszącego falę pomiędzy przetwornikami ultradźwiękowymi i materiałem sprawia, że badania są bezkontaktowe i nie wymagają środka sprzęgającego (bezinwazyjne). W tej części pokazano także zaawansowane składniki procesu przetwarzania sygnałów realizowanych celem zebrania danych pomiarowych.

Pożądanym efektem końcowym ilościowej diagnostyki jest oszacowanie stanu badanego materiału przez ustalenie jego parametrów materiałowych. W podjętym problemie zdegradowanych materiałów betonowych niezbędnym jest powiązanie zebranych danych pomiarowych z odpowiednimi modelami opisującymi zjawiska falowe.

Do realizacji tego etapu konieczne jest rozwiązanie problemu odwrotnego z wykorzystaniem procedur optymalizacyjnych. Rozdział IV poświęcono doborowi i implementacji kilku metod optymalizacyjnych na potrzeby identyfikacji parametrów badanej struktury. Zaprezentowano dwa autorskie programy: program Chmura punktów wykorzystujący połączenie metod (stochastycznych i deterministycznych) model Haskella oraz program DDS oparty na modelu Gibsona służący do poszukiwania głębokości degradacji. Opracowane programy przetestowano na specjalnie przygotowanych danych syntetycznych.

Ważnym zastosowaniem i okazją weryfikacji zaproponowanych narzędzi diagnostycznych była realizacja badań na rzeczywistych materiałach (rozdział V). Otrzymane wyniki potwierdzają poprawność działania wszystkich elementów prezentowanych systemów tj.: części pomiarowej, zastosowanego przetwarzania danych, oraz metod identyfikacji parametrów materiałowych. Zebrane dane na próbkach w projekcie SENSO stanowią cenną bazę wiedzy o wpływie niektórych parametrów betonu na propagację fal powierzchniowych. Przeprowadzone badania w warunkach laboratoryjnych oraz terenowych ujawniły także pewne mankamenty opracowanych narzędzi zarówno w zakresie sprzętowej jak i programowej.

Zebrane wnioski mogą wyznaczać kierunki dalszych prac. Dotyczy to zarówno rozwoju i doskonalenia zaprezentowanych technik i systemów pomiarowych jak i przetwarzania sygnałów oraz metod identyfikacji parametrycznej. W części sprzętowej systemu do pomiaru fal powierzchniowych (SWMD) należy rozważyć:

- przebudowę SWMD w celu zastosowania drugiego przetwornika nadawczego, co umożliwi prowadzenie pomiaru w obu kierunkach profilu i pozwoli na drodze przetwarzania sygnałów skorygować błędy ustawienia urządzenia względem badanej powierzchni,
- miniaturyzację układu sterującego i wzmacniacza mocy możliwą dzięki dynamicznemu rozwojowi podzespołów elektronicznych oraz zdobytej wiedzy odnośnie wymagań sprzętowych,
- poprawę izolacji akustycznej pomiędzy przetwornikiem nadawczym i odbiorczym w celu zmniejszenia udziału w odbieranym sygnale fali biegnącej bezpośrednio przez powietrze,
- uzupełnienie systemu SWMD o pomiary innych wielkości, np. pomiar wilgotności betonu.

W części sprzętowej systemu do pomiarów reflektometrycznych (RMD) warto rozważyć:

- opracowanie systemu do łatwiejszego, a zarazem bardziej precyzyjnego pozycjonowania urządzenia względem badanej próbki,

- obudowanie urządzenia ekranami ograniczającym wpływ otoczenia na pomiar,
- przystosowanie systemu do pracy na elementach konstrukcyjnych pionowych (ściany) i poziomych odwróconych (sufity).

Poza wyżej wspomnianymi propozycjami system RMD wymaga przeprowadzenia wielu badań w celu określenia jego rzeczywistej przydatności i zakresu możliwych zastosowań.

Oprogramowanie służące do akwizycji i przetwarzania sygnałów można zoptymalizować pod kątem szybkości działania ale także wyposażyć w narzędzia, które w czasie rzeczywistym sugerowałyby konieczność powtórzenia nieudanych pomiarów lub automatycznie odrzucały gorsze rezultaty w celu poprawy jakości otrzymywanych danych pomiarowych.

Ulepszenia dotyczące technik identyfikacji parametrycznej na tym etapie prac sprowadzają się głównie do procedur wykorzystujących model Haskella i dotyczą:

- wektoryzacji kodu obliczeniowego dla rozwiązywania modelu Haskella, co znacznie przyspieszy jego działanie i tym samym skróci czas procesu identyfikacji,
- implementacji innych procedur optymalizacyjnych jak np. Algorytmy Genetyczne, a tym samym kontynuacji prac nad doбором optymalnej metody do rozwiązywania przedstawionego zagadnienia odwrotnego,
- opracowania procedury opartej na wykorzystaniu do identyfikacji innych modeli mogących opisywać zdegradowany materiał.

BIBLIOGRAFIA

- Abraham O., Villain G., Lu L., Cottineau L., Durand O. (2009)**, *A laser interferometer robot for the study of surface wave sensitivity to various concrete mixes*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009.
- ACI 228.1R-95, (2002)**, *In-Place Methods to Estimate Concrete Strength*, ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills MI, 2002.
- Aki K., Richards P. G. (1990)**, *Quantitative Seismology*, Freeman and Co., New York 1990.
- Amborski, K. (2009)**, *Podstawy metod optymalizacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
- Arndt R., Jalinoos F. (2009)**, *NDE for corrosion detection in reinforced concrete structures – a benchmark approach*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, June 30th – July 3rd, 321-326, France 2009.
- Attenborowugh K., (1982)**, *Acoustical characteristics of porous materials*, Phys. Reports, 82, 3, 179-227 1982.
- Balayssac J.P., Laurens S., Arliguie G., Ploix M. A., Breysse D., Dérobert X., Piwakowski B. (2009)**, *NDE for corrosion detection in reinforced concrete structures – a benchmark approach*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, June 30th – July 3rd, 391-398, France 2009.
- Bergmann L. (1948)**, *Ultrasonic and their Scientific and Technical Applications*, Wiley, New York 1948.
- Biot M. A. (1956)**, *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range, II. Higher-frequency range*, Journal of the Acoustic Society of America, 28, 2, 168-178, 179-191, 1956.
- Boiero D., Wisen R., Socco L.V. (2006)**, *Scale property Monte Carlo driven inversion of surface wave data*, Near Surface, Helsinki 2006.
- BS (1881)**, *Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests*, British Standards Institution, Part 207 London 1881.
- Brouwer J. Helbig K. (1998)**, *Shallow High-Resolution Reflection Seismics*, Elsevier Science Ltd., Oxford 1998.

- Bungey J. H., Millard S. G. (1996)**, *Testing of concrete in structures*, Third edition, Chapman & Hall, 1996.
- Carter R. G., Gablonsky J. M., Patrick A. Kelley C. T., Eslinger O. J. (2002)**, *Algorithms for noisy problems in gas transmission pipeline optimization*, Optimization and Engineering 2 139-157, 2002.
- Cartz L. (1995)**, *Nondestructive Testing, Radiography, Ultrasonic, Liquid Penetrant, Magnetic Particle, Eddy Current*, ASM International®, 1995.
- Castagnede B., Aknine A., Melon M., Dopellier C. (1998)**, *Ultrasonic characterization of the anisotropic behavior of air-saturated porous materials*, Ultrasonics, 36, 323-341, 1998.
- Coleman, T.F., Li Y. (1994)**, *On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds*, Mathematical Programming, Vol. 67, Number 2, pp 189-224, 1994.
- Cook R., A. (1991)**, *Fundamentals of mercury intrusion porosimetry and its application to concrete materials science*, Master of Science Thesis, Cornell University, 1991.
- Clemena G. G., Malhotra V. M., Carino N.J. (1991)**, *Short-Pulse Radar Methods in Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, Press, Boca Raton CRC pp. 253-274 , FL, 1991.
- Dal Moro G., Forte E., Pipan M., Sukan. M (2006)**, *Velocity spectra and seismic-signal identification for surface-wave analysis*, Near Surface Geophysics, pp. 243-251, 2006.
- Dal Moro G., Pipan M., Gabrielli P. (2007)**, *Rayleigh Wave Dispersion Curve Inversion via Genetic Algorithms and Posterior Probability Density Estimation*, Journal of Applied Geophysics 61, pp. 39-55, 2007.
- Declercq NF., Briers R., Degrieck J., Leroy O. (2005)**, *The history and properties of ultrasonic inhomogeneous waves*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control Vol. 52 NO. 5, pp. 776-791, May 2005.
- Dérobot X., Villain G., Cortas R., Chazelas J. (2009)**, *EM characterization of hydraulic concretes in the GPR frequency-band using a quadratic experimental design*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, June 30th – July 3rd, France 2009.
- Fellah Z. E. A., Berger S., Lauriks W., Depollier C., Aristegui C., Chapelon J.-Y. (2003)**, *Measuring the porosity and the tortuosity of porous materials via*

- reflected waves at oblique incidence* J. Acoust. Soc. Am. 113, 5, 2424-2433, 2003.
- Feng S., Sugiyama T., Yamanaka H. (2005)**, *Effectiveness of multimode surface wave inversion in shallow engineering site investigation*, Exploration Geophysics 36, pp. 26-33, 2005.
- Figg J. (1989)**, *Concrete surface permability: Measurement and meaning*, Chemistry and Industry, 714-719. , Now York. 1989.
- Findeisen S., Szymanowski W., Wierzbicki A., (1987)**, *Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji*, PWN 1987.
- Finkel D. E. (2003)**, *DIRECT Optimization Algorithm User Guide*, Center for Research in Scientific Computation North Carolina State University Raleigh, NC 27695-8205, North Carolina 2003.
- Floudas, C.A, Pardalos, P.M., (eds.), (2009)**, *Encyclopedia of Optimization*, 2nd edition, Springer 2009.
- Garnier V., Corneloup G., Toppani E., Leygonie M., (2000)**, *Non-Destructive Evaluation of Concrete Damage by Ultrasound* 15th WCNDT, Roma 2000.
- Garnier V., Chaix J., Payan C. (2009)**, *Improvement of new wave propagation techniques to characterize concrete* [NDTCE'09].
- Gurevich B., Schoenberg M., (1999)**, *Interfae conditions for Biot's equations of poroelasticity*, J. Acoust Soc. Am , 105, 2585-2589, 1999.
- Gibson R.E. (1967)**, *Some Results Concerning Displacements and Stresses in a Non-Homogeneous Elastic Half-Space*, Geotechnique 17 58-67, 18 275, 19 160 1967.
- Goueygou M., Lafhaj Z., Soltani,F. (2009a)**, *Assesment of porosity of mortar using ultrasonic Rayleigh waves*, NDT&E International Vol. 42 pp. 353-360, 2009.
- Goueygou M., Piwakowski B., Ould Naffa S., Buyle-Bodin F. (2002)**, *Assessment of broadband ultrasonic attenuation measurements in inhomogeneous media*, Ultrasonics, pp. 77-82, 2002.
- Goueygou M., Soltani F., Lafhaj Z., Piwakowski B. (2009b)**, *Effects of geometrical diffraction on non contact measurements of ultrasonioc attenuation in cement based materials* Submitted to NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, , June 30th – July 3rd, France 2009.
- Goupillaud P. L. (1976)**, *Signal design in the 'Vibraseis' technique.*” Geophysics 41, pp. 1291-1304, 1976.

- Halleux B. D. (2000)**, *Notes sur le contrôle non destructif*, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve 2000.
- Hala J., Schabwicz K. (2005)**, *Methodology of neural identification of strength of concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 102, no. 6, pp. 459-464, 2005.
- Haskell N. A. (1953)**, *The dispersion of surface waves on multilayered media*, Bulletin of the Seismological Society of America 43, 17-34 1953.
- Hoffren H., Karppinen T., Hægström E., (2004)**, *Measuring porosity and tortuosity of rocks by means of air-borne ultrasound*, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA 2004.
- Hoffren H., Karppinen T., Kohout T., Hægström E., (2005)**, *Plastic foam porosity characterization by air-borne ultrasound, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Brunswick, Maine, USA 2005.
- Hubbard S.S., Zhang J.Y., Monteiro P. J. M., Peterson J. E., Rubin Y. (2003)**, *Experimental detection of Reinforcing Bar Corrosion Using Nondestructive Geophysical Techniques*, ACI Mat.J., Vol. 100, No. 6, pp. 501-510, 2003.
- Jung Y., Kundu T., Ehsani M. R. (2002)**, *A New Nondestructive Inspection Technique for Reinforced Concrete Beams*, ACI Materials Journal / May-June 2002.
- Kaczmarek M., Safinowski P., Piwakowski B. (2009)**, *Non-contact ultrasonic porosymetry NDTCE'09*, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, France, June 30th – July 3rd, pp. 529-534, 2009.
- Kaszyński J. (2003)** *Ultradźwiękowe badania betonu z uwzględnieniem strefy zbrojenia i zarysowania*, Wydawnictwo uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2003.
- Kirkpatrick S., Gelatt C. D., Jr., Vecchi M. P. (1983)**, *Optimization by Simulated Annealing*, Volume 220, Number 4598, Science 13 May 1983.
- Klimis N. (1988)**, *Etude en laboratoire de l'atténuation des ondes longitudinales – Application à la caractérisation géotechnique des roches*, Rapports des Laboratoire LCPC, Ministère de l'équipement; Série : géotechnique – mécanique des sols – sciences de la terre GT28 ; Avril 1988.
- Kosecki A., (2010)**, *Optimisation d'une source vibratoire pour la détection des cavités souterraines par sismique réflexion haute résolution*, PhD Ecole Centrale de Lille, 2010.
- Kosecki A., Piwakowski B., Driad-Lebeau L. (2010)**, *High Resolution Seismic Investigation In Salt Mining Context*. Revue Acta Geophysica Vol. 58/1, pp.15-33, 2010.

- Klauder J. R., Price A. C., Darlington S., Albershim W. J. (1960)**, *The theory and design of chirp radars*, Bell System Tech. Journal Vol. 39, pp. 745-807, 1960.
- Klimis N. (1988)**, *Etude en laboratoire de l'atténuation des ondes longitudinales, Application à la caractérisation géotechnique des roches*, Rapports des laboratoires, Publié par LCPC, 58 bd Lefebvre – 75732 "PAEIS CEDEX 15 sous le numéro3558, 1988.
- Krstulovic-Opara N., Woods R. D., Al-Shayea N., (1969)**, *Nondestructive Testing of Concrete Structures Using the Rayleigh Wave Dispersion Method*, ACI Materials Journal /January-February 1996.
- Kuc R. (1981)**, *Digital filter models for media having linear with frequency loss characteristics*, Journal of the Acoustical Society of America Vol. 69, pp. 35-40, 1981.
- Kuc R. (1983)**, *Generating a Minimum-Phase Digital Filter Model for the Acoustic Attenuation of Soft Tissue*, IEEE Ultrasonics Symposium, Atlanta, Expanded Abstracts KK-1, 1983.
- (Kumar) Mahinthakumar G., Sayeed M. (2005)**, *Hybrid Genetic Algorithm – Local Search Methos for Solving Groundwater Source Identification Inverse Problem*, J. Water Tesour. Plng. and Mgm. 131, 45 2005.
- Kusiak, J., Danielewska-Tulecka, A., Oprocha, P., (2009)**, *Optymalizacja. Wybrane metody z przykladami zastosowań*, Wydawnictwo Naukowe PWN 2009.
- Lai G. C. (2098)**, *Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near surface site characterisation*, PhD thesis Georgia Institute of Technology, 1998.
- Lai G. C., Rix G. J., Foti S. Roma V. (2002)**, *Simultaneous measurement and inversion of surface wave dispersion and attenuation curves*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22. pp. 923-930, 2002.
- Lamb H. (1917)**, *On waves in an elastic plate*, Proc. Roy. Soc., Vol. 93 PT series A. pp. 114-128, 1917.
- Lataste J., Laurens S., Moczko A. (2009)**, *Some elements for improving interpretation of concrete electrical resistivity*, [NDTCE'09].
- Litniewski J., Nowicki A., Klimonda Z., Lewandowski M. (2007)**, *Sound Fields for Coded Excitations in Water and Tissue: Experimental Approach*, Ultrasound in Biology and Medicine, Vol. 33, Issue 4,. pp. 601-607, 2007.

- Lowe M. J. S. (1995)**, *Matrix Techniques for Modeling Ultrasonic Waves in Multilayered Media*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control Vol. 42 NO. 4 JULY 1995.
- Mavko C., Mukerji T., Dvorkin J. (2003)**, *The Rock Physics Handbook – Tools for Seismic Analysis in Porous Media*, Cambridge University Press 2003.
- McMechan G. A., Yedlin M. J. (1981)**, *Analysis of dispersive waves by wave field transformation*, Geophysics Vol. 48. NO. 6, pp. 869-874, June 1981.
- Mehta P. K. (1997)**, *Durability – Critical Issues for the future*, Concrete International, 27-33, 1997.
- Mehta P. K., Monteiro P. J. M. (2006)**, *Concrete, Microstructure, Properties and Materials*, The McGraw-Hill Companies, Inc. Third edition, 2006.
- Miller G. F., Pursey H. (1955)**, *In situ nondestructive testing of concrete SP-82*, ACI International Conference, Ottawa, 831, 1955.
- Mindess S. (2001)**, *Editorial*, Matériaux et Structures Vol. 34, pp. 450 10-2001.
- Misaridis T. Jensen J.A. (2005)**, *Use of Modulated Excitation Signals in Medical Ultrasound. Part II: Design and Performance for Medical Imaging Applications*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control Vol. 52(2), pp. 192-207, 2005.
- Moczko A. (2006)** *Współczesne metody diagnostyki istniejących konstrukcji betonowych*. Materiały Budowlane, nr 12, str. 21-24, 2006.
- Moré, J. J. (1977)** *The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory*, Numerical Analysis, ed. G. A. Watson, Lecture Notes in Mathematics 630, Springer Verlag, pp. 105-116, 1977.
- (NDTCE'09) Abraham O., Derobert X. (2009)**, *Non-Destructive Testing in Civil Engineering NDTCE'09*, Wydane przez LCPC, pod numerem C1502542, Francja 2009.
- Nelder J.,-Mead R. (1965)** *A simplex method for function minimization*, Computer Journal Vol. 7 pp. 308-313, 1965.
- Neville, A.M. (2000)** *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków 2000.
- Neuenschwander J., Schmidt, Th. Luthi, Romer M. (2006)**, *Leaky Rayleigh wave investigation on mortar samples*, Ultrasonics Vol. 45, pp 50-55, 2006.
- Nowicki A. (2010)** *Ultradźwięki w medycynie – wprowadzenie do współczesnej ultrasonografii*, Roztoczańska Szkoła Ultrasonografii, 2010.
- Orozco M. C. (2003)** *Inversion method for spectral analysis of surface waves (SASW)*, PhD Georgia Institute of Technology, 2003.

- Owino O. J., Jacobs L. J. (1999)** *Attenuation measurement in cement-based materials using laser*, J.Eng. Mech.. pp. 637-645, June 1999.
- Park C. B., Miller R. D., Jianghai X. (1998)** *Multichannel analysis of surface waves* Geophysics, Vol 64, N°3, pp. 800-808, 1998.
- Pettunen C. D., Jones D.R., Stuckman B. E. (1993)**, *Lipschitzian optimization without the lipschitz constant*, Journal of Optimization Theory and Application, Vol. 79(1), pp. 157-181, October 1993.
- Piwakowski B., Fnine A., Goueygou M., Buyle-Bodin F. (2004)**, *Generation of Rayleigh waves into mortar and concrete samples*, Ultrasonics, Vol 42, Issues 1-9, pp 395-402, 2004.
- Piwakowski B., Safinowski P. (2009)**, *Non-destructive non-contact air-coupled concrete evaluation by an ultrasound automated device*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, France, June 30th – July 3rd, pp. 603-608, 2009.
- Ploix M-A., Garnier V., Breysse D., Moysan J. (2009)**, *Possibilistic NDT data fusion for evaluationg concrete structures*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, June 30th – July 3rd, 348-354, France 2009.
- Popovics J. S. (1995)**, *Comment on “Determination of elastic constants of a concrete specimen using transient elastic waves”*, J. Acoust. Soc. Am. 98, 2142-2148 1995.
- Ranachowski Z. (1990)**, *Wyznaczanie naprężeń krytycznych w betonie przy pomocy zautomatyzowanych pomiarów metodą emisji akustycznej*, Praca doktorska, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1990.
- RAP 2010** *Nieinwazyjna Diagnostyka Penetracji Degradacji Materiałów Konstruktcyjnych* Raport merytoryczny z realizacji projektu badawczo rozwojowego Nr. R04 009 02 Bydgoszcz 2010.
- Rayleigh L. (1885)**, *On waves propagation along the plane surface of en elastic solid*, Proc. London Math. Soc., Vol. 17, 1885.
- Reichling K., Raupach M., Wiggerhauser H., Stoppel M., Dobmann G., Kurz J. (2009)**, *BETOSCAN – Robot controlled non-destructive diagnosis of reinforced concrete decks*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, June 30th – July 3rd, 425-439 , France 2009.
- Rihaczek A. W. (1969)**, *Principles of High-Resolution Radar*, McGraw-Hill, New Jork 1969.

- Rix G. J., Lai G. C. (2000)**, *In situ measurement of damping ratio using surface waves*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Processing of the ASCE, Vol. 126(5): 472-480, 2000.
- Runkiewicz L. (2002)**, *Badania Konstrukcji Żelbetowych*, Diagnostyka Techniczna wyd. Biuro Gamma. Warszawa 2002.
- Ryden N., Lowe M. J. S., Cawley P. (2009)** *Non-contact surface wave testing of pavements using a rolling microphone array*, pp. 561-566, [NDTCE'09]
- Safinowski P., Kosecki A., Piwakowski B. (2006)**, *Diagnostic of composites using ultrasonic waves*, *Papier invité*. Proceedings of Conference: Scientific and technical aspects in high performance sailing., pp 20 – 30, Barcelone 2006.
- Safinowski P., Piwakowski B., Kaczmarek M., Kosecki A., (2008)**, *Caractérisation du béton à l'aide de la réflectométrie ultrasonore*, COFREND 2008, Toulouse 20-23 mai 2008.
- Schabowicz K., Hoła J. (2008)**, *Nondestructive Elastic-Wave Tests of Post-tensioned Concrete Girders in Road Bridge*, 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 25-28 Oct 2008.
- Schevenels, M., Badsar, S., Degrande, G. (2009)**. *The use of the SASW method to determine the shear wave velocity and the material damping ratio of shallow soil layers*, 71st EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2009.
- SENSO (2009)**, *Projet ANR SENSO - Stratégie d'Evaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton - Rapport Final – Septembre 2009*, LMDC – Université de Toulouse 2009.
- Shannon C. E. (1949)**, *Communication in the presence of noise*, Proc. Institute of Radio Engineeris , Vol. 37, no. 1, pp. 10-21, Jan. 1949.
- Shiyan J. (2009)**, *Etude expérimentale des incertitude stochastiques pendant l'évaluation du béton à l'aide des ondes de surface ultrasonores*, Diplôme Master Ecole Centrale de Lille, 2009.
- Socco L. V., Boiero D. (2008)**, *Improved Monte Carlo inversion of surface wave data*, Geophysical Prospecting, Vol. 56, pp. 357-371, 2008.
- Stachurski A., Wierzbicki A. P. (1999)**, *Podstawy optymalizacji*, PWN Warszawa 1999.
- Stadnicki J. (2006)**, *Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji*, WNT Warszawa 2006.
- Szelążek J. (2001)** *Postępy w ultradźwiękowych badaniach naprężeń*, Praca habilitacyjna IPPT PAN 4/2001.

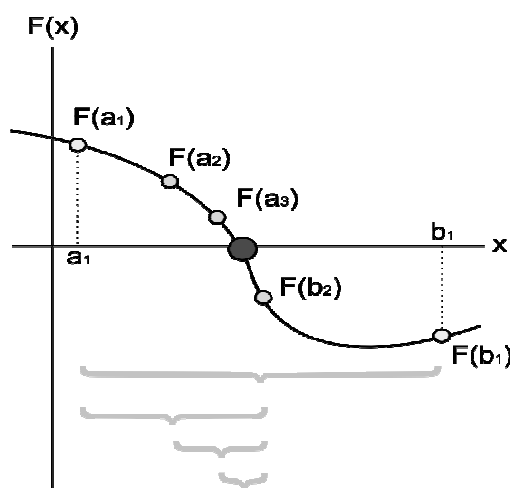
- Thomson W. T. (1950)**, *Transmission of elastic waves through a stratified solid medium*, J. Appl. Phys., Vol. 21, pp.89-93, 1950.
- Vardoulaskis I. (1981)**, *Surface waves in a half-space of submerged sand*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 9, 329-342, 1981.
- Vardoulakis I., Verros Ch. (1988)**, *Dispersion law of Rayleigh-type waves in a compressible Gibson half-space*, International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics, Vol. 12, 639-655, 1988.
- Viktorov I. A. (1967)**, *Rayleigh and Lamb Waves*, Plenum Press, New-York 1967.
- Villain G., Derobert X., Abraham O., Coffec O., Durand O., Laguerre L., Baltazart V. (2009)**, *Use of ultrasonic and electromagnetic NDT to evaluate durability monitoring parameters of concrete*, NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes, France, June 30th – July 3rd, 343-348, 2009.
- Wardany R., A. (2005)**, *Caractérisation non destructive des structures en béton au moyen des ondes dispersives de Rayleigh et de Lamb*, Thèse de doctorat (Ph :D) Spécialité: génie civil; Sherbrooke (Québec) Canada, 2005.
- Wathelet W., Jongmans D. Ohrnberger M. (2004)**, *Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements*, Near Surface Geophysics, pp. 211-221, 2004.
- Weil G. J., Malhotra V. M., Carino N.J. (1991)**, *Infrared Thermographic Techniques*, Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, pp. 253-274 CRC Press, Boca Raton, FL, 1991.
- Wu T.-T., Liu Y.-H. (1999)**, *Inverse determination of thickness and elastic properties of a bonding layer using laser-generated surface waves*, Ultrasonics 37 (1999) 23-30, 1999.
- Xia J., Miller R. D., Park Ch. B. (2006)**, *Estimation of shear wave velocity in a compressible Gibson half-space by inverting Rayleigh wave phase velocity*, Surveys in Geophysics Vol. 27: pp. 1-17, 2006.
- Yilmaz O. (1987)**, *Seismic Signal Processing*, Society of Exploration Geophysicists, 1987.
- Yang W. Y., Cao W., Chung T-S., Morris J. (2005)**, *Applied numerical methods using MATLAB*, A JOHN WILEY & SONS, INC., Publication 2005.
- Zhu, J. Y., Popovics, J. S. (2001)**, *Non-contact detection of surface waves in concrete using an air-coupled sensor*, in Review of Progress in QNDE, Vol. 20B, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, Melville, pp.1261-1268, New York 2001.

Zoubeir L., Guillaume R., Kaczmarek M., Skoczyla. F. (2007), *Experimental determination of intrinsic permeability of limestone and concrete: Comparison in situ and laboratory results*, Building and Environment (BEJ) Vol. 42 (8) pp. 3042-3050, 2007.

Aneks I Wybrane szczegóły metod optymalizacyjnych

Metoda bisekcji

Metoda równego podziału zwana również metodą Bisekcji jest prostym sposobem rozwiązywania równań nieliniowych. W metodzie wykorzystuje się twierdzenie Bolzano-Cauchy'ego, które mówi, że *jeśli ciągła funkcja $f(x)$ ma przeciwne znaki na końcach domkniętego przedziału $[a;b]$, to wewnątrz tego przedziału musi istnieć co najmniej jeden pierwiastek równania $f(x) = 0$* . Z powyższego twierdzenia wynikają dwa warunki konieczne. Po pierwsze funkcja $f(x)$ w wybranym przedziale domkniętym $[a;b]$ musi być ciągła i po drugie musi być spełniony iloczyn $f(a)f(b) < 0$. Graficzna ilustrację rozwiązywania równania nieliniowego za pomocą metody równego podziału pokazano na rysunku A1.1.



Rysunek A1.1 Graficzne przedstawienie działania metody równego podziału¹¹.

Działanie procedury jest następujące, przedział $[a;b]$ jest dzielony na pół w punkcie $x_1 = a + b/2$. Jeśli $f(x_1) = 0$, wówczas x_1 stanowi szukane rozwiązanie równania. W przeciwnym razie dotychczasowy przedział $[a;b]$ jest dzielony na dwa równe podprzedziały $[a;x_1]$ oraz $[x_1,b]$, i sprawdzany jest iloczyn $f(a)f(x_1)$ oraz $f(x_1)f(b)$. Jeśli istnieje chociaż jedno miejsce zerowe któryś z iloczynów przyjmie wartość ujemną. Jest on wówczas brany jako nowy przedział poszukiwań, w którym powtarzana jest procedura podziału. Istnieją dwa warunki zakończenia działania algorytmu. Jednym z nich jest znalezienie takiego x_n , dla którego spełnione jest równanie $f(x_n)=0$. Dużo częściej jednak algorytm kończy działanie po osiągnięciu odpowiednio małej wartości (przybliżenia pierwiastka) [Yang at al. 2005]. Algorytm bisekcji charakteryzuje się dużą szybkością

¹¹ Rysunek pochodzi ze źródła:

http://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Plik:Bisection_method.png&filetimestamp=20050826130956

działania, ale problem pojawia się, gdy funkcja celu posiada więcej niż jedno miejsce zerowe. Przykładowo, jeśli w wybranym przedziale znajdują się dwa przejścia przez zero, a co za tym idzie granice wybranego przedziału będą miały identyczny znak algorytm nie znajdzie rozwiązania. Pewne ograniczenie stosowania metody bisekcji stanowi fakt, że szuka ona przejść przez zero, a nie ekstremów funkcji, przez co w klasycznym podejściu do optymalizacji trzeba posługiwać się pochodną funkcji celu, a nie samą funkcją.

W prezentowanej pracy metodę bisekcji wykorzystano jedynie w rozwiązywaniu modelu wprost opartego na modelu Haskell'a opisanego w rozdziale II.1.2. Pozwala ona na szybkie wyznaczenie pierwiastków równania dyspersyjnego dla fal quasi-Reyleigha (wielu modów) przez wielokrotne rozwiązywanie równania dyspersyjnego dla całego zakresu częstotliwości. W środowisku Matlab istnieje wbudowana procedura poszukiwania miejsca zerowego funkcji nieliniowej o nazwie „fzero”. Niemniej jednak na potrzeby pracy został stworzony kod realizujący procedurę bisekcji. Działanie kodu zostało pomyślnie przetestowane poprzez porównanie wyników z metodą Symulowanego Wyżarzania realizującą to samo zadanie. Metoda bisekcji jest jednak w tym przypadku znacznie bardziej czasowo efektywna.

Metody gradientowe

Metody gradientowe zaliczane są do metod I rzędu w optymalizacji deterministycznej. Jedną z metod gradientowych jest metoda Newtona. Działanie procedury rozpoczyna się w wybranym przez użytkownika punkcie startowym x_0 należącym do dziedziny funkcji D , w którym obliczany jest kierunek poszukiwań reprezentowany przez wektor d_k . Punkty kolejnych iteracji obliczane są zgodnie z równaniem

$$x_{k+1} = x_k + d_k \quad (\text{A.1})$$

Jeśli nie zostały spełnione kryteria stopu algorytmu rozpoczyna się nowa iteracja i ponownie obliczany jest kierunek poszukiwań dla ostatnio ustalonego punktu x_{k+1} . Proces jest powtarzany aż do osiągnięcia jednego z kryteriów zakończenia. Kierunek poszukiwań minimum w metodzie Newtona jest obliczany przy użyciu rozwinięcia Taylora funkcji celu względem danego punktu x , zgodnie z równaniem.

$$f(x + \delta) = f(x) + \nabla f(x)^T \delta + \frac{1}{2} \delta^T \nabla^2 f(x) \delta + O(\delta^2) \quad (\text{A.2})$$

gdzie $\nabla f(x)$ oznacza gradient funkcji celu, $\nabla^2 f(x)$ jest macierzą Hessego (zwaną również Hesjanem), a składnik $O(\delta^2)$ to reszta o wielkości rzędu δ^2 . Zakładając, że

reszta w rozwiązaniu (A.2) jest pomijalnie mała można stosować aproksymację kwadratową funkcji celu F_k względem punktu x_k .

$$F_k(\delta) = f(x_k) + \nabla f(x_k)^T \delta + \frac{1}{2} \delta^T \nabla^2 f(x_k) \delta \quad (\text{A.3})$$

Wówczas kierunek poszukiwań można wyrazić zależnością:

$$d_k = \min_{\delta} F_k(\delta) = -\frac{\nabla f(x_k)}{\nabla^2 f(x_k)} \quad (\text{A.4})$$

Podstawienie (A.4) do (A.1) pozwala sformułować wzór rekurencyjny metody Newtona:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{\nabla f(x_k)}{\nabla^2 f(x_k)} \quad (\text{A.5})$$

W prezentowanej pracy jako algorytm podstawowy do rozwiązywania zagadnienia odwrotnego wykorzystuje się procedurę „*lsqnonlin*” (LSQ) dostępną w pakiecie funkcji optymalizacyjnych środowiska Matlab. Procedura ta jest z powodzeniem stosowana zarówno do rozwiązywania równania dyspersyjnego jak i identyfikacji parametrów przy badaniu współczynnika odbicia. Funkcja „*lsqnonlin*” jest bardzo często stosowana procedurą optymalizacyjną pozwalającą sprawnie ustalić minimum lokalne.

Procedura LSQ wymaga definiowania wektora \bar{C} będącego różnicą wartości eksperymentalnych V_E i przewidywań modelu V dla ustalonego wektora parametrów tego modelu P . Operację obliczenia normy Euklidesowej wektora \bar{C} , stanowiącej funkcję celu odbywa się wewnątrz procedury LSQ. Istnieje kilka warunków zakończenia optymalizacji, a ich konfigurację umożliwia funkcja „*optimset*”. Najbardziej istotnymi parametrami tej funkcji są:

‘*TolFun*’ – określa wartość minimum funkcji celu niezbędną do zakończenia poszukiwań.

Zakończenie procedury z tego powodu jest najkorzystniejsze, ponieważ gwarantuje osiągnięcie dopasowania z określoną dokładnością. Wartość tego parametru należy określić w oparciu o doświadczenie użytkownika. Głównymi czynnikami wpływającymi na jego wartość są jakość danych eksperymentalnych i rozdzielczość modelu. Dla ułatwienia można przyjąć wartość bardzo małą rzędu 10^{-2} i brać pod uwagę jakość dopasowania przedstawioną graficznie.

‘*DiffMinChange*’ – ustala jak małe zmiany funkcji celu są akceptowalne. Zatrzymanie z tego powodu może nastąpić w przypadku, gdy funkcja celu posiada dolinę z płaskim dnem, a zatem będzie istniało wiele kompletów parametrów dających

tą samą wartość funkcji celu. Przeprowadzone próby pokazały, że wartość tego parametru powinna być w zakresie 10^{-3} .

'*TolX*' – określa jaka może być minimalna zmiana parametrów modelu. Pozwala to zakończyć optymalizację w sytuacji, gdy wartość odnalezionego minimum nie spełnia kryterium '*TolFun*'. Taka sytuacja może wystąpić w przypadku, gdy dane eksperymentalne są obciążone szumem lub wykorzystywany model nie wymaga przyjęcia określonego przybliżenia, przez co niemożliwe jest idealne odwzorowanie. Zakończenie poszukiwań z tego powodu nie gwarantuje, że odnalezione minimum jest właściwe.

W zależności od konfiguracji funkcja może działać jako algorytm o dużej skali optymalizacji (Large-scale optimization) [Coleman 1994] lub jako algorytm o średniej skali optymalizacji (Medium-scale optimization) [Moré 1977]. W pierwszym przypadku wykorzystywana jest metoda Newtona pozwalającą na rozwiązywanie równań nieliniowych przy użyciu gradientów sprzężonych. Zaletą stosowania trybu optymalizacji o dużej skali w procedurze lsqnonlin jest łatwość definiowania granic poszukiwań dla całego wektora poszukiwanych parametrów. W przypadku optymalizacji w trybie średniej skali wprowadzanie granic zakresu poszukiwań jest dużo bardziej skomplikowane. Można to zrobić poprzez wprowadzenie odpowiednio sformułowanej funkcji kary dodanej do funkcji celu. Podstawowym warunkiem zakończenia obliczeń jest osiągnięcie zakładanej wartości minimum funkcji celu i zazwyczaj świadczy to o znalezieniu ekstremum globalnego, czyli najlepszego możliwego dopasowania. W przypadku danych rzeczywistych obciążonych szumem jest to warunek trudny do spełnienia, przez co zdarza się, że proces optymalizacji kończy się, ponieważ zmiany parametrów P są mniejsze niż ustalone w opcjach procedury. W takim wypadku istnieje ryzyko, że algorytm utknał w minimum lokalnym. Wówczas należy ustalić czy wartość osiągniętego minimum jest akceptowalna. Pomocne okazuje się graficzne przedstawienie dopasowania, które może sugerować ewentualne przedwczesne zakończenie obliczeń. Możliwa jest także sytuacja, że algorytm trafi na nieostre minimum, „wypłaszczenie” funkcji celu. W takiej sytuacji algorytm zakończy poszukiwania z powodu zerowych wartości gradientów. Jeszcze innym warunkiem zakończenia jest przekroczenie zakładanej liczby iteracji procedury lub liczby wywołań funkcji celu, co oznacza nieprawidłowe rozwiązanie zadania.

Metoda Simplex

Metoda Simplex lub Simpleksowa, znana także pod nazwą metody Nelder-Mead'a od nazwisk jej autorów należy do grupy metod bezpośrednich [Nelder i inni1966], to znaczy takich, które wykorzystują bezpośrednio funkcję celu, a nie jej pochodne. Jest to metoda optymalizacji lokalnej. Działanie metody nie wymaga liczenia pochodnych funkcji

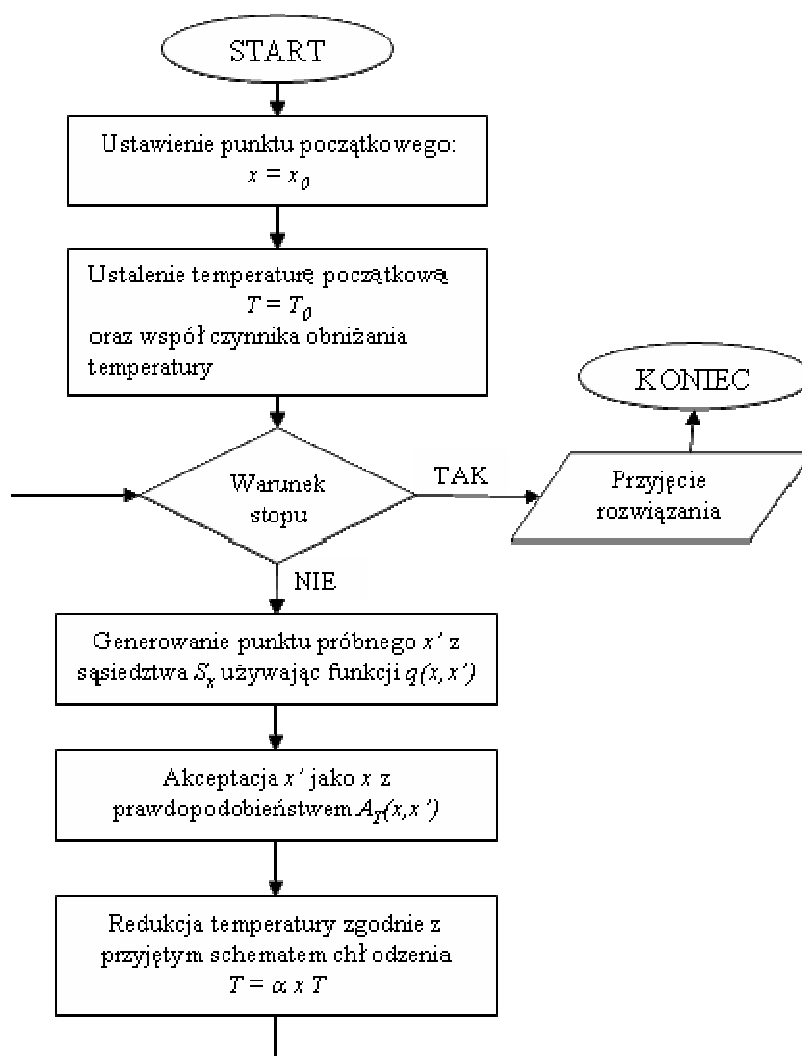
celu, dzięki czemu obliczenia nie są czasochłonne. Dla zagadnienia N -wymiarowego działanie procedury wymaga $N+1$ punktów w przestrzeni N -wymiarowej, na bazie których można zbudować najprostszą figurę geometryczną w tej przestrzeni (nazywaną simpleksem). Zatem w rozwiązywaniu problemów jednowymiarowych będzie to odcinek, dla problemów dwuwymiarowych trójkąt itd. Proces szukania minimum polega na wyznaczeniu nowego punktu wierzchołka simpleksa poprzez odbicie najwyżej położonego punktu względem przeciwległej ściany (punktu w przypadku odcinka). Dodatkowo procedura może zmniejszać lub powiększać nowo powstały simpleks, aby szybciej dochodzić do minimum funkcji. Simpleks staje się coraz mniejszy zbliżając się do minimum. Optymalizacja kończy się, gdy rozmiary simpleksa będą mniejsze niż przyjęte rozmiary graniczne. W środowisku Matlab metoda Simplex jest zaimplementowana w funkcji „*fminsearch*”.

Metoda Symulowanego Wyżarzania

Jedną ze stosowanych w pracy metod optymalizacji globalnych jest metoda Symulowanego Wyżarzania ang. Simulated Annealing (SA) opublikowana w 1983 roku, której autorami są S. Kirkpatrick, Ch. Galett oraz M. Vecchiego [S. Kirkpatrick at all. 1983]. Działanie metody można porównać z operacją ulepszenia cieplnego metali, w której poprzez wyżarzanie redukuje się naprężenia wewnętrzne powstałe na skutek gwałtownego hartowania. W metodzie SA zachodzi analogia pomiędzy energią atomów ulepszanego metalu a funkcją celu, zaś dochodzenie do minimum funkcji celu można porównać do swobodnego stygnięcia obrabianego metalu. Do niewątpliwych zalet należy fakt, że funkcja celu nie musi być różniczkowalna ani nawet ciągła. Wadą metody jest dość duża czasochłonność w dochodzeniu do rozwiązania.

Przykładowy schemat działania algorytmu SA pokazano na rysunku A1.2. Jego działanie rozpoczyna się od wybrania punktu startowego z obszaru poszukiwań oraz ustalenia parametrów pracy algorytmu, takich jak temperatura początkowa, współczynnik obniżania temperatury czy model schładzania. Wartość temperatury odpowiada prawdopodobieństwu, z jakim będą akceptowane początkowe punkty próbne. Im wyższa temperatura tym wyższe prawdopodobieństwo akceptacji. Z obszaru wokół ostatniego najlepszego rozwiązania (przy pierwszej iteracji będzie to punkt startowy) losowany jest nowy sąsiad (nowy zbiór szukanych parametrów), jeśli wartość funkcji celu dla nowego punktu jest wyższa niż dla punktu poprzedniego, wówczas jest on zapisywany jako kandydat na nowe rozwiązanie. Następnie dla nowego punktu liczona jest funkcja akceptacji, która zależy od wartości funkcji celu dla rozwiązania starego i nowego oraz od temperatury odpowiadającej danej iteracji. Funkcja akceptacji określa czy poszukiwanie nowego sąsiada w kolejnej iteracji rozpocznie się od starego czy od nowego rozwiązania.

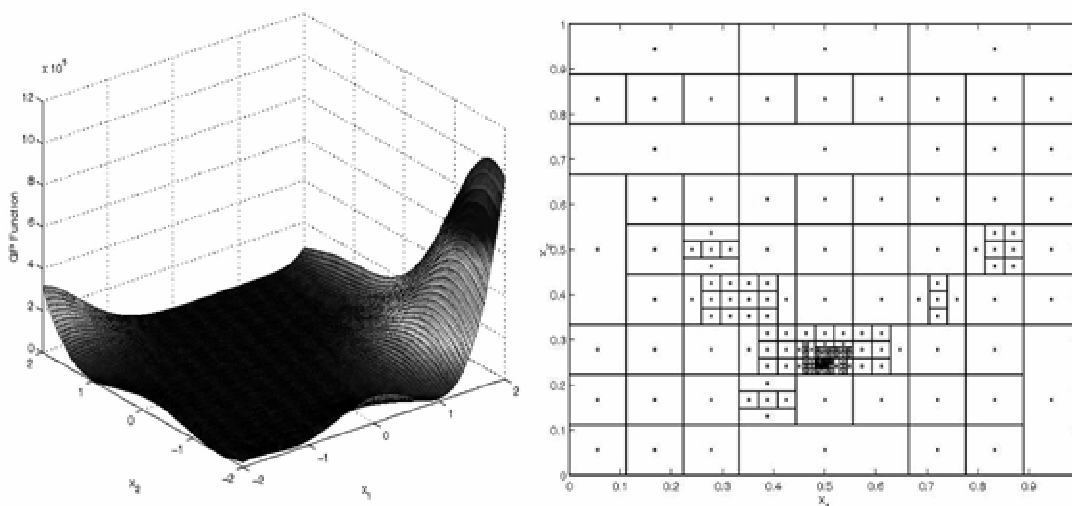
Warto zauważyć, że im niższa temperatura, tym mniejsze prawdopodobieństwo zmiany punktu startowego dla poszukiwania nowego rozwiązania. Wartość temperatury jest obniżana po każdej iteracji, a zatem na początku pracy algorytmu punkt startowy jest często zmieniany, zaś pod koniec przy niskiej temperaturze pozostaje niezmienny. Taka sytuacja sprawia, że algorytm SA im bliżej końca to działa bardziej lokalnie niż na początku, gdy temperatura była wysoka. Zakończenie pojedynczej iteracji następuje po znalezieniu zakładanej liczby sąsiadów. Nowa iteracja rozpoczyna się ze z obniżoną temperaturą. Za sposób obniżania temperatury odpowiada przyjęty model chłodzenia. W powszechnym użyciu spotyka się kilka różnych mechanizmów chłodzenia. W większości rozwiązań z każdą iteracją temperatura jest coraz niższa, choć stosuje się czasem metody oscylacyjne. Algorytm kończy działanie, gdy wartość funkcji celu spadnie poniżej założonego poziomu lub, gdy osiągnięta będzie dolna granica temperatury.



Rysunek A1.2 Schemat działania metody Symulowanego Wyżarzania.

Metoda DIRECT

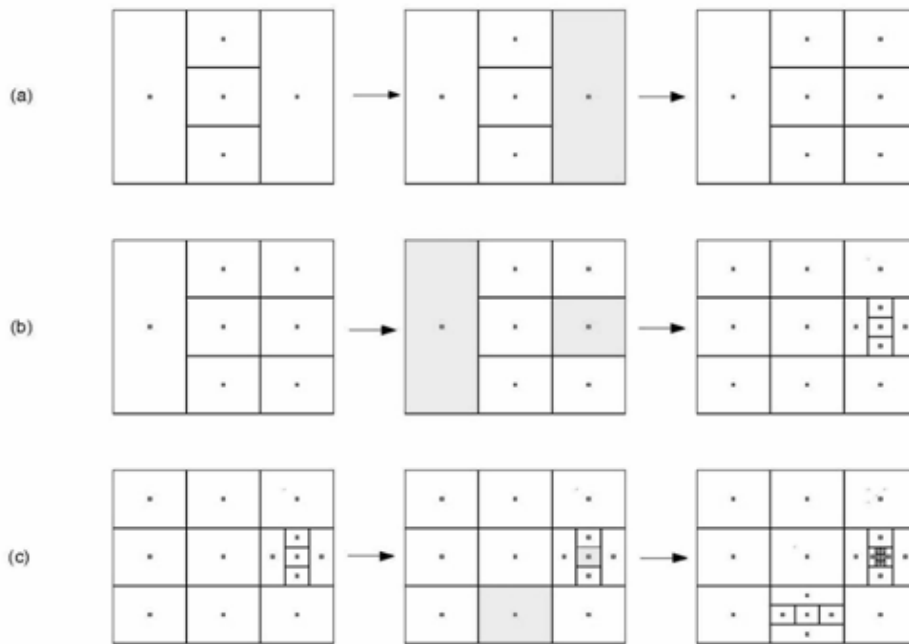
Algorytm optymalizacyjny o nazwie DIRECT należy do grupy algorytmów o działaniu globalnym. Po raz pierwszy pojawił się w pracy Pettunen'a [Pettunen i inni 1993]. Przeznaczeniem algorytmu było rozwiązywanie problemów optymalizacji globalnej z określonymi ograniczeniami parametrów oraz funkcją celu o wartościach rzeczywistych. Nazwa DIRECT pochodzi od wyrażenia „**DI**viding **RECT**angles” (dzielenie prostokątów) i opisuje, w jaki sposób algorytm dochodzi do minimum funkcji celu. DIRECT jest algorytmem bezpośrednim, a zatem podobnie jak SA nie wymaga znajomości gradientów funkcji celu. Tego typu algorytmy dobrze sprawdzają się w sytuacjach, gdy nic nie wiadomo na temat funkcji celu i należy ją traktować jako „czarną skrzynkę”. Przykład zastosowania algorytmu do rozwiązywania rzeczywistych problemów w przemyśle pokazano między innymi w pracy Carter'a [Carter i inni 2002]. Działanie algorytmu polega na dzieleniu przestrzeni poszukiwań na coraz mniejsze podprzestrzenie, w zagadnieniu dwuwymiarowym będzie to dokładnie dzielenie prostokąta na coraz mniejsze prostokąty. W każdej iteracji wybrane prostokąty dzielone są na trzy równe części i dla każdej z nich wyznaczany jest środek ciężkości, dla którego obliczana jest wartość funkcji celu. Po podziale następuje wybór potencjalnie optymalnych prostokątów. Jako kryteria wyboru brane są pod uwagę wartość funkcji celu dla środka ciężkości oraz rozmiar prostokąta.



Rysunek A1.3 Graficzne odwzorowanie podziału przestrzeni poszukiwań w Metodzie DIRECT (po prawej) zrealizowane na przykładzie testowej funkcji „Goldenstein-Price (po lewej) [Finkel 2003].

Możliwe jest, że więcej niż jeden prostokąt spełni kryteria wyboru. Wszystkie potencjalnie optymalne prostokąty są dzielone na trzy równe części wzdłuż dłuższego boku, co kończy daną iterację. Procedura jest powtarzana aż do wyczerpania ustalonej liczby iteracji lub osiągnięcia wartości funkcji celu mniejszej niż przyjęty próg. Graficzne

przedstawienie działania Metody DIRECT przy poszukiwaniu minimum funkcji testowej „Goldenstain-Price” pokazano na rysunkach A1.3 i A1.4.



Rysunek A1.4 Kilka wybranych iteracji w Metodzie DIRECT [Finkel 2003].

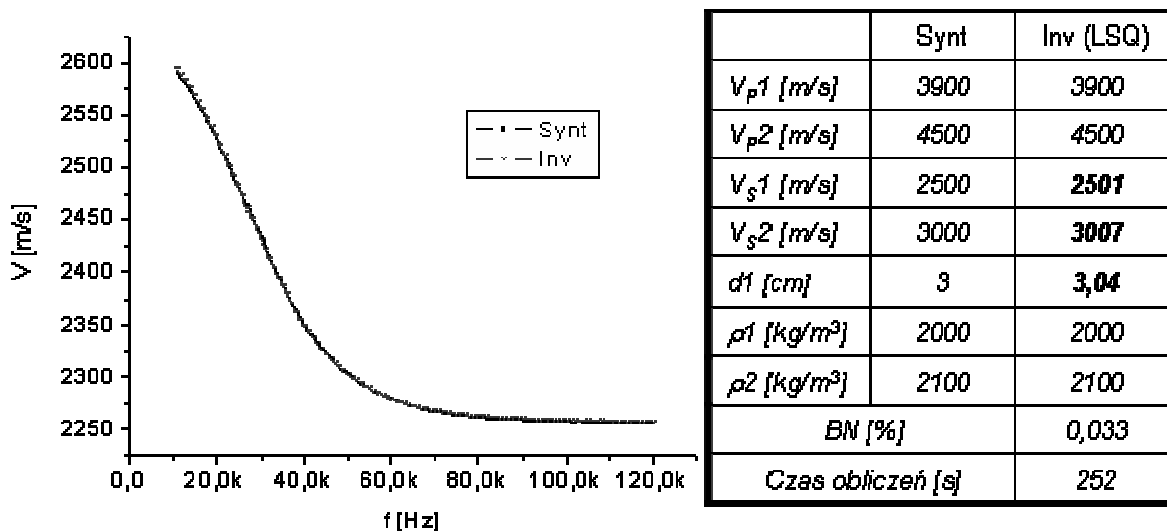
Aneks II Szczegóły identyfikacji przy użyciu modelu Haskella z danymi syntetycznymi

W celu testowania opracowanych procedury identyfikacyjnej parametrów modelu Haskella rozpatrzono konfigurację z dwiema oraz trzema warstwami (licząc z półprzestrzenią). W najprostszym przypadku układu niejednorodnego o dwóch warstwach zredukowano liczbę szukanych parametrów do trzech, tj. prędkości fali poprzecznej dla dwóch warstw oraz grubości pierwszej warstwy. Pozostałe parametry przyjęto jako stałe. Dyspersyjne krzywe syntetyczne wygenerowano przy użyciu tego samego modelu (modelu Haskella), do którego odwołuje się procedura optymalizacyjna. We wszystkich przedstawionych przykładach przyjęto rozdzielczość 1 kHz dla skali częstotliwości.

Identyfikacja procedurą LSQ dla modelu w konfiguracji 2 warstwy 3 parametry (2w3p)

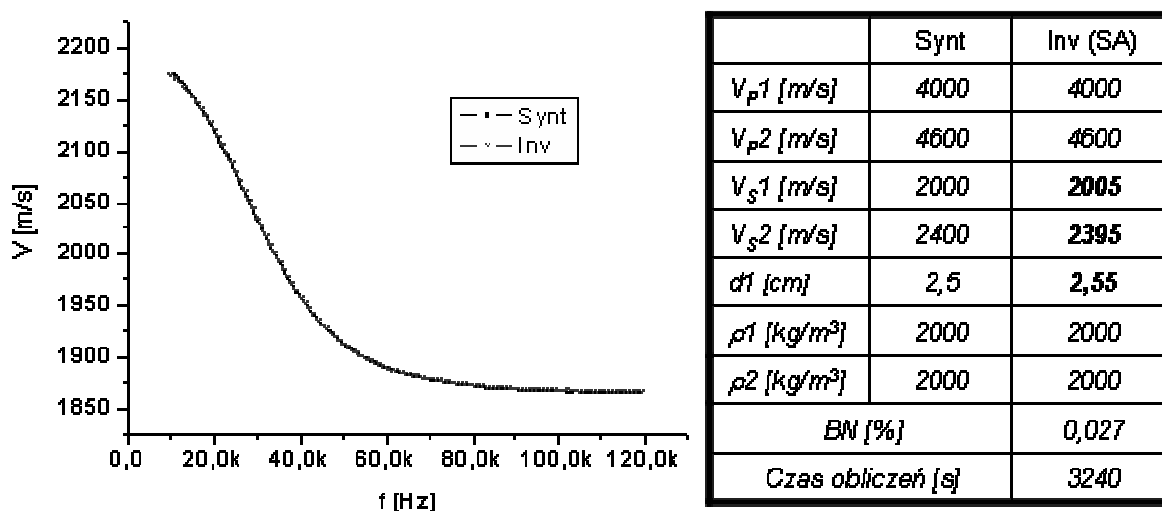
Graficzny rezultat identyfikacji pokazuje wykres na rysunku A2.1, zaś wartości liczbowe zamieszczono w tabeli, gdzie *Synt* – oznacza dane syntetyczne, zaś *Inv* – dane uzyskane po odwracaniu, liczby przy poszczególnych parametrach oznaczają numer warstwy np. V_{s2} to prędkość poprzeczna fali w drugiej warstwie. Identyfikacji podlegały wartości zapisane czcionką pogrubioną.

Liczbowa wartość funkcji błędu w minimum wynosi $46,5$, co daje błąd znormalizowany BN rzędu $0,033\%$ (zgodnie z równaniem IV.2), pomimo że idealne dopasowanie powinno dać wartość 0 . Należy zaznaczyć, że nawet dla tak małej liczby zmiennych algorytm nie zawsze odnajduje właściwe rozwiązania, a pokazany rezultat jest najlepszym z kilkunastu przeprowadzonych prób. Zauważono poza tym, że przy poszukiwaniu trzech parametrów większość uzyskanych rozwiązań można uznać za poprawne (bliskie przybliżenie krzywej syntetycznej) pomimo, że odpowiadają im różne błędy dopasowania krzywych. Niewątpliwą zaletą tej procedury jest względnie krótki czas realizacji obliczeń, który w tym wypadku wyniósł około $4,2$ minuty.



Rysunek A2.1 Przykład zastosowania procedury identyfikacji z użyciem procedury LSQ dla danych syntetycznych i modelu w konfiguracji 2 warstwy 3 parametry.

Identyfikacja procedurą SA dla modelu w konfiguracji 2 warstwy 3 parametry (2w3p)



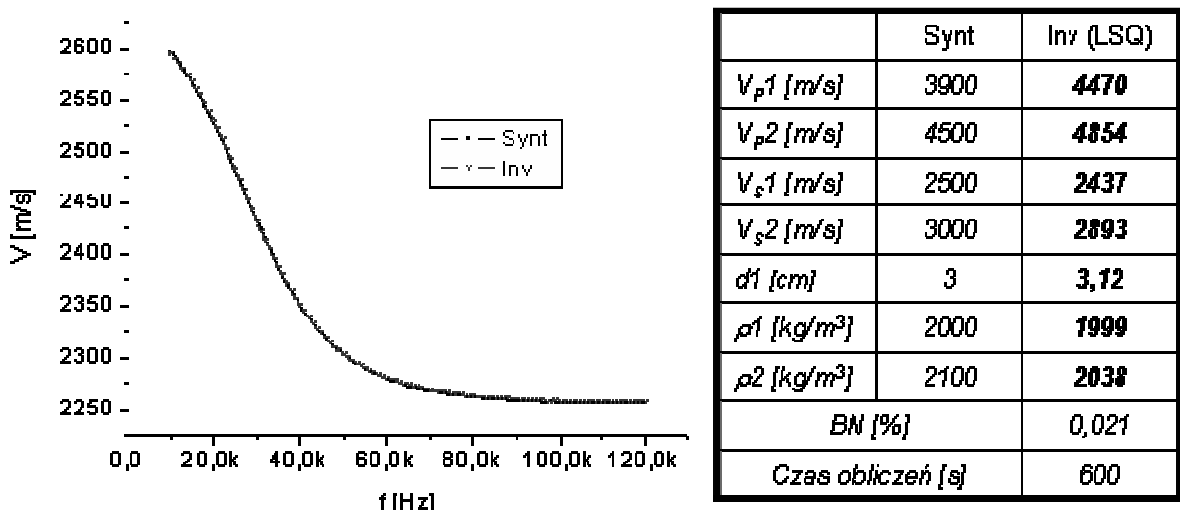
Rysunek A2.2 Przykład zastosowania procedury identyfikacji z użyciem procedury SA dla danych syntetycznych i modelu w konfiguracji 2 warstwy 3 parametry.

W celu porównania zastosowania procedury optymalizacji lokalnej z optymalizacją globalną dla identyfikacji parametrów to samo zadanie zostało rozwiązane za pomocą procedury Symulowanego Wyżarzania. Dopasowanie charakterystyk dyspersyjnych wraz z uzyskanymi wartościami parametrów pokazano na rysunku A2.2. Wartość minimum funkcji celu jest zbliżona do wyniku dla procedury lokalnej i wynosi 58,5 co daje błąd dopasowania rzędu 0,027 %. Wadą obliczeń procedur globalnych jest stosunkowo długi

czas realizacji zadań, który wyniósł 54 minuty, czyli dziesięciokrotnie dłużej niż w przypadku procedury LSQ. Do obliczeń użyto tego samego komputera.

Identyfikacja procedurą LSQ dla modelu w konfiguracji 2 warstwy 7 parametrów (2w7p)

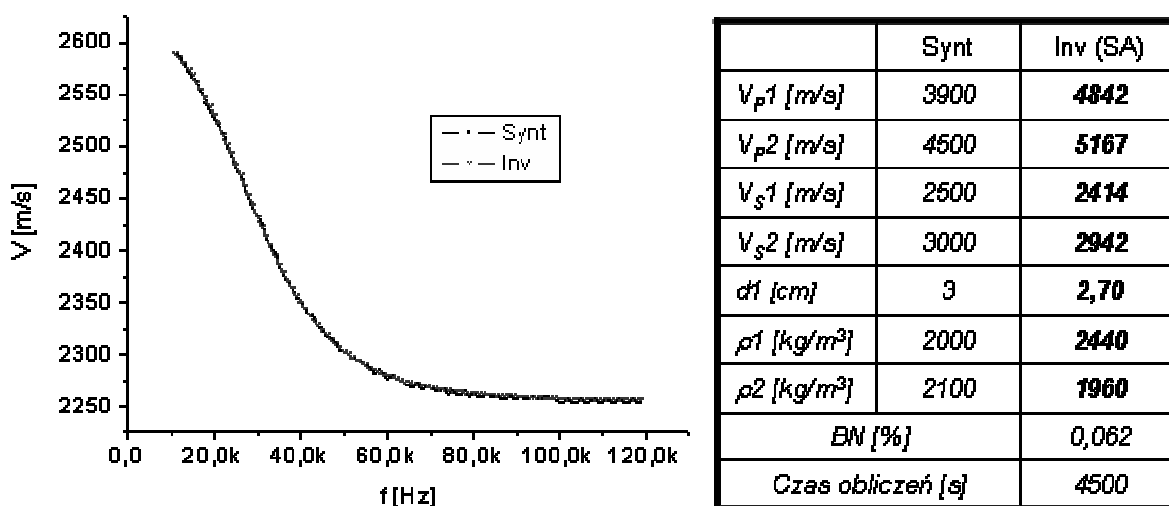
Ograniczenie liczby poszukiwanych parametrów przyspiesza działanie procedury identyfikacji, ale w warunkach rzeczywistych wymaga to znajomości lub przybliżenia wartości pewnej grupy parametrów. Jeśli przybliżenie to będzie błędne procedura identyfikacji może nie znaleźć właściwego rozwiązania. W poniższym teście przeprowadzono identyfikację wszystkich siedmiu parametrów modelu dla struktury dwuwarstwowej. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o metodę LSQ. Rezultaty dopasowania pokazano na rysunku A2.3. Porównując poszczególne parametry można stwierdzić, iż najgorsze dopasowanie otrzymano dla prędkości fal podłużnych. Potwierdza to rezultaty badań wrażliwości modelu Haskella opisane w rozdziale II.1.3. Należy pamiętać, że większa liczba zmiennych optymalizacji zwiększa istotnie niejednoznaczność rozwiązania. Warto zauważyć fakt, że zarówno prędkości fali poprzecznej jak i grubość warstwy zostały względnie dobrze zidentyfikowane. Wartość odnalezionego minimum funkcji celu jest porównywalny z wynikami uzyskanymi w poprzednich przykładach i wynosi 71,25 co daje błąd dopasowania 0,021 %. Czas obliczeń w stosunku do modelu trójparametrowego wydłużył się do ponad 10 min.



Rysunek A2.3 Przykład zastosowanie procedury identyfikacji z użyciem metody LSQ dla danych syntetycznych i modelu w konfiguracji 2 warstwy 7 parametrów.

Identyfikacja procedurą SA dla modelu w konfiguracji 2 warstwy 7 parametrów (2w7p)

Wyniki uzyskane dla identyfikacji siedmiu parametrów procedurą Symulowanego Wyżarzania są nieco gorsze niżeli procedurą LSQ. Podobnie jak poprzednio duże rozbieżności towarzyszą znalezionym prędkościom propagacji fal podłużnych oraz gęstości. Zamieszczony przykład charakteryzuje się kilkukrotnie większą wartością odnalezionego minimum funkcji celu równą 355, co daje błąd dopasowania rzędu 0,062 %. Stąd też większe rozbieżności w zidentyfikowanych parametrach. Czas potrzebny na przeprowadzenie identyfikacji w tym wypadku wyniósł prawie 75 min czyli ponad siedmiokrotnie dłużej niż w przypadku stosowania procedury LSQ dla tego samego zadania.

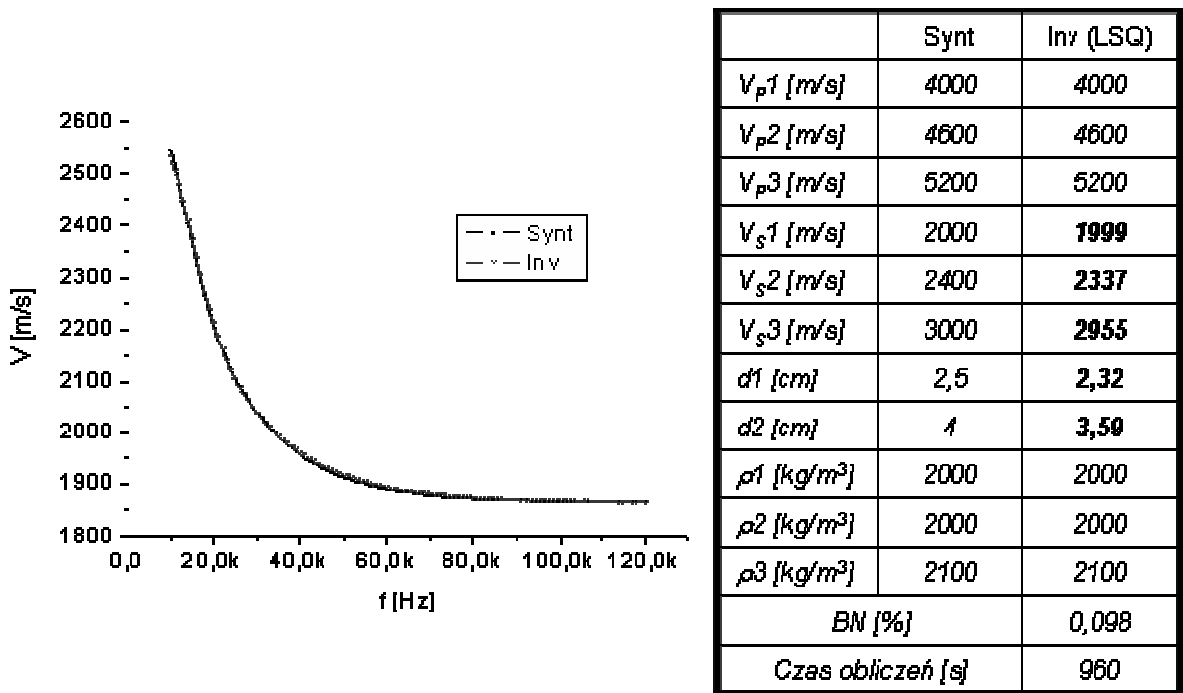


Rysunek A2.4 Przykład zastosowanie procedury identyfikacji z użyciem procedury SA dla danych syntetycznych i modelu w konfiguracji 2 warstwy 7 parametrów.

Identyfikacja procedurą LSQ dla modelu w konfiguracji 3 warstwy 5 parametrów (3w5p)

Kolejny test procedury optymalizacyjnej przeprowadzono na modelu trójwarstwowym przy poszukiwaniu 5 parametrów. Do identyfikacji przyjęto wartości prędkości propagacji fal poprzecznych w poszczególnych warstwach oraz grubości tychże warstw. Otrzymane rezultaty dopasowania krzywych oraz ustalonych parametrów pokazano na rysunku A2.5. Znormalizowany błąd dopasowania w tym przypadku wyniósł 0,098 %, czyli prawie trzykrotnie więcej niż w modelu dwuwarstwowym. Mimo to porównując wyniki identyfikacji z syntetycznymi widać dobrą zgodność, zwłaszcza dla prędkości fal poprzecznych poszczególnych warstw. Identyfikacja grubości warstw została także ustalona ze stosunkowo małym błędem. Czas obliczeń w tym przypadku wyniósł 16

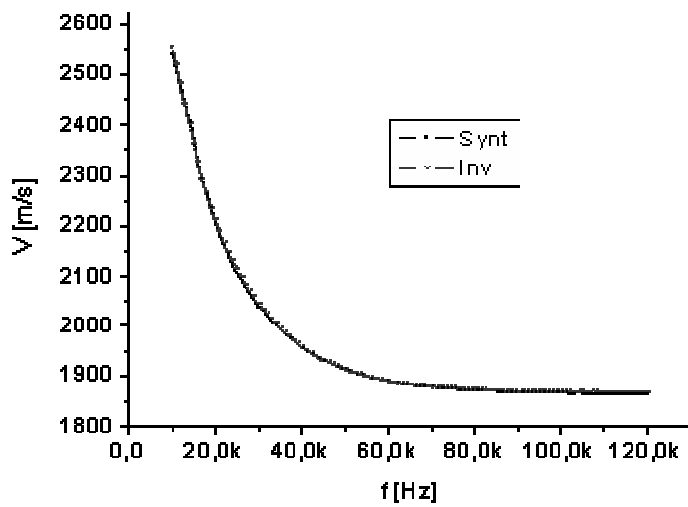
minut, czyli prawie 4 razy dłużej niż w przypadku modelu dwuwarstwowego z trzema szukanymi parametrami.



Rysunek A2.5 Przykład zastosowanie procedury identyfikacji z użyciem metody LSQ dla danych syntetycznych i modelu w konfiguracji 3 warstwy 5 parametrów.

Identyfikacja procedurą SA dla modelu w konfiguracji 3 warstwy 5 parametrów (3w5p)

Postępując podobnie jak poprzednio procedurę identyfikacji dla modelu trójwarstwowego z pięcioma szukanymi parametrami przeprowadzono z wykorzystaniem procedury SA. Otrzymane dopasowanie wraz z uzyskanymi parametrami pokazano na rysunku A2.6. Charakteryzuje je stosunkowo mała wartość funkcji celu równa 178,5 co daje błąd dopasowania na poziomie 0,082 %. Czas obliczeń dla tego przykładu wyniósł 97 minut, czyli ponad sześciokrotnie dłużej niż w przypadku procedury LSQ. Należy zaznaczyć, że nie za każdym razem osiągnano dobre dopasowanie, co potwierdza tezę, że także algorytmy o działaniu globalnym nie gwarantują uzyskania poprawnego rezultatu.



	Synt	Inv (SA)
V_{p1} [m/s]	4000	4000
V_{p2} [m/s]	4600	4600
V_{p3} [m/s]	5200	5200
V_{s1} [m/s]	2000	2001
V_{s2} [m/s]	2400	2459
V_{s3} [m/s]	3000	3052
$d1$ [cm]	2,5	2,63
$d2$ [cm]	4	4,56
ρ_1 [kg/m ³]	2000	2000
ρ_2 [kg/m ³]	2000	2000
ρ_3 [kg/m ³]	2100	2100
BN [%]		0,082
Czas obliczeń [s]		5820

Rysunek A2.6 Przykład zastosowanie procedury identyfikacji z użyciem procedury SA dla danych syntetycznych i modelu w konfiguracji 3 warstwy 5 parametrów.