

1. Wprowadzenie

Hałas zaliczany jest do czynników wpływających na zanieczyszczenie środowiska, w którym żyjemy, i kwalifikuje się do tej samej grupy zanieczyszczeń, co odpady przemysłowe oraz gazy emitowane do atmosfery. Długotrwała ekspozycja na hałas o poziomie od 35 dB do 70 dB (skorygowanych charakterystyką częstotliwościową A [dB]) ujemnie wpływa na ludzki organizm, powodując spadek czułości wzroku lub wzrost zmęczenia układu nerwowego [20]. W wyniku oddziaływania hałasu stopniowo zwiększa się zmęczenie, wydłuża się czas reakcji prostych i złożonych, a zwłaszcza czas podejmowania decyzji. Długotrwałe wystawienie na hałas, jaki obecny jest w kabinach samochodów, może mieć również inne konsekwencje – negatywnie wpływa na orientację w przestrzeni, poczucie bezpieczeństwa oraz może powodować nadpobudliwość. Według Alberta R. George’a [25] poziom hałasu powyżej 70 dB w czasie długich podróży samochodem jest męczący (w tab. 1.1 przedstawione zostały poziomy hałasu we wnętrzu pojazdu podczas jazdy dla różnych typów samochodów osobowych), a zmęczenie kierowcy jest częstą przyczyną wypadków drogowych. Wyciszenie wnętrza może więc znacząco wpłynąć na poprawę komfortu i bezpieczeństwa jazdy.

Tab. 1.1. Rzeczywiste poziomy dźwięku A zmierzone w różnych samochodach podczas jazdy



MODEL	Toyota Hiace	Nissan Micra K11	Nissan Micra K12	Ford Sierra	Nissan 200SX
TYP	osobowo-towarowy	miejski	miejski	rodzinny	sportowy
PALIWO	olej napędowy	benzyna	benzyna	gaz LPG	benzyna
60 km/h na III biegu	70	66,1	65,6	68	69,2
100 km/h na IV biegu	77	70,7	69,9	75	73,6
na postoju, 3700 obr/min	67	64	62,1	74	70,1
wg PN-90/S-04052 [100]	78	69,8	68,4	79	80,7

poziom dźwięku A

Obniżenie poziomu dźwięku w kabinie metodami klasycznymi można osiągnąć w dwojaki sposób: zmniejszając emisję ze źródła dźwięku lub poprawiając izolację akustyczną pasażerów od źródła hałasu. Pierwsza metoda jest trudna do zrealizowania w samochodach, ponieważ hałas wywołują głównie zjawiska fizyczne wprawiające je w ruch. Wprawdzie zjawiskami tymi można tak sterować, aby zmniejszyć poziom emitowanych dźwięków, ale nie da się ich całkowicie wyeliminować. Z tego powodu więcej uwagi poświęca się poprawie właściwości akustycznych pojazdu przez zastosowanie materiałów powstrzymujących transmisję energii wibroakustycznej z jej źródła do wnętrza pojazdu. Ze względu na specyfikę konstrukcji samochodu, aby takie materiały okazały się skuteczne, muszą mieć stosunkowo dużą masę. W samochodzie jest bardzo dużo komponentów, które oprócz izolowania lub tłumienia tej energii, pełnią również wiele innych funkcji. Ciągłe jednak jest sporo elementów, których jedynym zadaniem jest poprawa warunków akustycznych w kabinie. W obecnie produkowanych pojazdach masa tych ostatnich waha się od 30 kg w małych samochodach do 60 kg w limuzynie średniej klasy [72]. W luk-

susowych pojazdach, takich jak Mercedes S-klase, masa zastosowanych materiałów tłumiących hałas dochodzi nawet do 200 kg [92].

Stosowanie ciężkich części ma wiele konsekwencji. Pomijając względy technologiczne (masa deski rozdzielczej może wynosić nawet 20 kg, więc do jej montażu potrzebne są dwie osoby) i inne pośrednie komplikacje związane z produkcją, najważniejszym problemem jest spadek osiągnięć pojazdu. Z podstawowych można wymienić wzrost zużycia paliwa, spadek przyspieszenia i prędkości maksymalnej. Stąd inżynierowie z działów NVH (ang. *Noise, Vibration and Harshness*) często muszą iść na kompromis w stosowanych rozwiązaniach. Klienci salonów samochodowych chcą cichych pojazdów, ale z drugiej strony oczekują też samochodów szybkich i oszczędnych.

Z przedstawionego stanu rzeczy wynika zainteresowanie badaczy aktywnymi metodami redukcji hałasów we wnętrzu samochodu osobowego. W porównaniu z metodami pasywnymi, charakteryzują się dużo większą skutecznością w zakresie częstotliwości, w którym mieści się większość emitowanej w pojeździe energii akustycznej. W odróżnieniu od metod pasywnych, w których mamy do czynienia z dysypacją energii wibroakustycznej, w aktywnych energia ta jest wyłącznie transferowana do innych punktów układu (w tym celu trzeba doprowadzić dodatkową energię z zewnątrz). Z tego powodu trzeba się liczyć z tym, że obniżając poziom dźwięku w jednym miejscu, następuje zwiększenie jego poziomu w innym. Dlatego popularna nazwa „aktywne tłumienie hałasu” nie jest prawidłowa i według autorów [19, 21] powinno się stosować nazwę „metoda aktywnej redukcji hałasu” (ARH). W dalszej części publikacji przyjęto właśnie takie nazewnictwo.

Pierwsze koncepcje aktywnych metod redukcji hałasu powstały na początku lat 30. XX wieku. Ale dopiero gwałtowny rozwój technologii cyfrowych w latach 70. spowodował, że pojawiły się rozwiązania, które znalazły praktyczne zastosowanie. Z kolei koniec lat 80. przyniósł pierwsze próby wdrożenia metod aktywnych obniżania poziomu hałasu we wnętrzu wszelkiego rodzaju pojazdów, w tym między innymi samochodów. Postęp w stosowaniu metod aktywnych jest ściśle związany z rozwojem metod przetwarzania i obróbki sygnałów (rozumianych zarówno jako nieustający wzrost mocy obliczeniowej, jak i rozdzielczości przetworników analogowo-cyfrowych oraz doskonalenie przetworników sygnałów nieelektrycznych). Ograniczona moc obliczeniowa stosowanych dotychczas sterowników powodowała, że jako górną granicę stosowania metod aktywnych przyjęto 100 Hz. Ogromny postęp w rozwoju techniki cyfrowej sprawił jednak, że granicę tę można przesunąć i aplikacje, których jeszcze niedawno nie udało się zrealizować, obecnie wydają się być realne. Fakt ten umożliwia rozszerzenie wykorzystania metod aktywnych redukcji hałasu na obszary, w których dotychczas nie były one stosowane.

Jednym z mankamentów układów aktywnej kompensacji dźwięku były spore gabaryty przetworników elektroakustycznych potrzebnych do wytworzenia fali dźwiękowej o odpowiednim natężeniu. W samochodzie problem ten można rozwiązać, wykorzystując pokładowy system audio jako źródło fali kompensującej. Producenti już wyposażają samochody, zwłaszcza te luksusowe, w układy aktywnej redukcji hałasu (przykładem może być Honda Legend lub najnowszy model Infiniti M [99, 102]). W rzeczywistości działanie tych systemów ogranicza się jedynie do kompensacji hałasu silnika, czyli częstotliwości obrotowej i jej kolejnych składo-

wych harmonicznych. Nie powinny więc być nazywane układami aktywnej redukcji hałasu. Zresztą w specjalistycznych opracowaniach te same systemy nazywane są przez producenta Engine Harmonic Cancellation (EHC) [97, 91]. W zasadzie wszystkie układy bazujące na analitycznej syntezie sygnału kompensującego narażone są na pominięcie istotnych źródeł hałasu. W przypadku samochodu kompensacja wyłącznie hałasu silnika pomija dwa inne istotne źródła dźwięków, jakimi są opływ powietrza i toczenie kół po nawierzchni. Wydaje się jednak, że obecnie można podejść do zagadnienia globalnie, próbując zbudować układ aktywnej redukcji hałasu, uwzględniający wszystkie jego źródła w pojeździe.

Jeżeli jako część systemu aktywnej redukcji hałasu wykorzysta się komponenty audio, które w obecnie sprzedawanych pojazdach są instalowane fabrycznie, to masa dodana będzie sumą mas sterownika mikroprocesorowego i odpowiednich czujników. Jednocześnie masa komponentów potrzebnych do funkcjonowania systemu jest nieporównywalnie mniejsza od masy materiałów wygłuszających, które należałoby zainstalować w pojeździe, by uzyskać komfort akustyczny na podobnym poziomie. Oczywiście, wymagania stawiane elementom systemów aktywnej redukcji hałasu są wyższe niż typowym fabrycznym systemom audio, ale obecne trendy rynkowe powodują, że sprawność akustyczna tych ostatnich stale się poprawia.

Niniejsze opracowanie zawiera przegląd najważniejszych zagadnień, z którymi zetknie się badacz, który postawi sobie za cel zbudowanie systemu aktywnej redukcji hałasu w samochodzie. Źródłem przedstawionej wiedzy są artykuły i wystąpienia najważniejszych autorytetów zajmujących się tą tematyką, publikowanych w czasopismach i prezentowanych na konferencjach poświęconych aktywnej redukcji hałasu. Przede wszystkim jednak opisane są doświadczenia zebrane w czasie wielu lat moich badań. Zaprezentowane wyniki eksperymentów są efektem prac badawczych prowadzonych w trakcie przygotowywania rozprawy doktorskiej [77].

W tym miejscu pragnę złożyć podziękowania mojej *alma mater* – Politechnice Warszawskiej, a w szczególności Pracowni Wibroakustyki Instytutu Podstaw Budowy Maszyn, w której zostały wykonane przedstawione badania.

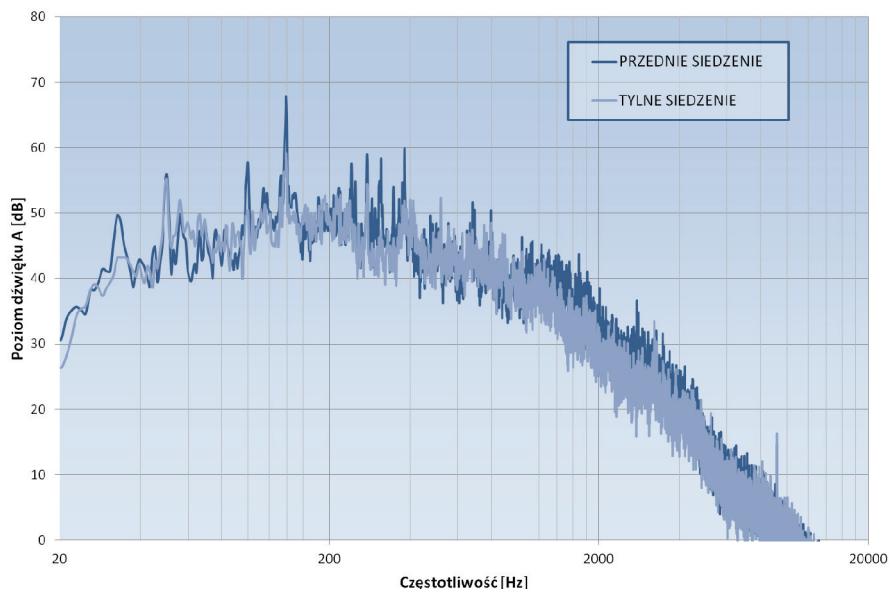
2. Charakterystyka hałasu w samochodzie osobowym

2.1. Klasyfikacja środowiska akustycznego

W zasadzie hałas wszystkich pojazdów napędzanych energią mechaniczną jest podobny. Nawet kilkuletnie dziecko jest w stanie bezbłędnie naśladować odgłosy samochodu. Dlatego oprócz mierzenia ogólnego poziomu dźwięku konieczne jest poznanie jego rozkładu w dziedzinie częstotliwości – dźwięki o tych samych poziomach mogą być w różnym stopniu uciążliwe, w zależności od rozkładu ich widma częstotliwości. To właśnie różnice w amplitudach poszczególnych składowych, a przede wszystkim różnice fazowe powodują, że każdym samochód brzmi inaczej. Dla celów naukowych analiza hałasu wytwarzanego przez samochód musi być wykonana jeszcze dokładniej. Dźwięki słyszane w kabinie pojazdu spalinowego zostały sklasyfikowane następująco:

Quasi-stacjonarne (w trakcie jazdy ze stałą prędkością)

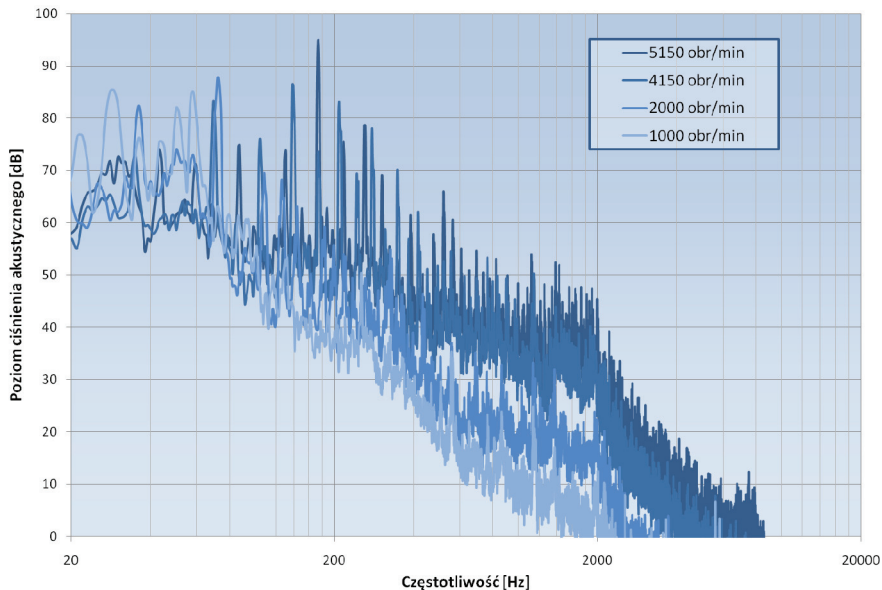
W ustalonych stanach ruchu pojazdu (stałe obciążenie silnika, prędkość obrotowa i przełożenie skrzyni biegów) można uznać, że sygnał akustyczny docierający do pasażerów jest stacjonarny. Widmo poziomu dźwięku (rys. 2.1) tego typu sygnału zawiera wyraźne, wąskie składowe harmoniczne. Występuje również podniesiony poziom szumów, ale zdecydowanie dominują dyskretne piki.



Rys. 2.1. Widma poziomu ciśnienia akustycznego zarejestrowane w Nissanie Micra K11 '95 w czasie jazdy z prędkością 100 km/h na IV biegu

Nieustalone (w trakcie zmiany obciążenia, biegu itp.)

W trakcie przechodzenia między ustalonymi stanami jazdy następuje wiele przejść dynamicznych, zmieniających parametry źródeł energii akustycznej. Może to być wywołane zmianą kąta nachylenia drogi, przyspieszaniem czy zmianą przełożenia skrzyni biegów. Na widmie ciśnienia akustycznego można wówczas zaobserwować niezależne przesuwanie się elementów widma, związanych z prędkością obrotową silnika czy prędkością samochodu (rys. 2.2). Z kolei zmiana obciążenia widoczna jest jako zmiana proporcji poziomów kolejnych składowych. W trakcie przechodzenia między stanami ustalonymi można zaobserwować praktyczną implikację zasady nieoznaczoności Heisenberga. Wprowadza ona pewien element losowości do procesu samego przejścia, co powoduje, że jego przebieg jest za każdym razem inny. W konsekwencji opis procesu musi opierać się na zupełnie innych podstawach niż dla stanów ustalonych, co bardzo utrudnia skuteczną walkę z hałasem.



Rys. 2.2. Widma poziomu ciśnienia akustycznego zarejestrowane w Fordzie Sierra '92 dla różnych prędkości obrotowych silnika

Skorelowane

Dzięki bezpośredniej zależności generowanego sygnału wibroakustycznego od zjawisk fizycznych zachodzących w czasie jazdy, możliwa jest identyfikacja poszczególnych składowych w hałasie oddziałującym na pasażerów i powiązanie ich z konkretnymi podzespołami pojazdu. Z reguły na widmie wyróżnia się pierwsza składowa związana z częstością występowania danego zjawiska (np. prędkością obrotową) i kolejne harmoniki lub modulacje.

Niskoczęstotliwościowe

W całym spektrum dźwięków docierających do pasażerów samochodów dominują te o niskich częstotliwościach. Niezależnie od warunków jazdy, dominujące składowe harmoniczne w widmie dźwięków rejestrowanych w samochodzie znajdują się poniżej częstotliwości 400 Hz. To one mają największy wpływ na całkowity poziom ciśnienia akustycznego.

Powyżej tej częstotliwości znajduje się relatywnie niewielki ułamek całkowitej energii akustycznej oddziałującej na pasażerów. Powyżej 1000 Hz wraz ze wzrostem częstotliwości poziomy składowych zaczynają spadać (liniowo w skali logarytmicznej), a dla częstotliwości wyższych niż 10 kHz, poziom hałasu znajduje się poniżej progu słyszenia.



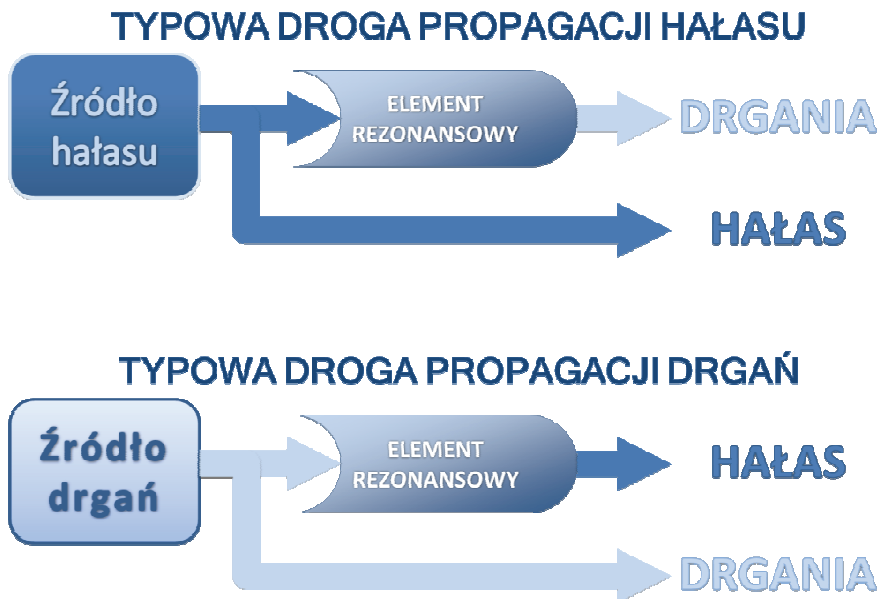
Rys. 2.3. Nowoczesne elementy zawieszenia skrzyni biegów wykonane z poliamidu, gumy i aluminium

Opisana charakterystyka niepożądanych dźwięków oddziałujących na pasażerów pojazdów powoduje, że trudno jest uzyskać zadowalające efekty w ich tłumieniu, wykorzystując wyłącznie metody pasywne. Dźwięki o niskiej częstotliwości niosą ze sobą dużą energię, dlatego materiały służące do budowy barier dźwiękochłonnych, które skutecznie potrafią ją rozproszyć, mają dużą masę. Z kolei szeroki zakres zmian prędkości, obciążenia czy przełożenia układu napędowego sprawia, że stosowane pasywne izolatory energii wibroakustycznej (np. tuleje z gumowymi amortyzatorami – rys. 2.3), nie zawsze pracują w sposób optymalny [95]. Z reguły dobiera się je tak, aby zakres ich największej skuteczności przypadął na najbardziej krytyczny obszar pola pracy. Jeżeli do tego dołożymy jeszcze mnogość dróg propa-

gacji dźwięków i drgań oraz nieliniowość charakterystyki akustycznej samej kabiny, okaże się, że transmitancja pomiędzy pasażerem pojazdu a źródłem zaburzeń jest bardzo skomplikowana i wrażliwa na zmianę wielu parametrów. A przecież w pojeździe jest wiele źródeł energii wibroakustycznych. Zagadnienie jest na tyle złożone, że do tej pory nie udało się stworzyć dostatecznie dokładnego modelu propagacji energii wibroakustycznej w pojeździe.

2.2. Propagacja dźwięków i drgań

Każdy pojazd można traktować jako zbiór elementarnych źródeł sygnału wibroakustycznego generowanego przez poszczególne zespoły [56]. Wzajemne ich oddziaływanie sprawia, że obserwator postrzega rezultat wypadkowy. Dotychczasowe doświadczenia pokazują, że podczas prac nad poprawą komfortu akustycznego pasażerów samochodów niezwykle użytecznym narzędziem jest ogólny model propagacji energii wibroakustycznej (rys. 2.4) [34]. Do głównych dróg propagacji energii wibroakustycznej w pojeździe, które w rezultacie powodują hałas odbierany przez pasażerów, należą:



Rys. 2.4. Schemat propagacji energii wibroakustycznej od jej źródła do odbiorcy

Droga bezpośrednia

Fala akustyczna generowana przez źródło hałasu trafia do obserwatora drogą powietrzną. Często nie ma w prostej linii połączenia między źródłem a obserwatorem i dociera do niego fala wielokrotnie odbita, niekiedy wzmocniona

jeszcze zjawiskiem rezonansu. Najprostszym sposobem na jej stłumienie jest wprowadzenie przegrody akustycznej, zwykle jednak ze względów eksploatacyjnych czy ergonomicznych jest to niemożliwe.

Generacja drgań w przegrodach

Z powodu niedoskonałości wibroakustycznej elementów samochodu, hałas rozprzestrzeniający się drogą powietrzną potrafi pobudzić niektóre z nich do drgań. Części takie stają się niezależnym źródłem dźwięków, które przy niekorzystnym zestawieniu charakterystyk mogą być lepiej słyszalne przez odbiorcę niż źródło pierwotne. Mamy więc do czynienia ze ścieżką, na której fala akustyczna indukuje drgania, a one z kolei zmieniają się w dźwięk po drugiej stronie przegrody. Efekt taki zachodzi z reguły przy niskich częstotliwościach – drgania mają wówczas wystarczającą energię, aby pokonać dość wysoką impedancję na granicy ośrodków.

Wtórne źródła dźwięku

Nawet jeżeli uda się zablokować dwie pierwsze drogi propagacji dźwięku w pojeździe, pozostaje jeszcze trzecia – bardzo znacząca. Każde źródło hałasu, z reguły, jest również źródłem drgań. Jeżeli nie są one w żaden sposób tłumione, przenoszą się wzdłuż konstrukcji pojazdu. W miejscach, gdzie impedancja falowa między ośrodkami jest niska, zamieniają się w falę akustyczną – stają się wtórnym źródłem dźwięku.

Takich ścieżek, wzajemnie ze sobą splecionych i na siebie oddziałujących, jest w samochodzie bardzo dużo. Nieliniowość odpowiadających im transmitancji na drodze źródło–odbiornik powoduje, że są one zależne od występowania pozostałych źródeł energii wibroakustycznej. Jednak transmitancje większości z nich są dostatecznie tłumione, aby nie wpływały na hałas postrzegany przez pasażerów. Pozostaje tylko kilka najbardziej znaczących, które definiują listę najuciążliwszych źródeł hałasu w kabinie samochodu.

2.3. Hałas związany bezpośrednio z ruchem pojazdu

Źródłami energii wibroakustycznej powstającej w czasie jazdy samochodem są podzespoły, których praca jest niezbędna do poruszania się pojazdu, oraz wyposażenie dodatkowe. Części należące do pierwszej grupy w wyniku postępu technicznego są coraz doskonalsze – emitują coraz mniej niepożądaną energię wibroakustyczną. Mimo to wciąż są zbyt uciążliwe dla pasażerów samochodu. Spośród tej grupy w kabinie, w czasie jazdy, najbardziej słychać następujące podzespoły [64, 8]:

Silnik z osprzętem

Najbardziej rozpoznawalnym dla każdego źródłem hałasu w konwencjonalnym samochodzie jest silnik spalinowy. Widmo emitowanych dźwięków zawiera bardzo dużo składowych dyskretnych – praktycznie każda para współpracujących części jest oddzielnym źródłem energii wibroakustycznej. Jednak najbardziej znaczący udział w generowaniu hałasu ma proces gwałtownego spalania mieszanki paliwowo-powietrznej wewnątrz cylindrów (odpowiadający za charakterystycz-

ny, rytmiczny warkot). Częstotliwość pierwszej harmonicznej związanej ze spalaniem ładunku cylindra określana jest ogólnie znanym wzorem:

$$f_0 = \frac{n [\text{obr./min}] \cdot l}{60 [s/\text{min}] \cdot s} [\text{Hz}] \quad (2.1)$$

gdzie n jest prędkością obrotową silnika, l – liczbą cylindrów, a s współczynnikiem charakterystycznym dla cyklu roboczego silnika.

W silniku czterocyndrowym czterocylindrowym zapłon w jednym cylindrze występuje raz na dwa obroty, stąd dla takiego silnika $s = 2$, $l = 4$. Podstawową składową dyskretną częstotliwości spalania, a także jej kolejne harmoniki doskonale widać na spektrum (rys. 2.2). Przedstawione widma zostały zarejestrowane na postoju w kabinie samochodu Ford Sierra. Wnętrze kabiny w trakcie pomiarów przedstawiono na rys. 2.5.

Hałas generowany przez jednostkę napędową w obecnie produkowanych samochodach, dociera do pasażerów głównie przez podłogę pojazdu. Dzieje się tak w wyniku odbijania się generowanej fali akustycznej od nawierzchni drogi, po której porusza się samochód. Z tego też powodu na podłodze samochodu stosuje się dość dużą ilość materiałów wygłuszających (pochłaniają one fale akustyczne rozprzestrzeniające się w kabinie i jednocześnie zapobiegają przedostawaniu się dźwięków odbitych od drogi).



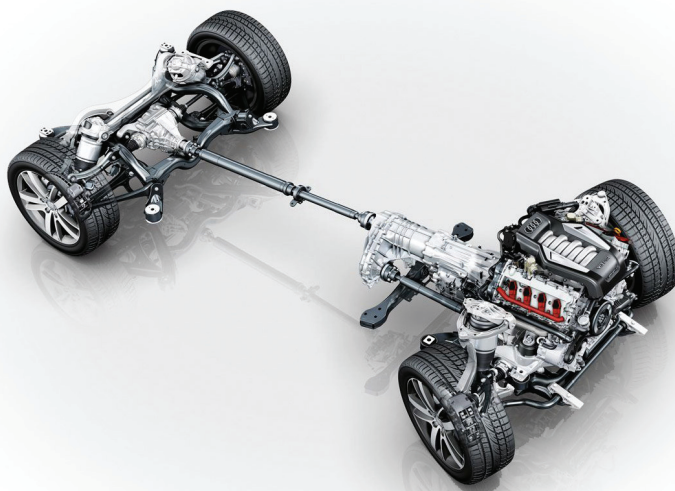
Rys. 2.5. Pomiary poziomów dźwięku nad przednim i tylnym siedzeniem w samochodzie typu kombi

Drugą ważną drogą propagacji tego typu hałasu jest przednia szyba. Hałas silnika dociera do niej przez klapę silnika (często jest to duża powierzchnia płaskiej blachy łatwo poddającej się rezonansowi) i nieszczelności na jej obrzeżach. Stąd bardzo ważne jest stosowanie ustrojów akustycznych w tym miejscu (montuje się ekran albo do klapy, albo bezpośrednio do silnika) i dobre uszczelnienie szczeliny między krawędzią maski a nadwoziem od strony kabiny.

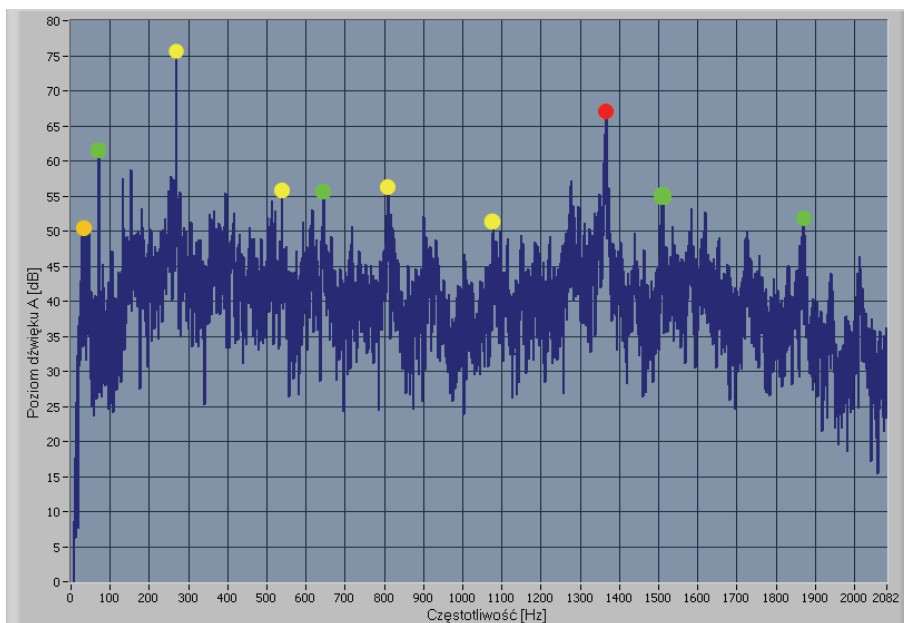
Trzecim istotnym kierunkiem propagacji jest przegroda przednia. Ponieważ jest ona usytuowana w prostej linii między pasażerami a silnikiem, konstruktorzy samochodów poświęcają jej dużo uwagi. Obecnie spotyka się rozwiązania, w których materiał dźwiękoizolacyjny stosuje się z dwóch stron blach przegrody silnika (od strony kabiny i od strony komory silnika).

Układ przeniesienia napędu

Istotnym generatorem zaburzeń akustycznych są podzespoły odpowiadające za transmisję mocy od silnika do kół (rys. 2.6). Z reguły są to skrzynia biegów i przekładnia główna, a w samochodach terenowych dołączają jeszcze do nich mechanizm różnicowy międzyosiowy i reduktor (por. [23]). Ich znaczenie w generowanym hałasie w kabinie samochodu zależy od konstrukcji i typu pojazdu. Jednak w prawidłowo skonstruowanym pojeździe elementy układu napędowego nie wpływają znacząco na poziom ciśnienia akustycznego wewnątrz samochodu.



Rys. 2.6. Kompletny układ napędowy samochodu z napędem na cztery koła [94] (fot. materiały prasowe Audi)



Rys. 2.7. Widmo poziomu dźwięku na przednim siedzeniu trójkołowego pojazdu elektrycznego



Rys. 2.8. Wykonany z polietylenu dwumiejscowy pojazd elektryczny z silnikiem umieszczonym w wahaczu tylnego koła

Sytuacja ulega zmianie, gdy zamiast silnika wewnętrznego spalania stosowany jest napęd elektryczny. Na rys. 2.7 przedstawiono widmo hałasu w kabinie trójkołowego, lekkiego pojazdu napędzanego silnikiem elektrycznym przedstawionego na rys. 2.8. Pojedynczy tylny wahacz w tym pojeździe ma zabudowany silnik napędowy i dwustopniową przekładnię redukującą. Pierwszy stopień tej przekładni to para kół zębatych (czerwona kropka na rys. 2.7), drugi stopień to przekładnia łańcuchowa (żółte kropki). Jak widać, składowe bezpośrednio związane z pracą silnika elektrycznego (zielone kropki) mają znacznie niższy poziom w stosunku do składowych generowanych przez przekładnię. W przypadku tej konkretnej konstrukcji zmniejszenie hałasu w kabinie samochodu do poziomu 73 dB oznaczało dodanie 35 kg ustrojów akustycznych do całkowitej masy pojazdu, co przełożyło się na zmniejszenie zasięgu na jednym ładowaniu baterii o 6,5 %. Problem jest opisany szerzej w [34].

Toczenie się kół po nawierzchni

W tej grupie źródeł energii wibroakustycznej w samochodzie umieszcza się wszystkie elementy związane z ruchem pojazdu po nawierzchni. Ze względu na spory postęp w obniżaniu hałasu pracy zawieszenia i łożysk kół, przestały one być znaczące w ogólnym poziomie hałasu. Do tej grupy zalicza się również hałas generowany w trakcie hamowania samochodu, generowany na styku okładzin ciernych i tarczy hamulcowej. Z oczywistych względów ma on jednak miejsce tylko podczas hamowania, a technologiczny postęp w jego obniżaniu spowodował, że nie generuje dużej energii wibroakustycznej – w związku z tym nie oddziałuje znacząco na komfort akustyczny w kabinie pojazdu.

Istotnym procesem wibroakustycznym, którego wpływu nie udało się wyeliminować, jest kontakt koła z nawierzchnią. Trudność dla konstruktorów stanowi różnorodność nawierzchni dróg, po jakich poruszają się samochody, i jednocześnie konieczność spełnienia wymogów związanych z bezpieczeństwem jazdy. W tym procesie generacji hałasu kluczową rolę odgrywa okresowo zmieniający się charakter kontaktu profilu bieżnika z niejednorodną strukturą bitumicznej warstwy ścieralnej nawierzchni [81, 71]. Zjawisko to generuje hałas o widmie amplitudowym z wyraźnymi składowymi dyskretnymi (związanymi z liczbą bloków na obwodzie opony), połączonymi z dosyć wysoką podstawą szumową. Analiza tego zagadnienia jest utrudniona, ponieważ nie da się w warunkach badań drogowych odseparować go od równie silnego zjawiska hałasu aerodynamicznego. Jest to możliwe wyłącznie w komorach bezechowych o dużych kubaturach, gdzie bada się kompletny pojazd toczący się po rozwijanej sztucznej nawierzchni.

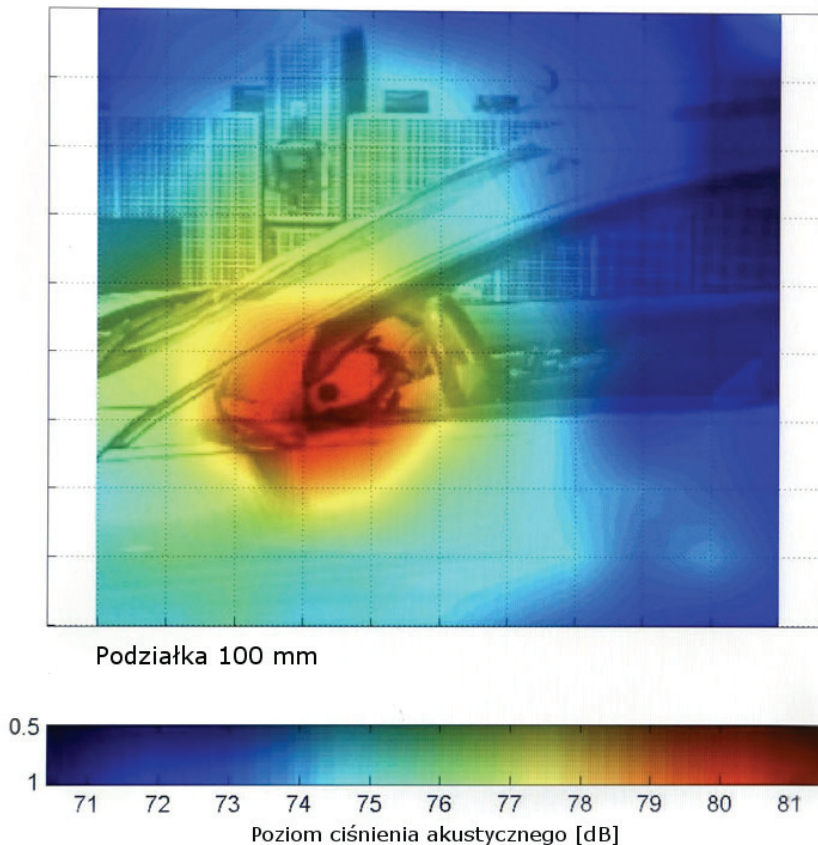
Hałas generowany przez źródła należące do tej grupy dostaje się do wnętrza samochodu głównie w okolicach nadkoli. Wynika to zarówno z położenia punktów mocowania zawieszenia, jak również z tego, że nadkola usytuowane są na najkrótszej ścieżce propagacji hałasu, łączącej te źródła z pasażerami pojazdu.

Opływ powietrza wokół nadwozia

Konsekwencją niedoskonałości aerodynamicznej pojazdu jest powstawanie przepływów turbulentnych i struktur wirowych, które są odpowiedzialne za większą część hałasu aerodynamicznego słyszanego wewnątrz pojazdu. Generowane

dźwięki mogą mieć postać zarówno składowych dyskretnych, jak i szumu szerokopasmowego [92, 25, 64]. Składowe dyskretnie z reguły wynikają z niedoskonałości aerodynamicznej poszczególnych elementów wyposażenia zewnętrznego pojazdu, na przykład lusterek czy anten radiowych (rys. 2.9). Projektanci nadwozi samochodowych mają na tyle dużą wiedzę na temat zależności między kształtem zewnętrznym pojazdu a hałasem odczuwanym w środku, że praktycznie hałas aerodynamiczny w produkowanych obecnie samochodach sprowadza się do szumu szerokopasmowego. Jest on zresztą na znacznie niższym poziomie niż jeszcze dekadę temu. Generalna zasada brzmi: im samochód stawia mniejszy opór aerodynamiczny – tym mniejszy jest poziom generowanego hałasu.

Hałas generowany przez opływ powietrza dociera do pasażerów przede wszystkim z okolic przednich słupków i dachu. W dalszej kolejności można wyodrębnić pozostałe słupki dachowe i wszystkie szyby. Ponieważ wszystkie te elementy praktycznie otaczają głowy pasażerów, trudno określić pojedynczy dominujący kierunek propagacji hałasu.



Rys. 2.9. Rozkład pola akustycznego w okolicach słupka A przy prędkości 140 km/h (wg materiałów firmy Daimler AG)

Układ wylotowy

Rytm wydostawania się spalin z silnika jest zgodny z cyklem otwarcia zaworów wydechowych. W związku z tym w układzie wylotowym powstają fluktuacje ciśnienia, postrzegane jako hałas składający się z dyskretnych tonów (kolejnych składowych harmonicznym), których częstotliwość zależy od prędkości obrotowej silnika. Amplituda pulsacji, dla silnika bez dedykowanego układu wylotowego, byłaby na tyle duża, że przekraczałaby wszelkie normy dopuszczalnego poziomu dźwięku. Dlatego w układach wylotowych stosuje się pasywne tłumiki, których zadaniem jest normalizacja przepływu spalin, a tym samym zminimalizowanie amplitudy dźwięku. Jednak, ze względu na duży zakres zmian prędkości obrotowej silnika i zależności między poszczególnymi składowymi tonalnymi w wyniku zmian obciążenia, nie udaje się całkowicie stłumić tego hałasu metodami pasywnymi. Punktowym źródłem hałasu staje się wylot spalin do atmosfery, czyli tak zwana końcówka tłumika wylotowego.



Rys. 2.10. Układ wylotowy z tłumikami przelotowymi silnika turbodoładowanego RB25DET [98]

Należy jeszcze rozróżnić silnik wolnossący lub doładowany mechanicznie od silnika turbodoładowanego [101]. Umieszczenie turbosprężarki w torze wylotu spalin powoduje, że obniżają się dyskretnie składowe tonalne kosztem nieznacznego podniesienia podstawy szumowej. Turbina oddziałuje na przepływające gazy podobnie jak mikser – zmniejsza pulsacje związane z cyklem wydechu silnika. Jednocześnie na łopatkach turbiny zachodzą złożone procesy termodynamiczne, powodujące powstawanie dźwięków o przebiegu quasi-losowym. Występowanie

wymienionych zjawisk sprawia, że projektowanie układów wylotowych do silników turbodoładowanych oparte jest na zupełnie innych zasadach niż do pozostałych silników. Gdybyśmy zdemontowali układ wylotowy, to silnik turbodoładowany będzie cichszy od silnika wolnossącego lub doładowanego mechanicznie. Jest to na tyle duża różnica, że w pojazdach przygotowywanych do zawodów sportowych bardzo często w tego typu silnikach stosuje się układy oparte wyłącznie na tłumikach przelotowych (rys. 2.10). Takie tłumiki praktycznie nie hamują przepływu gazów, a do tłumienia dźwięków wykorzystuje się konstrukcje będące rozwinięciem klasycznego rezonatora Helmholtza.

Hałas układu wylotowego jest bardziej słyszalny dla pasażerów siedzących na tylnym siedzeniu niż na przednich. Dociera on od strony bagażnika, przedostając się przez jego podłogę i tylną ścianę. Część energii wibroakustycznej, emitowanej w kierunku nawierzchni, odbija się od niej i odbierana jest z okolic podłogi kabiny, pod tylnymi siedzeniami. Główny kierunek propagacji przez bagażnik jest szczególnie odczuwalny w najbardziej popularnym obecnie typie nadwozia – hatchback. W sedanach, ze względu na geometrię nadwozia, oddziaływanie hałasu układu wylotowego jest stosunkowo małe w porównaniu z innymi źródłami dźwięków emitowanych w czasie jazdy.

W zależności od stanu ruchu pojazdu, w procesie generowania środowiska akustycznego wewnątrz samochodu osobowego dominują różne grupy omówionych źródeł energii wibroakustycznej. Biorąc pod uwagę wyłącznie hałas bezpośrednio związany z jazdą (w stanach ustalonych), można wyróżnić następujące przedziały:

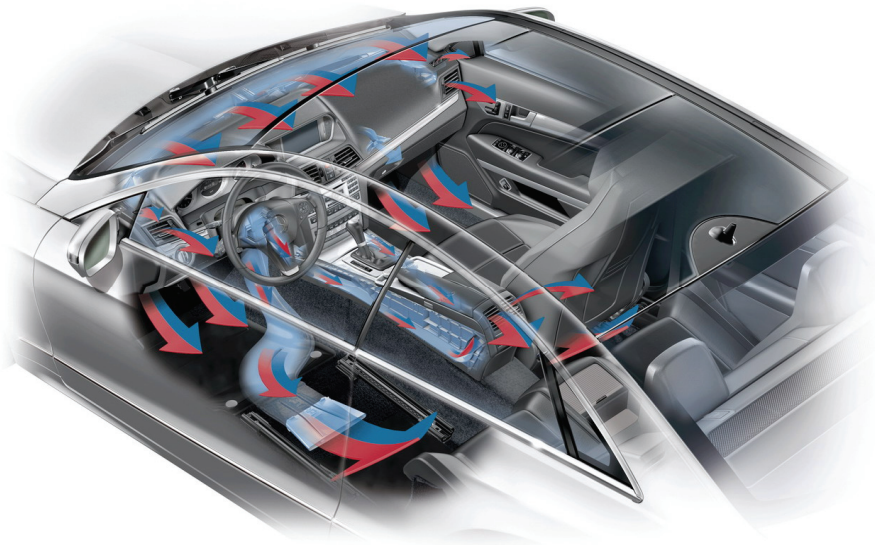
1. zatrzymanie pojazdu – zdecydowanie najbardziej dominuje hałas pochodzący od pracującego silnika,
2. jazda z prędkością do około 50 km/h – wśród dźwięków słyszalnych w kabinie dominują odgłosy pracy silnika i układu przeniesienia napędu (wysokie przełożenia),
3. jazda z prędkością od 50 km/h do około 80 km/h – najbardziej zrównoważony zakres, gdzie prawie równe udziały mają hałas silnika, układu przeniesienia napędu i hałas aerodynamiczny,
4. jazda z prędkością od 80 km/h do około 130 km/h – coraz silniejszy jest wpływ hałasu aerodynamicznego (jego moc narasta z szóstą potęgą prędkości), rośnie obciążenie silnika (więc również generowany przez niego hałas), wyraźnie słyszalny jest hałas toczenia się kół po nawierzchni drogi,
5. jazda z prędkością powyżej 130 km/h – dominujący jest hałas aerodynamiczny.

2.4. Hałas urządzeń pomocniczych

Obecnie więcej niż połowę części składowych samochodu osobowego stanowi wyposażenie dodatkowe, poprawiające komfort i bezpieczeństwo podróżowania. Lista tych podzespołów jest coraz dłuższa, natomiast elementy związane bezpośrednio z ruchem samochodu są coraz cichsze. Dlatego wyposażenie pomocnicze jest coraz istotniejszym źródłem energii wibroakustycznej oddziałującej na pasażerów. Wśród nich można wyróżnić następujące systemy:

Wentylacja

Jednym z najbardziej rozwiniętych w ostatnich latach konstrukcyjnie systemów jest zespolona wentylacja, ogrzewanie i klimatyzacja, nazywany HVAC (ang. *Heating, Ventilation, Air-Conditioning*). Zasadniczym elementem tego systemu jest wentylator wymuszający szybką cyrkulację powietrza (wentylacja podciśnieniowa nie spełnia obowiązujących standardów). Z reguły w samochodach stosuje się wentylatory promieniowe z racji ich wysokiej wydajności przy niewielkich gabarytach. Są one jednak znacznie bardziej złożonym źródłem hałasu [20, 51, 65]. Do emitowanego przez nie hałasu dokładają się dźwięki powodowane przepływem powietrza przez skomplikowany system przewodów i dyfuzorów (rys. 2.11). Ze względu na nieregularność ich przekroju (spowodowaną koniecznością zmieszczenia w ograniczonej przestrzeni pod deską rozdzielczą i podłogą) i ze względów technologicznych z reguły nie są zbyt doskonale aerodynamicznie. Jak znaczący jest to składnik ogólnego poziomu hałasu w samochodzie, można się przekonać empirycznie, ustawiając maksymalne obroty wentylatora i włączając obieg zamknięty powietrza – generowany szum dominuje w kabinie nawet przy jeździe z dużą prędkością. Poziom dźwięku w funkcji częstotliwości przedstawiono na rys. 2.12.

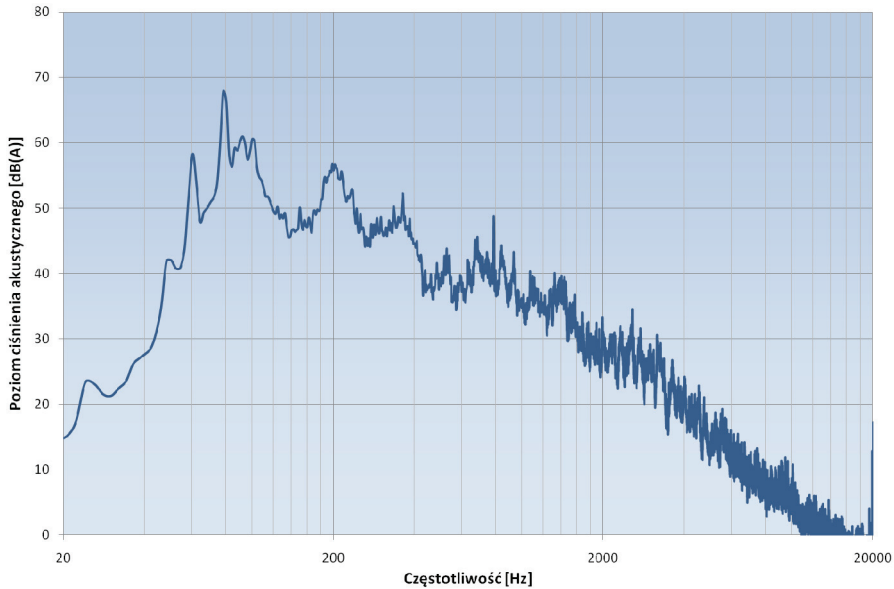


Rys. 2.11. Kanały wentylacyjne układu przewietrzania wnętrza w nowoczesnym samochodzie osobowym [96] (fot. materiały prasowe Mercedes-Benz)

Pozostałe

W samochodach z hydraulicznymi lub elektrohydraulicznymi układami wspomagania mechanizmu kierowniczego w trakcie obracania kierownicą (a szczególnie

w jej skrajnych położeniach) często słychać głośną pracę pompy oleju hydraulicznego. Związane jest to z powstawaniem kawitacji i objawia się wraz ze wzrostem różnicy ciśnień pomiędzy stroną czynną i bierną, czyli wzrostem obciążenia układu. Wady tej nie mają układy w pełni elektryczne, które coraz powszechniej stosowane są w samochodach osobowych. Podobne zjawiska, i w konsekwencji efekty akustyczne, powstają w trakcie pracy sprężarki klimatyzacji.



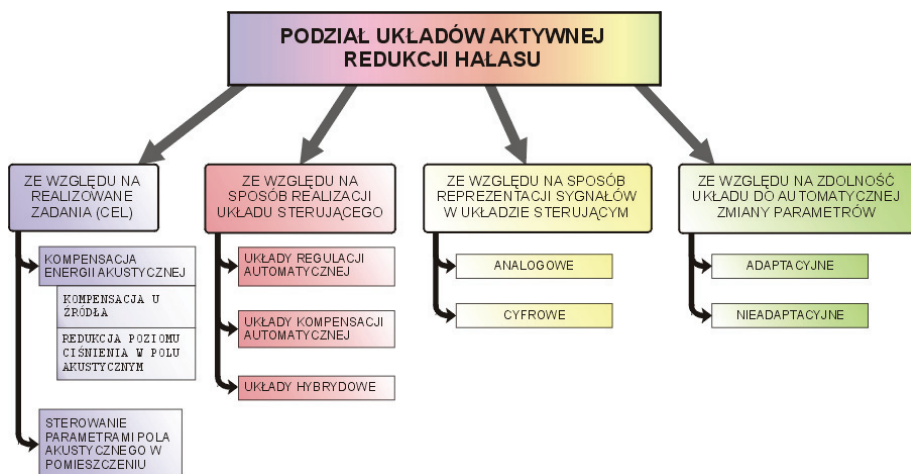
Rys. 2.12. Widmo poziomu dźwięku systemu wentylacji wymuszonej w małym samochodzie osobowym

Wymienić można jeszcze wiele innych źródeł hałasu w samochodzie, niemieszczących się w ramach powyższej klasyfikacji. Jednak ze względu na fakt, że z reguły są one aktywne przez krótki czas lub generują niewielki poziom energii wibroakustycznej, nie zalicza się ich do znaczących źródeł hałasu.

3. Układy aktywnej redukcji hałasu

3.1. Wprowadzenie

U podstaw aktywnej redukcji hałasu leży tak zwana interferencja destrukcyjna [88, 41], czyli generacja sygnału akustycznego, który stara się pobudzić ośrodek do drgań o zwrocie przeciwnym w stosunku do zwrotu wynikającego z rozchodzącego się zaburzenia. Nałożenie się fali kompensowanej i kompensującej powoduje w efekcie zmniejszenie amplitudy drgań rozchodzących się w ośrodku (w idealnej sytuacji redukuje ją do zera). Skuteczność tej metody zależy od możliwości wygenerowania takiej fali kompensującej, która po dotarciu jej do punktu, w którym ma zostać obniżony poziom dźwięku, całkowicie odejmie się od działającego w tym miejscu zaburzenia. Od tego centralnego punktu kołniste wyznacza się tak zwaną „strefę cisy”, zdefiniowaną określonym spadkiem ciśnienia akustycznego. Wokół tej strefy następuje wzmocnienie poziomu dźwięków, zgodnie z zasadą zachowania energii. Wielkość strefy zależy od częstotliwości dźwięku – im wyższy jest jego ton, tym mniejszy obszar wyciszony. Jeżeli obszar wokół punktu centralnego jest niejednorodny akustycznie, strefa cisy może przybierać różne formy odbiegające od kuli.

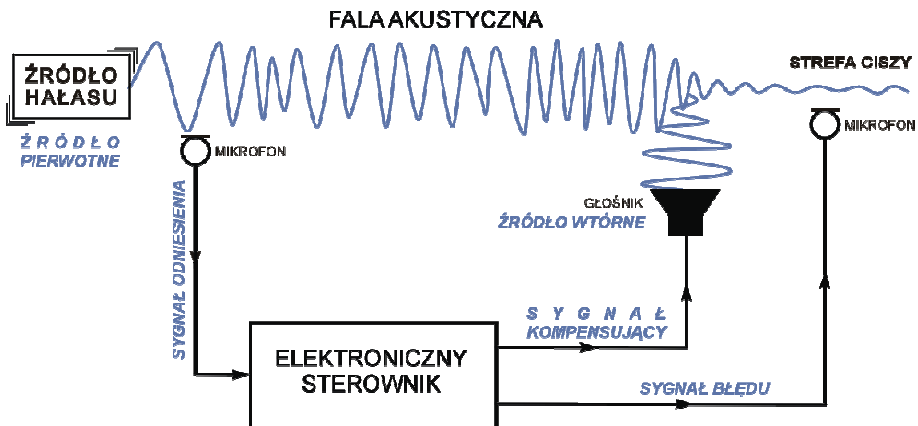


Rys. 3.1. Podział układów czynnej redukcji hałasu [22]

Skutecznością układu nazywa się różnicę między poziomem dźwięku zmierzonym w miejscu redukcji hałasu dla uruchomionego układu i bez niego. W przypadku, gdy badane miejsce pokrywa się z położeniem przetwornika sygnału błędu, będzie to tożsame z zarejestrowaniem różnicy poziomów tego sygnału. Zmierzona wartość może odnosić się do całego pasma akustycznego lub tylko do jego wycinka. W skrajnym przypadku analizowany może być spadek pojedynczej składowej harmonicznej. Ponadto w przypadku analizy szerokopasmowej zmierzone poziomy ciśnienia aku-

stycznego mogą być skorygowane charakterystyką częstotliwościową A, która przybliży uzyskany wynik do faktycznego spadku oddziaływania na człowieka. Tylko analiza zawierająca wszystkie wymienione miary może zostać uznana za kompletną.

Aktywna redukcja hałasu podlega zasadom teorii sterowania. W systemie występują elementy wejściowe, sterownik i elementy wyjściowe (wykonawcze). Według autorów [22, 35, 38], podział systemów na poszczególne rodzaje zależy od konfiguracji wejść i wyjść, od sposobu realizacji sterowania oraz realizowanego celu (rys. 3.1). Rozpatrując układ pod względem realizowanych zadań, można wyróżnić dwa podstawowe cele: kompensację energii akustycznej i sterowanie parametrami pola akustycznego (obecnie popularne zastosowanie w elektronice domowego użytku – w systemach odsłuchowych służą do generowania dodatkowych efektów typu pogłos, echo). To drugie kryterium dzieli układy ARH według sposobu sterowania. Jeżeli sterownik generuje sygnał kompensujący wyłącznie na podstawie sygnału błędu, to nazywa się go układem kompensacji automatycznej lub układem ze sprzężeniem zwrotnym. Jeżeli natomiast sygnał wtórny jest generowany wyłącznie na podstawie sygnału odniesienia, jest to układ regulacji automatycznej lub ze sprzężeniem do przodu. W sytuacji, gdy w algorytmie sterowania zostaną niezależnie wykorzystane obydwa sygnały, będzie to układ o strukturze hybrydowej. Dwa pozostałe kryteria wprowadzone przez autorów [22] wydają się oczywiste. Układy wykorzystujące sterowanie analogowe nie są jednak obecnie stosowane ze względu na spore trudności w ich wdrażaniu w rzeczywistych aplikacjach.



Rys. 3.2. Elementy systemu aktywnej redukcji hałasu

Liczba i charakter źródeł energii wibroakustycznej w pojeździe oraz sposoby jej propagacji sprawiają, że uzyskanie zauważalnego efektu działania wymaga zastosowania układu mogącego zwalczać hałas pochodzący z różnych źródeł. Spośród przedstawionych sposobów realizacji aktywnej redukcji hałasu najwłaściwszy wydaje się cyfrowy system ze sprzężeniem do przodu. Sygnał kompensujący w takim systemie tworzony jest przez filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej (SOI) na podstawie sygnału odniesienia (rys. 3.2). Proces cyfrowej filtracji sygnału dyskre-

nego w takim filtrze jest splotem wektora próbek przebiegu czasowego z wektorem wag filtra i odbywa się zgodnie ze wzorem 3.1.

$$y(n) = \sum_{i=0}^{L-1} w_i(n)x(n-i) \quad (3.1)$$

Aby układ był skuteczny, filtr musi jak najdokładniej modelować transmitancję ścieżki sygnału pomiędzy punktem odniesienia i punktem interferencji destruktywnej, czyli tak zwaną ścieżkę pierwotną. Wykorzystanie filtra o skończonej odpowiedzi impulsowej uniemożliwia modelowanie nieliniowych transmitancji, ale algorytm adaptacji wag takiego filtra jest prosty i efektywny. Działający w ten sposób sterownik może mieć za zadanie wytworzenie strefy ciszy wokół głowy pasażera samochodu. W tym celu można zastosować tak zwany wirtualny mikrofon. Szerzej to zagadnienie jest przedstawione w pracach [60, 63]. Źródłem wtórnym są głośniki samochodowe dobrane w taki sposób, aby układ był sterowalny. Informację o błędzie jego działania zbiera mikrofon umieszczony jak najbliżej głowy pasażera. Miejsce rejestrowania sygnału odniesienia w samochodzie trzeba ustalić doświadczalnie. Położenie obydwu przetworników musi być tak dobrane, aby system spełniał zasadę obserwowalności [29].

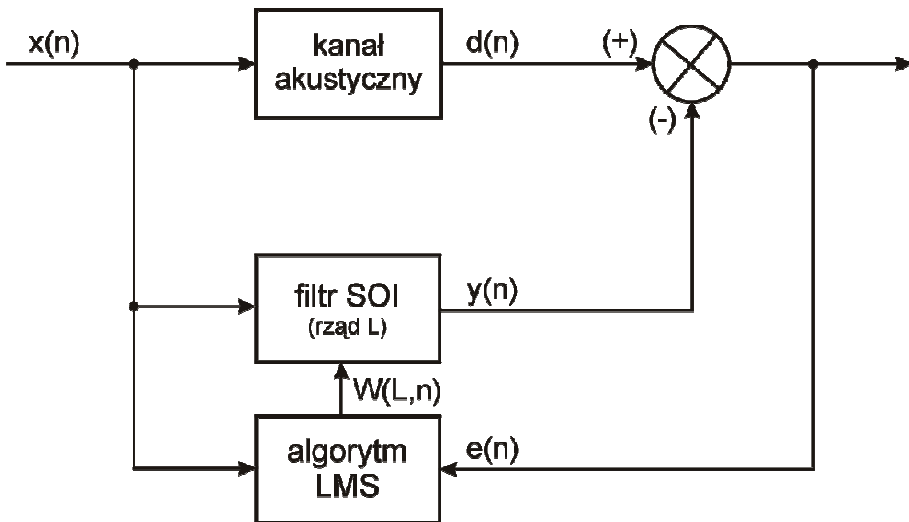
Poprawność przyjętej struktury układu znajduje potwierdzenie w pracach: [46, 30, 68, 54]. Według badaczy, tak zbudowany system aktywnej redukcji hałasu powinien charakteryzować się dużą skutecznością w zakresie niskich częstotliwości. Jeśli odniesiemy ten fakt do charakteru hałasu w kabinie samochodu, zauważymy, że największa skuteczność takiego systemu przypada na zakres widma, w którym jest zgromadzona większa część energii akustycznej. Dodatkowo, jak wcześniej zauważono, istnienie nieliniowych transmitancji między źródłami hałasu a odbiorcą w samochodzie powoduje, że są one wzajemnie sprzężone. To z kolei sprawia, że zmiana stanu jednego ze źródeł wpływa na wszystkie relacje źródło hałasu – odbiorca. Dzięki wykorzystaniu sprzężenia do przodu w układzie ARH w samochodzie, system reaguje na zmianę tych transmitancji jeszcze przed zaistnieniem efektu tych przeobrażeń. Warunkiem jest występowanie informacji o tych zmianach w sygnale odniesienia. Stąd tak ważny jest właściwy dobór źródła tego sygnału. Jeżeli w sygnale wejściowym filtra nie są one odzwierciedlone, to uwzględnia je algorytm adaptacji wag filtra na podstawie sygnału błędu (por. [12]). Dzieje się to jednak stopniowo w kolejnych iteracjach algorytmu, zgodnie z zasadą przyczynowości: wymuszenie – odpowiedź. W rezultacie może się okazać, że przy gwałtownych zmianach stanu ruchu pojazdu układ aktywnej redukcji hałasu będzie się na moment rozstrajał, aby za chwilę znów zbiec do postaci bliskiej optymalnej. Oczywiście, stanie się tak pod warunkiem, że układ będzie stabilny i zbieżny (jako regulator). W układach czynnej redukcji hałasu zbieżność zależy od sposobu adaptacji wag filtra.

3.2. Podstawowe metody adaptacji wag filtra SOI

Algorytm najmniejszych średnich kwadratów

Najpopularniejszym do tej pory algorytmem adaptacji wag filtra, wykorzystywanym w aktywnej redukcji hałasu, jest LMS (ang. *Least Mean Square*) i jego pochodne. Oparty jest on na iteracyjnej metodzie poszukiwania rozwiązania optymalnego,

zwanej gradientem najszybszego spadku. W przypadku układu czynnej redukcji hałasu poszukuje się minimum amplitudy sygnału błędu. Natomiast funkcją celu są współczynniki filtra SOI. Schemat blokowy takiego algorytmu przedstawiono na rys. 3.3. Podstawowymi parametrami klasycznej metody LMS jest rząd filtra L i krok adaptacji μ . Od tych dwóch parametrów zależy efektywność algorytmu, prędkość jego zbiegania i stabilność. Obydwa parametry należy dobierać arbitralnie do konkretnego zastosowania.



Rys. 3.3. Schemat blokowy układu ARH opartego na algorytmie LMS

Działanie algorytmu sprowadza się do adaptacji w każdym takcie pracy układu wektora współczynników filtra SOI, zgodnie z równaniem:

$$\sum_{i \in \langle 0, L-1 \rangle} w_i(n+1) = w_i(n) + \mu \cdot x(n-i) \cdot e(n) \quad (3.2)$$

Liczba L we wzorze odpowiada rzędowi filtra SOI, a n – kolejnym próbkom dyskretyzowanego sygnału. Symbol μ oznacza krok korekcji, od którego zależy prędkość zbiegania sygnału kompensującego do optymalnej postaci, a z drugiej strony stabilność całego układu. Dobór tego parametru jest kluczowy dla uzyskiwanych efektów, ale jednocześnie jest najtrudniejszym momentem wdrażania układu – zbyt duża jego wartość destabilizuje układ, a zbyt mała nie zapewnia wystarczającej nadążności układu. Parametr ten dobiera się do konkretnego zastosowania, wykonując wielokrotne próby. Jeśli źródło hałasu jest stacjonarne i zależy nam na efektywności układu (małym odchyleniu błędu średniokwadratowego), wartość kroku adaptacji musi być mała. Jeżeli charakter źródła często się zmienia, co w praktyce oznacza jego niestacjonarność, to przyjmuje się dużą wartość kroku korekcji (pamiętając o ograniczeniu stabilności), aby układ mógł stabilnie podążać za zmianami. Szczegółowa procedura postępowania „krok po kroku” wygląda następująco. W każdym punkcie sygnału wykonuje się następujące działania matematyczne:

1. obliczyć wartości próbek sygnału wyjściowego $y(n)$ przez przefiltrowanie sygnału odniesienia $x(n)$, wg wzoru 3.1,
2. obliczyć iloczyn sygnału błędu $e(n)$ i kroku korekcji μ ,
3. przemnożyć wektor próbek sygnału wejściowego $x(n)$ przez iloczyn obliczony w pkt 2,
4. uaktualnić wektor wag filtru zgodnie ze wzorem 3.2.

W ten sposób algorytm wykonywany jest przy każdej iteracji pętli sterowania. Jak widać, nie jest zbyt złożony obliczeniowo – należy do klasy algorytmów o złożoności liniowej.

Znormalizowany algorytm najmniejszych średnich kwadratów

Odmianą algorytmu LMS, która umożliwia pogodzenie dwóch przeciwstawnych wymagań: prędkości zbiegania i dokładności, jest NLMS (ang. *Normalized Least Mean Square*). Od klasycznego różni się równaniem uaktualniania wektora wag filtra SOI:

$$\sum_{i \in \langle 0, L-1 \rangle} w_i(n+1) = w_i(n) + \mu(n) \cdot x(n-i) \cdot e(n) \quad (3.3)$$

Krok adaptacji, występujący w algorytmie LMS, zastąpiono współczynnikiem, którego wartość ustalana jest na bieżąco w każdym cyklu wykonywania programu. Wyznacza się go na podstawie następującego wzoru [46]:

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{L \hat{P}_x(n)} \quad (3.4)$$

Współczynnik α , znajdujący się w liczniku zależności (3.4), określa się mianem znormalizowanego kroku adaptacji, podczas gdy $\hat{P}_x(n)$ nazywa się estymatą mocy sygnału. W spotykanych rozwiązaniach stosuje się dwie metody szacowania: metodę okna prostokątnego i eksponentecjalnego. Wadą pierwszej metody są spore wymagania w stosunku do pamięci w rzeczywistym sterowniku, natomiast zaletą większa dokładność szacowania w porównaniu do metody okna eksponentecjalnego. W dalszych rozważaniach zastosowano metodę przesuwanego okna prostokątnego, ponieważ umożliwia ona wprowadzenie wielu uproszczeń obliczeniowych. Według [46], wzór określający estymatę mocy sygnału ma postać:

$$\hat{P}_x(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} x^2(n-m) \quad (3.5)$$

gdzie M odpowiada szerokości stosowanego okna. Ponieważ wartość tego parametru przyjęto jako równą rzędowi filtru, ostateczna zależność, pozwalająca wyznaczyć krok adaptacji, sprowadza się do postaci:

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{\sum_{m=0}^{L-1} x^2(n-m)} \quad (3.6)$$

Algorytm NLMS jest skuteczniejszy nie tylko z powodu nieznacznie szybszego zbiegania do wartości optymalnej, lecz również, w przypadku sygnałów stacjonarnych, mniejszej różnicy między osiągniętym wektorem wag filtra a wektorem optymalnym. Ta metoda jest stosowana wszędzie tam, gdzie źródło hałasu od czasu do czasu gwałtownie zmienia postać generowanych sygnałów (pojedyncze piki w sygnale odniesienia). Jeżeli wyznaczy się funkcję reprezentującą maksymalną chwilową wartość kroku korekcji, dla których algorytm LMS jest stabilny, to przy stałym w całym przedziale kroku adaptacji musiałby być on mniejszy od minimum tej funkcji. W algorytmie NLMS krok korekcji jest zmienny i uzależniony od mocy sygnału wejściowego, dlatego system jest mniej czuły na duże zaburzenia tego sygnału. Dzięki temu układ jest stabilniejszy i umożliwia ustawienie nieznacznie „agresywniejszego” kroku korekcji w porównaniu z klasycznym algorytmem adaptacji.

Wśród metod adaptacji wag filtra SOI można jeszcze wymienić algorytmy rekurencyjne, genetyczne czy inne bazujące na sieciach neuronowych. Są to jednak algorytmy rzadko stosowane, ponieważ wymagają dużych mocy obliczeniowych sterowników ze względu na złożoność matematyczną i sprawdzają się wyłącznie w nielicznych zastosowaniach. Dlatego wysiłki badaczy rozwijających układy czynnej redukcji hałasu ukierunkowane są raczej na likwidowanie lub tylko minimalizowanie ograniczeń, jakie mają algorytmy oparte na LMS: [18, 59, 70].

3.3. Układy aktywnej redukcji hałasu ze zmodyfikowaną strukturą sterownika

Jednym z głównych problemów poruszanych na sympozjach naukowych jest kwestia transmitancji ścieżki wtórnej [37, 52, 90]. Pod tym pojęciem rozumiana jest droga, jaką musi przejść sygnał generowany przez filtr SOI. Najpierw musi on zostać przetworzony na sygnał elektryczny przez przetwornik cyfrowo-analogowy, a następnie trafia do wzmacniacza kondycjonującego. Wzmocniony sygnał źródło wtórne zamienia na sygnał dźwiękowy, który po przebyciu pewnej odległości dociera do miejsca interferencji destruktywnej. Wszystkie powyższe elementy, składające się na tor sygnału, niezależnie go zniekształcają. Funkcja przenoszenia każdego z nich składa się na sumaryczną transmitancję całej ścieżki. O ile przetwornik analogowo-cyfrowy i wzmacniacz przetwarzają sygnał praktycznie bez zniekształceń, o tyle głośnik będący źródłem wtórnym charakteryzuje się ograniczonym pasmem przenoszenia i nieliniową charakterystyką fazową. Z kolei relatywnie duża odległość, jaką z reguły musi przebyć fala dźwiękowa od źródła wtórnego do strefy ciszy, wprowadza duże opóźnienia czasowe.

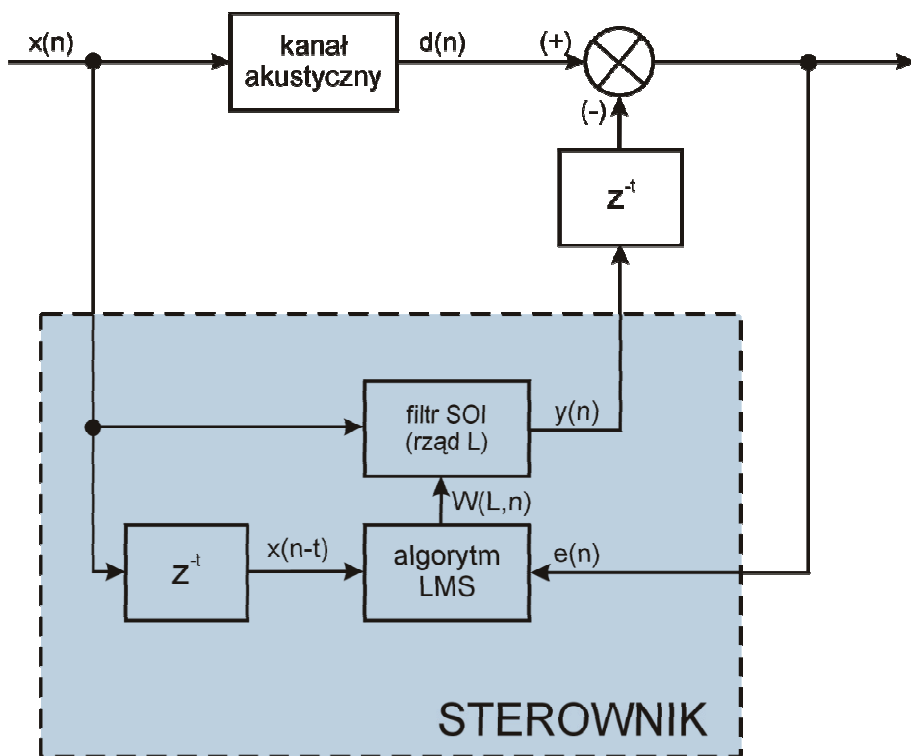
Błędy amplitudy i fazy powodują proporcjonalny spadek skuteczności układów aktywnej redukcji hałasu. Algorytm może skompensować niewielkie spadki dla niektórych częstotliwości na charakterystyce amplitudowej funkcji przenoszenia, modyfikując w odpowiedni sposób współczynniki filtra SOI; duże tłumienia powodują, że system staje się niesterowalny i prowadzą do przesterowania. To samo dotyczy charakterystyki fazowej – niewielkie jej nachylenie układ skompensuje kosztem skuteczności. Znacznie bardziej niebezpieczne są duże opóźnienia czasowe (stroma charakterystyka fazowa), gdyż prowadzą do destabilizacji układu. Algorytm adaptacji wag filtra jest sformułowany przy założeniu, że bezpośrednio po zadziała-

niu wymuszenia następuje odpowiedź układu w postaci sygnału błędu. Jeżeli opóźnienie między źródłem wtórnym a mikrofonem błędu (wynikające z prędkości rozchodzenia się fali akustycznej w powietrzu) przekroczy czas między kolejnymi iteracjami algorytmu, nastąpi złamanie łańcucha przyczynowego, co prowadzi do rozbieżności całego procesu.

Jednym ze sposobów eliminacji opóźnienia w ścieżce wtórnej jest zmniejszenie okresu pętli sterowania. Niekorzystną konsekwencją takiego postępowania jest ograniczenie pasma obserwowalnych częstotliwości. Zależność między częstotliwością graniczną a odległością między źródłem wtórnym i przetwornikiem błędu przedstawia wzór:

$$f_{gr} = \frac{c}{2l} \quad (3.7)$$

gdzie c – jest prędkością dźwięku [m/s], l – odległością źródła wtórnego od przetwornika błędu [m]. Z reguły rzeczywista częstotliwość graniczna jest nieznacznie mniejsza ze względu na pozostałe opóźnienia występujące w systemie.

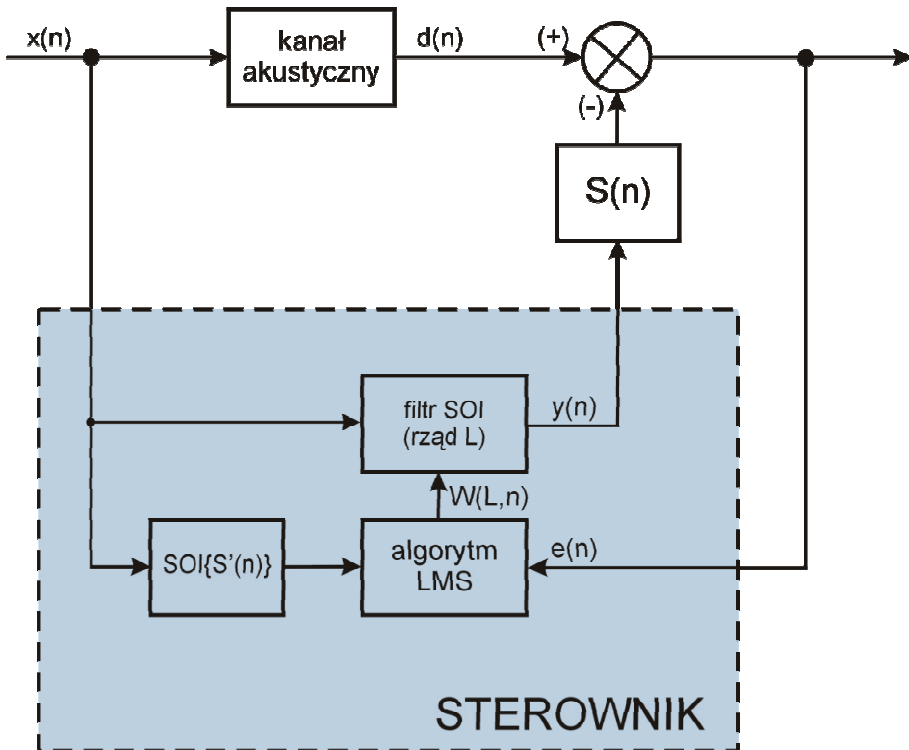


Rys. 3.4. Struktura systemu aktywnej redukcji hałasu, wykorzystującego Opóźniony LMS

Jeżeli istotne jest niezmnieszenie pasma przy jednoczesnej likwidacji wpływu opóźnienia w ścieżce wtórnej, stosuje się opóźniony LMS. Algorytm ten funk-

cjonuje dzięki uniezależnieniu części sterownika odpowiedzialnej za generację sygnału kompensującego od części uaktualniającej wagi filtra SOI. Schemat systemu aktywnej redukcji hałasu z wykorzystaniem Opóźnionego LMS zaprezentowany jest na rys. 3.4.

Część sterownika z filtrem SOI i część odpowiedzialna za adaptację pracują w dwóch różnych domenach czasowych – z tą samą częstotliwością próbkowania, ale przesunięte względem siebie o n próbek. Ze strony sygnału błędu opóźnienie to jest sumą opóźnień składowych w ścieżce wtórnej, a ze strony sygnału odniesienia jest ono wprowadzane sztucznie. Obydwa opóźnienia muszą mieć tę samą wartość. Można powiedzieć, że wprowadzanie opóźnienia do systemu jest uproszczeniem w modelowaniu transmitancji ścieżki wtórnej wyłącznie do charakterystyki fazowej (z dodatkowym założeniem, że jest ona liniowa). Dla sygnałów teoretycznych – pojedynczych harmonik lub szumu o równomiernym rozkładzie – skuteczność algorytmu opóźnionego LMS pozostaje bez zmian niezależnie od wielkości opóźnienia. W przypadku sygnałów rzeczywistych skuteczność spada wraz ze wzrostem opóźnienia, jednak układ pozostaje cały czas stabilny. Praktyczna implementacja takiego algorytmu jest bardzo prosta i nie wymaga dodatkowych zasobów obliczeniowych w sterowniku. Dodatkowo wartość, o jaką należy opóźnić sygnał odniesienia, można w prosty sposób, automatycznie wyznaczać przed uruchomieniem układu.



Rys. 3.5. Struktura systemu aktywnej redukcji hałasu bazującego na FxLMS

Kolejną modyfikacją podstawowego algorytmu najmniejszych średnich kwadratów jest FxLMS. Schemat przebiegu sygnałów w systemie pracującym pod kontrolą takiego algorytmu adaptacji pokazany jest na rys. 3.5. Podobnie, jak w Opóźnionym LMS, ścieżka wtórna S uwzględniona jest na wejściu sygnału odniesienia do części sterownika odpowiedzialnej za adaptację wag filtra. Różnica między obydwooma algorytmami polega na tym, że FxLMS wykorzystuje estymatę transmitancji ścieżki wtórnej (oznaczoną jako S' na schemacie) zamiast zwykłego opóźnienia sygnału. Realizacja praktyczna sprowadza się do zastosowania dodatkowego filtra cyfrowego modelującego ścieżkę wtórą, filtrującego sygnał odniesienia wprowadzany na wejściu algorytmu adaptacji wag filtra zasadniczego. Pełną transmitancję ścieżki wtórnej trzeba uwzględniać przede wszystkim w systemach, w których jej charakterystyka jest mocno zaburzona (np. występują silne tłumienia w niektórych pasmach częstotliwości).

W systemach aktywnej kompensacji lokalnej hałasu w samochodzie najbardziej znaczącym składnikiem transmitancji całej ścieżki wtórnej jest funkcja przeniesienia kanału powietrznego między źródłem wtórnym a przetwornikiem błędu. Oznacza to, że w trakcie działania algorytmu często, w sposób znaczący, zmienia się jego postać – co wynika z dużej czułości transmitancji ścieżki powietrznej na zmiany we wnętrzu. Wystarczy, że kierowca siedzący w fotelu przysunie się bliżej przetwornika błędu. Stąd uzasadnione jest wyznaczanie transmitancji S' w trakcie pracy układu aktywnej redukcji hałasu, co jest wyzwaniem samym w sobie. Proponowane dotychczas rozwiązania [5, 33] z reguły oznaczają dużą komplikację struktury układu (przez wprowadzanie wielostopniowego filtrowania i skomplikowanych zależności), a co za tym idzie wzrost wymagań wobec mocy obliczeniowej sterownika. Oprócz tego wprowadzają dodatkowe źródło szumu, który jest emitowany przez źródło wtórne w celu ułatwienia identyfikacji transmitancji ścieżki wtórnej. Z oczywistych względów taki szum powoduje spadek skuteczności działania systemu. Dotychczas nie znaleziono rozwiązania problemu wyznaczania transmitancji ścieżki wtórnej na bieżąco, które było by pozbawione powyższych wad.

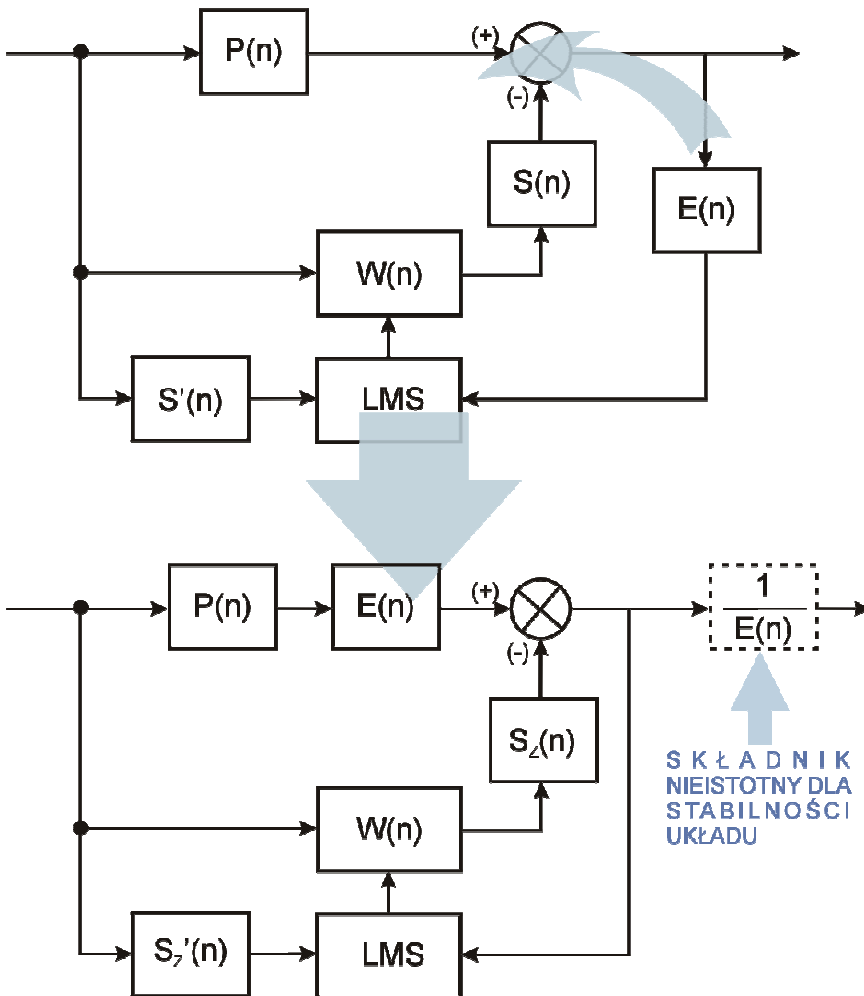
Tak samo, jak transmitancja ścieżki wtórnej, na działanie systemu ma również wpływ transmitancja ścieżki błędu, do której zalicza się wszystkie przekształcenia między rejestracją akustycznego sygnału błędu a podstawieniem cyfrowego sygnału do równania adaptacji wag filtra. Ze względu na to, że (w najprostszym przypadku) nie zawiera ona kanału akustycznego, a wyłącznie transmitancje związane z przetwarzaniem sygnału elektrycznego, jest znacznie mniej złożona niż transmitancja ścieżki wtórnej. Dlatego w mniejszym stopniu wpływa na skuteczność systemu ARH. Dodatkowo łatwo wykazać, że z punktu widzenia działania algorytmu adaptacji wag filtra można uwzględniać tę transmitancję jako część transmitancji kanału sygnału kompensowanego i kompensującego.

Przeniesienie transmitancji ścieżki błędu przed węzeł sumacyjny (rys. 3.6) powoduje, że ma ona dwie reprezentacje: w ścieżce między punktem odniesienia a węzłem sumacyjnym i w ścieżce wtórnej. Aby matematycznie wszystko się zgadzało, należy na wyjściu systemu dodać odwrotność transmitancji ścieżki błędu. Element ten jednak nie ma wpływu na sprzężenie zwrotne, a tym samym na stabilność układu. Całkowitą transmitancję ścieżki, od źródła odniesienia do węzła sumacyjnego, wyraża iloczyn transmitancji kanału głównego $P(n)$ i ścieżki błędu $E(n)$.

Taka złożona funkcja przenoszenia jest w trakcie pracy systemu modelowana przez uaktualniany filtr SOI $W(n)$, dlatego nie ma ona wpływu na stabilność układu. W miejsce transmitancji ścieżki wtórnej można wprowadzić transmitancję zastępczą zgodnie z równaniem:

$$S_z(n) = S(n) \cdot E(n) \quad (3.8)$$

Konsekwentnie, zgodnie z zasadą działania algorytmu FxLMS, na wejściu bloku adaptacji wag filtra musi znaleźć się estymata transmitancji zastępczej. Z powyższych przekształceń widać, że najlepiej transmitancję ścieżki błędu uwzględnić jako część transmitancji ścieżki wtórnej. Takie podejście znajduje swoje potwierdzenie w literaturze [43, 44].



Rys. 3.6. Superpozycja transmitancji ścieżki błędu przed węzeł sumacyjny

3.4. Realizacje układów aktywnej redukcji hałasu

Systemy aktywnej redukcji hałasu w ostatnich latach cieszą się wzmożonym zainteresowaniem zarówno wśród badaczy, jak i inżynierów z przemysłu [10]. Związane jest to z otwarciem się nowych obszarów zastosowań, dzięki intensywnemu rozwojowi cyfrowych technik przetwarzania sygnałów w ostatnim pięćdziesięcioleciu. Przeglądając dostępną literaturę (na przykład [4, 22, 86, 48, 53, 58]) można spotkać wiele opracowań na ten temat, organizowane są konferencje naukowe specjalnie poświęcone tym zagadnieniom. W szerokim spektrum zastosowań systemów aktywnej redukcji hałasu tylko kilkanaście procent przypada na wykorzystywanie ich do obniżania poziomu hałasu generowanego przez samochód.

Na przykład, w Hiszpanii (przy udziale wielu jednostek naukowych) prowadzono badania nad wdrożeniem dwukanałowego systemu aktywnej redukcji hałasu, opartego na algorytmie FxLMS, w niewielkim samochodzie dostawczym. W rozwiązaniu tym zastosowano procesor DSP umieszczony na specjalnie przygotowanej karcie rozszerzeń komputera PC, co umożliwiało podgląd danych przetwarzanych przez procesor. Przebadano wiele konfiguracji różniących się rodzajem i rozmieszczeniem czujników pomiarowych, jak również rozmieszczeniem źródeł wtórnych (głośniki subniskotonowe). Osiągnięto redukcję 15–20 dB dla dominujących dyskretnych składowych harmonicznych. Dla pozostałych częstotliwości obserwowanego pasma (do 800 Hz) poziom dźwięku praktycznie pozostał bez zmian. Należy zaznaczyć, że pomiary przeprowadzono w zamkniętym, pustym pomieszczeniu (akustycznie bardzo dalekim od idei komory bezechowej), a hałas był generowany z głośników lub wytwarzany przez pracujący na postoju silnik. Natomiast nie przeprowadzono pomiarów drogowych. Źródła wtórne były umieszczone w różnych miejscach kabiny, nawet tuż przy głowie testowego manekina. Autorzy milczą na temat wpływu działania systemu ARH na ogólny poziom dźwięku skorygowany charakterystyką częstotliwościową A. Najważniejsze informacje o projekcie znajdują się w [68].

Następnym przykładem udanego wdrożenia systemu aktywnej redukcji hałasu jest rozwiązanie przedstawione w [54]. Naukowcy z Korei Południowej zbudowali prototyp systemu kompensującego hałas, powstający podczas poruszania się pojazdu ze stosunkowo dużą prędkością po nawierzchni z kamiennej kostki. Analiza została ograniczona do niskich częstotliwości (poniżej 400 Hz), dla których układ osiąga kompensację rzędu 6 dB w paśmie do 400 Hz. Takie wartości udało się uzyskać w przestrzeni wokół głów pasażerów na przednich siedzeniach, umieszczając głośniki basowe na podłodze za siedzeniami. Wykorzystanie w adaptacji wag filtra algorytmu CFX LMS (dla filtra SOI) lub CMFX LMS (dla filtra NOI) [5, 33] spowodowało konieczność stosowania wielu źródeł odniesienia – sygnał uzyskiwano z czterech akcelerometrów umieszczonych na elementach przedniego zawieszenia. W odróżnieniu od rozwiązania z Hiszpanii, skupiono się wyłącznie na hałasie będącym pochodną toczenia się kół po bardzo nierównej drodze – przypadku (przy obecnym stopniu rozwoju infrastruktury drogowej) dosyć rzadko spotykanego.

System, który wykorzystuje głośniki zamontowane w oryginalnych miejscach montażowych w samochodzie, zaproponował prof. S.J. Elliott wraz ze współpracownikami [16]. Wielokanałowy system został wyposażony w sześć źródeł wtórnych i osiem mikrofonów sygnału błędu. Tak duża liczba użytych przetworników

wynikała z chęci osiągnięcia sfery aktywnej redukcji o możliwie dużej objętości. Pomiary wykonano na wysokości głowy kierowcy i pasażerów, w czterech różnych punktach nad poszczególnymi siedzeniami. Źródłem odniesienia był sygnał z obrotomierza silnika – w związku z tym system kompensował wyłącznie kolejne harmoniczne prędkości obrotowej silnika. Skuteczność systemu zmieniała się w zależności od tej prędkości – dla niektórych wartości następowało nawet wzmocnienie poziomu dźwięku w stosunku do pojazdu bez systemu ARH. Brytyjska firma Lotus Engineering bada możliwość wdrożenia do seryjnej produkcji układu ARH, bazującego na tej koncepcji [74, 57].

Dowodem na zainteresowanie przemysłu tematyką aktywnego zwalczania hałasu jest artykuł [8], opublikowany na konferencji w Bolonii przez oddział firmy Magneti Marelli. Autorzy zaprezentowali efekty minimalizacji poziomu hałasu emitowanego przez układ wylotowy samochodu, wyposażonego w benzynowy, dwulitrowy silnik turbodoładowany. Do generacji sygnału wtórnego użyto sterownika ze sprzężeniem zwrotnym, w którym sygnał błędu próbkowano zgodnie z prędkością obrotową silnika, a następnie poddawano transformacji Fouriera; po uwzględnieniu transmitancji ścieżki wtórnej, uzyskane widmo przesuwano o 180° i poddawano odwrotnej transformacji Fouriera. Tak stworzony sygnał kompensujący podawany był do zespołu głośników basowych o dużej mocy akustycznej, zamontowanych w okolicy końcówki rury wydechowej. Ze względu na charakter sterowania, układ nie realizował kompensacji szerokopasmowej – redukcja występowała wyłącznie w okolicach głównych składowych harmonicznych prędkości obrotowej silnika. Eksperyment udowodnił, że jest możliwa aktywna kompensacja hałasu układu wydechowego samochodu. Jednak w tamtym czasie nie było to rozwiązanie, które można by wdrożyć do produkcji na szeroką skalę, ze względu na problem z umiejscowieniem przetworników i ich wrażliwość na warunki środowiskowe (agresywność spalin i wysoką temperaturę).

Prace nad aktywnym tłumikiem układu wylotowego były kontynuowane przez inne ośrodki badawcze [74, 6]. Jest niemal pewne, że prowadzone badania zaowocują w przyszłości konkretnymi zastosowaniami. Jednak nie są to jedyne próby wdrożenia tego typu systemów do produkcji. Firma Walker Manufacturing Ltd. chwali się, że pracuje nad aktywnymi układami wylotowymi, natomiast koncern TENNECO już ma w ofercie układy pozwalające sterować barwą emitowanego dźwięku [101].

Aktywne metody redukcji hałasu są wyjątkowo skuteczne w kompensowaniu hałasu generowanego przez wentylatory i turbulentny przepływ powietrza w kanałach układów klimatyzacji [22, 46, 51]. W samochodach, ze względu na konieczność zapewnienia właściwej widoczności i komfortu termicznego, systemy przewietrzania i klimatyzacji (HVAC) stają się coraz bardziej rozbudowane – spotyka się już układy wykorzystujące więcej niż trzy wentylatory w jednym samochodzie. Z drugiej strony, klasyczna konstrukcja samochodu osobowego sprawia, że kanały powietrzne mają bardzo skomplikowane kształty, co powoduje, że przepływ powietrza jest daleki od idealnego. Dlatego naukowcy próbują zmniejszyć hałas pracującego systemu wentylacji, wykorzystując metody aktywne [65]. Autorzy cytowanej pracy, ze względu na chęć uproszczenia systemu aktywnej redukcji hałasu, zaproponowali kompensację dźwięków, zanim opuszczą kanały powietrzne. Umieścili więc mikrofon odniesienia bardzo blisko źródła największych zaburzeń, czyli zespołu

mieszalnika powietrza, natomiast mikrofon błędu blisko nawiewu, którym powietrze dostaje się do kabiny. Aby zwiększyć koherencję między mikrofonem odniesienia i mikrofonem błędu (a tym samym zwiększyć skuteczność systemu ARH), tuż przed tym ostatnim czujnikiem wstawili kierownicę uspokajającą przepływ – przegrodę o strukturze plastra miodu. Korzystając z algorytmu FxLMS, badaczom udało się zmniejszyć poziom dźwięku (w zakresie 200–300 Hz) o około 6 dB. W omawianej publikacji nie analizowano wpływu tak działającego systemu na poziom hałasu odczuwanego przez pasażerów samochodu, jednak również w tej kwestii należy spodziewać się pozytywnych rezultatów.

Jak widać z przedstawionych prac, zainteresowanie wykorzystaniem aktywnych metod redukcji hałasu w samochodzie jest dosyć duże. Pomimo zaawansowanych prac wdrożeniowych publikacje przedstawiane na forum naukowym są dosyć ogólnikowe. Ze względu na zastosowane w artykułach różne metody oceny uzyskanych wyników, trudno porównywać je ze sobą i trudno oszacować realizację ostatecznego celu, jakim jest obniżenie poziomu hałasu oddziałującego na pasażerów samochodu w czasie normalnej jazdy. Niektóre z prezentowanych prac badawczych są jeszcze w na tyle wczesnym etapie rozwoju, że nie można bezpośrednio ich wyników wykorzystać do aktywnej redukcji hałasu w kabinie jadącego samochodu. Te zaś, które są już stosowane, mają bardzo skomplikowaną budowę (są to z reguły układy wielokanałowe), a podane osiągi trudno zweryfikować (nie podana jest procedura ich wyznaczania). Żaden z autorów przytaczanych artykułów jednoznacznie nie opisał, jaki jest wpływ proponowanego przez niego systemu aktywnej redukcji hałasu na poziom dźwięku A, w pełnym paśmie akustycznym, czyli odczuwanego przez pasażerów jadącego samochodu.

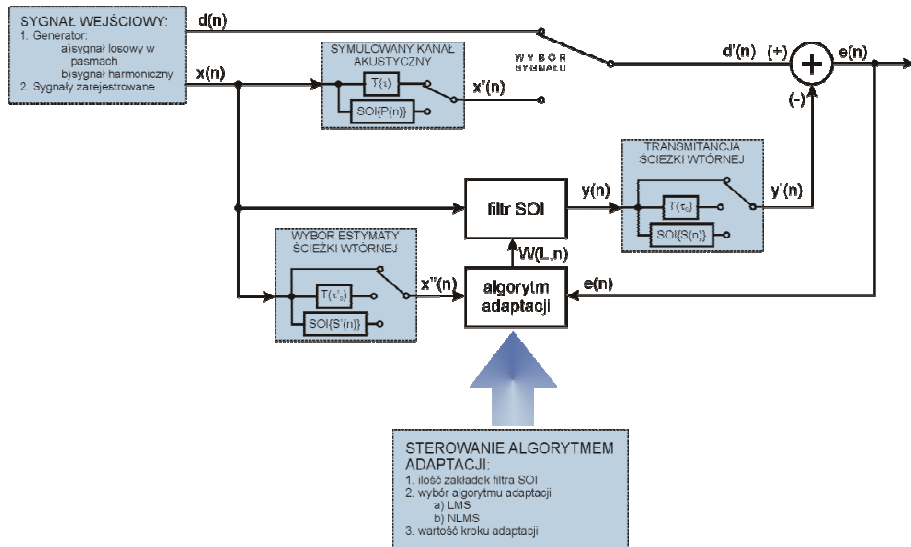
4. Badania symulacyjne układów aktywnej redukcji hałasu

4.1. Symulacja cyfrowa układu aktywnej redukcji hałasu

Modele symulacyjne są nowoczesnym narzędziem badawczym, ułatwiającym wdrażanie układów aktywnej redukcji hałasu. Specyfika układów ARH powoduje, że każde nowe ich zastosowanie stawia przed projektantem inne wyzwania. Próba identyfikacji i separacji najważniejszych cech w rzeczywistym układzie z reguły jest niemożliwa. Jego obserwacja jest utrudniona i właściwie sprowadza się do stwierdzenia: zbieżny/niezbieżny. Ze względu na lawinową reakcję sprzężenia zwrotnego w bardzo krótkim czasie trudno wyodrębnić zależność przyczynowo-skutkową. W związku z tym proces odkrywania istotnych cech charakterystycznych układu jest bardzo pracochłonny. W przeciwieństwie do systemu rzeczywistego można stopniowo zwiększać złożoność modelu symulacyjnego – uwzględniając kolejne zjawiska, które mają istotny wpływ na działanie układu. W ten sposób od jego najprostszej wersji można dojść do postaci bliskiej rzeczywistości. Możliwość pojedynczego włączania do symulacji kolejnych cech rzeczywistego układu pozwala na ich niezależną analizę. W przypadku układów ARH należy zacząć od wyłącznie akustycznej postaci, a następnie dodawać kolejne elementy, takie jak drganiowy sygnał odniesienia czy transmitancja ścieżki wtórnej. Można też przejść stopniowo od algorytmu sterującego o strukturze wynikającej wprost z równań matematycznych do implementacji wykonywalnej w systemie czasu rzeczywistego [1]. W praktycznej realizacji w obiekcie wyciszonym trzeba radzić sobie ze wszystkimi zjawiskami jednocześnie, więc znalezienie optymalnej postaci układu ARH jest bardzo trudne.

Obecnie znane są technologie informatyczne umożliwiające przeniesienie modelu cyfrowego stosowanego podczas symulacji, bezpośrednio na docelową platformę sprzętową. Ich wykorzystanie umożliwia znaczne skrócenie czasu potrzebnego na rozwinięcie początkowego pomysłu do postaci w pełni funkcjonalnego, wdrożonego układu ARH.

Najważniejszym elementem decydującym o powodzeniu prowadzonych badań jest właściwy wybór modelu symulacyjnego. Powinien on być na tyle prosty, by czas obliczeń nie wykraczał poza akceptowalny poziom, a z drugiej strony na tyle dokładny, by uwzględniał występowanie najważniejszych zjawisk. Przykład struktury takiego modelu jest przedstawiony na rys. 4.1. Jest ona na tyle uniwersalna, że umożliwia symulowanie układów aktywnej redukcji hałasu również w zastosowaniach poza samochodem (aktywne słuchawki, ochronniki słuchu, systemy wentylacji i klimatyzacji budynków, obudowy komputerów stacjonarnych). W dyskretnym modelu w kolejnych iteracjach wyznaczany jest wektor stanu modelu dla danej chwili (*układ przyczynowy z pamięcią* [82, 29]). W związku z tym niektóre cechy analizowanego układu przed wprowadzeniem do modelu musiały zostać zamienione na postać dyskretną (np. transmitancja ścieżki wtórnej). Symulator przetwarza sygnały metodą bezpośrednią – w każdym cyklu pracy operacje wykonywane są sekwencyjnie (w porządku chronologicznym od wejść do wyjść systemu).



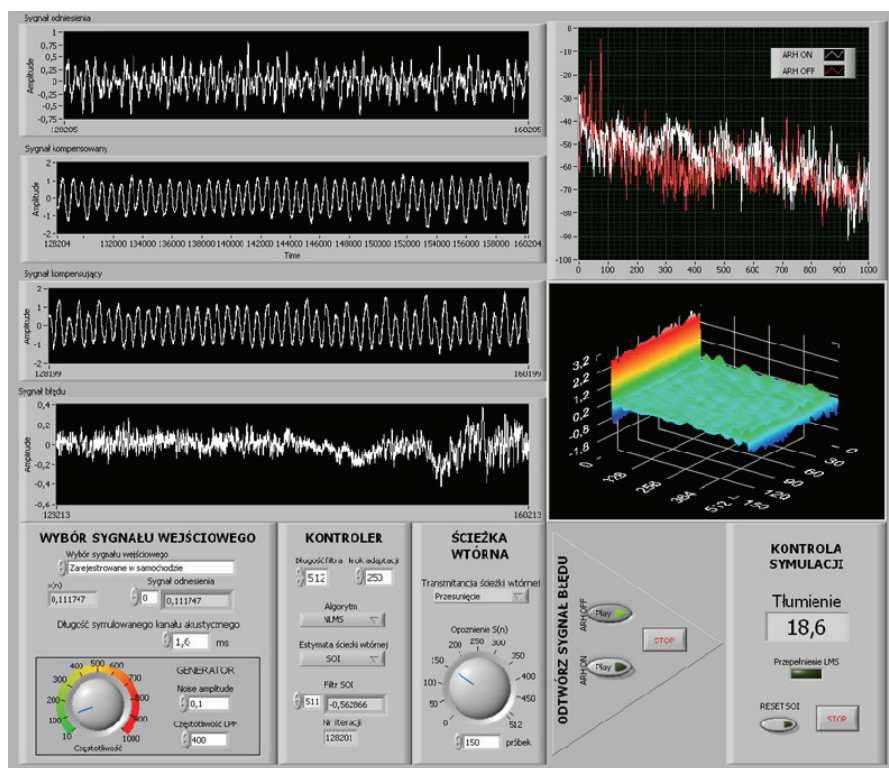
Rys. 4.1. Schemat blokowy systemu symulacyjnego układu aktywnej redukcji hałasu

Założenia przyjęte przy tworzeniu przedstawionego wyżej modelu symulacyjnego:

- interferencja destrukcyjna jest zjawiskiem liniowym i zachodzi zawsze w punkcie umieszczenia czujnika błędu (przy uwzględnieniu transmitancji ścieżki błędu w transmitancji ścieżki wtórnej);
- prędkość rozchodzenia się sygnałów elektrycznych w stosunku do prędkości rozchodzenia się dźwięków lub drgań jest na tyle duża, że można ją pominąć, dlatego długość przewodów również jest pomijalna;
- liniowość kanału akustycznego. Filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej modelujący ten kanał jest odpowiednikiem dyskretnego systemu nierekurencyjnego [86];
- liniowość wszystkich transmitancji występujących w systemie;
- poszczególne elementy systemu są niezależne – dodanie lub odjęcie któregośkolwiek z nich nie wpływa na stan pozostałych;
- rozdzielczość bitowa obliczeń nie ma wpływu na uzyskiwane wyniki, o ile zostanie spełniony warunek, że jest ona większa bądź równa kwantyzacji przetworników próbkujących w układzie realnym.

Struktura modelu składa się z szeregu bloków funkcjonalnych. Podstawowym elementem jest filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej, modelujący ścieżkę pierwotną rozprzestrzeniającego się hałasu (środek schematu na rys. 4.1). Wagi filtra są uaktualniane zgodnie z wybranym algorytmem. Dodatkowo, przed rozpoczęciem symulacji można ustalić rząd filtra, czyli inaczej ilość współczynników. Długość filtra ma wpływ na dokładność odwzorowania ścieżki pierwotnej i na szybkość zbiegania do postaci bliskiej optymalnej. Możliwość zmiany kroku adaptacji pozwala na wyznaczenie jego najbardziej efektywnej i stabilnej wartości. Wejściem do modelu jest blok sygnałów wymuszających. Umożliwia on między innymi sprawdzenie przebiegu zjawiska pod wpływem różnych wymuszeń. Dysponując parą synchronicznie zarejestro-

wanych sygnałów: odniesienia i kompensowanym, można wykorzystać je w symulacji. W razie ich braku modeluje się ścieżkę pierwotną hałasu jako opóźnienie lub transmitancję opartą na filtrze o skończonej odpowiedzi impulsowej. Aktualną konfigurację symulatora wybiera się przez odpowiednie ustawienie przepływu sygnałów. W ten sam sposób modyfikuje się sygnał na wejściu bloku algorytmu adaptacyjnego, w związku z czym można testować różne warianty symulowanej ścieżki wtórnej sygnału. We wszystkich blokach wymagających filtracji cyfrowej użyto filtrów o skończonej odpowiedzi impulsowej. Tego typu filtry zostały wybrane ze względu na możliwość łatwego kontrolowania ich fazy, jak również łatwość przenoszenia do modelu transmitancji wyznaczonych w rzeczywistym obiekcie.



Rys. 4.2. Główny ekran aplikacji umożliwiającej symulację kompletnego systemu ARH

Symulator może być zaimplementowany w systemie LabVIEW produkcji National Instruments. To środowisko jest odpowiednikiem kompilatora języka programowania C, z tą różnicą, że zapis programu następuje metodą graficzną. Taki zapis zwiększa jego czytelność i pozwala na szybkie wychwytywanie błędów. Został on stworzony w celu szybkiego prototypowania systemów akwizycji i przetwarzania sygnałów. Dzięki dostępności dużej biblioteki elementów podstawowych stworzenie interfejsu użytkownika jest znacznie prostsze niż w innych systemach programowania.

Główny ekran symulatora przedstawiony jest na rys. 4.2. Z jego poziomu można kontrolować wszystkie zmienne modelu, uruchamiać i zatrzymywać symulację w dowolnym momencie. Na wykresach przedstawione są przebiegi czasowe najważniejszych sygnałów. Z prawej strony ekranu, na górze, widoczne jest porównanie uśrednionych widm sygnału błędu, przy włączonym i wyłączonym systemie. Poniżej na ekranie znajduje się graficzna prezentacja współczynników wag filtra SOI i ich zmiany w czasie. Na panelu kontrolnym podawana jest skuteczność uzyskana przez badany system w skali liniowej. Do symulatora dodano moduł dźwiękowy, umożliwiający odtworzenie, po zakończeniu symulacji, sygnału kompensowanego i sygnału błędu. Często zdarza się, że za lepszy uznaje się nominalnie mniej skuteczny system ARH, który jednak generuje przyjemniejszy w odsłuchu efekt dźwiękowy.

4.2. Badanie układu dla różnych zaburzeń

Prawidłowo zrealizowany symulator powinien przynajmniej pozwalać na ustawienie jako sygnały wejściowe następujących źródeł:

- generatora szumu różowego i sygnału harmonicznego,
- odtwarzacza sygnałów zarejestrowanych.

Generator umożliwia podanie na wejściu symulatora sygnału sinusoidalnego o wybranej częstotliwości i jednostkowej amplitudzie. Niezależnie można do niego dodać sygnał losowy o charakterystyce szumu różowego. Możliwe jest też dowolne miksowanie i zmienianie proporcji amplitud obydwu sygnałów. Na wynikowy sygnał może zostać nałożony cyfrowy filtr dolnoprzepustowy o regulowanej charakterystyce i tym samym przybliżyć go do charakteru hałasu występującego w rzeczywistości. Po sprawdzeniu systemu na sygnałach teoretycznych na wejście modelu mogą być podane sygnały zarejestrowane w wyciszonym obiekcie. Mając tylko przebieg czasowy sygnału generowanego przez źródło pierwotne, można przybliżyć kanał akustyczny w modelu, podając jego odpowiedź impulsową. Dla dźwięków rozchodzących się w niezakłóconym żadnymi przeszkodami polu akustycznym bardzo często przyjmuje się, że transmitancja jest zwykłym opóźnieniem czasowym, wynikającym z prędkości rozchodzenia się fali dźwiękowej i odległości dzielącej dwa obserwowane punkty – taki typ transmitancji również może zostać ustawiony w symulatorze. Jeżeli oprócz sygnału odniesienia synchronicznie rejestruje się również sygnał kompensowany (w miejscu, gdzie w przyszłości ma znajdować się czujnik błędu), można również wprowadzić go do modelu. Dzięki temu symulator będzie znacznie dokładniej odwzorowywał pracę systemu rzeczywistego. Jest to szczególnie przydatne w systemach wykorzystujących jako sygnał odniesienia przebieg czasowy przyspieszeń drgań. W systemach takich transmitancja między punktem odniesienia a kompensowanym jest bardzo złożona, a do tego zmienna w czasie – stąd trudna do analitycznego przedstawienia. Proponowany symulator akceptuje sygnały w najczęściej spotykanych formatach zapisu bezstratnego:

- pliki dźwiękowe (mono i stereo) w formacie wave (*.wav),
- pliki LabVIEW Measurement File (*.lvm),
- dzięki wbudowanemu interpretatorowi języka programu MATLAB, sygnały można wczytać bezpośrednio z tego programu (sygnał może być wczytany w dowolnym formacie obsługiwany przez ten program).

4.3. Analiza wpływu ścieżki wtórnej

Przedstawiony model symulacyjny umożliwia badanie najbardziej popularnych wariacji podstawowego algorytmu adaptacji, opartego na gradiencie najszybszego spadku – algorytmie najmniejszych średnich kwadratów. Modyfikacje tego algorytmu z reguły mają na celu poprawienie właściwości użytkowych systemu ARH – zwiększenie dokładności, skrócenie czasu zbiegania czy zwiększenie odległości między źródłem wtórnym a miejscem wyciszczanym [14, 24, 33, 55]. Zastosowanie zmiennego kroku adaptacji w algorytmie NLMS umożliwia dopasowywanie jego wartości do aktualnego stanu pracy. Im wyższa wartość tego wzmocnienia, tym większa skuteczność i szybkość zbiegania algorytmu.

Największym zagrożeniem dla dużych jego wartości są pojawiające się chwilowo duże amplitudy sygnału odniesienia – to połączenie prowadzi do destabilizacji systemu. W związku z tym w algorytmie NLMS wartość kroku korekcji dopasowuje się do mocy sygnału w buforze. Stąd po wybraniu tego algorytmu w symulatorze sygnał podawany jest do niezależnego bloku, szacującego moc sygnału i wyliczającego odpowiedni krok adaptacji, który następnie podawany jest do bloku aktualizacji współczynników filtra. Z kolei implementacja algorytmu FxLMS polega na wstawieniu przed wyżej wymienionymi blokami, estymaty transmitancji ścieżki wtórnej (rys. 3.5). W symulatorze można wybrać między prostym opóźnieniem o stałą liczbę próbek (τ_2) oraz filtrem cyfrowym o transmitancji $S'(n)$. Teoretyczne podstawy i rodzaje algorytmów możliwych do wykorzystania w symulatorze przedstawione zostały w rozdziale 3.

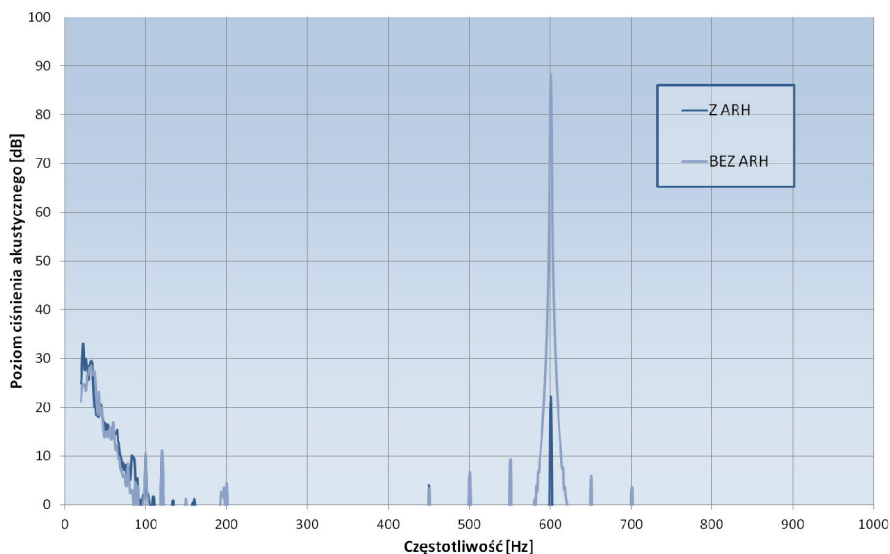
System umożliwia również badanie wpływu transmitancji ścieżki wtórnej na działanie układu ARH. W tym celu w ścieżkę sygnału kompensującego został wstawiony blok umożliwiający opóźnianie sygnału lub filtrowanie cyfrowe. Dzięki temu, używając tego modelu, można przeanalizować wpływ położenia przetwornika wtórnego w stosunku do położenia wyciszanej strefy (czyli umiejscowienia przetwornika błędu). Możliwość szybkiego modyfikowania bloku transmitancji ścieżki wtórnej (rys. 4.1) pozwala na zbadanie znaczenia niedokładności jej estymaty na osiągi systemu ARH. Przy analizowaniu zagadnienia wpływu ścieżki wtórnej na działanie danej aplikacji systemu ARH bardzo ważna jest prawidłowa identyfikacja właściwości (przede wszystkim liniowości i stacjonarności) środowiska, w którym testowany algorytm będzie używany.

Korzystając z interfejsu użytkownika aplikacji symulatora, można wgrać transmitancję ścieżki wtórnej wyznaczoną doświadczalnie. Zastosowanie filtra o skończonej odpowiedzi impulsowej powoduje, że procedura ta staje się bardzo prosta. Zasada działania tego typu filtra [80] sprawia, że aby wyznaczyć tę transmitancję, wystarczy na źródło wtórne podać dystrybucję Diraca i jednocześnie zmierzyć odpowiedź przetwornikiem błędu. Uzyskany w ten sposób sygnał nazywany jest odpowiedzią impulsową układu. Ponieważ jest ona odpowiednikiem wektora wag „naturalnego” filtra SOI (jakim jest ścieżka wtórna), można wykorzystać ten sygnał bezpośrednio w modelu symulacyjnym. Ważne jednak jest, aby częstotliwość próbkowania otrzymanego filtra była taka sama, jak w planowanej symulacji.

4.4. Weryfikacja modelu układu aktywnej redukcji hałasu

Tak działający układ symulacyjny wymaga weryfikacji, gdyby okazało się, że wyniki uzyskiwane z modelu tylko nieznacznie odbiegają od rzeczywistości, należy przeprowadzić identyfikację parametryczną, która skoryguje model systemu. Uproszczenia przyjęte w modelu bardzo często sprawiają, że skuteczną identyfikację da się przeprowadzić tylko w ograniczonym obszarze zmienianego parametru. Z tego powodu przyjmuje się, że nie ma modeli uniwersalnych. Jeżeli uzyskiwane wyniki znacząco odbiegają od rzeczywistości, trzeba przeprowadzić identyfikację strukturalną, a ewentualnie dopiero potem identyfikację parametryczną.

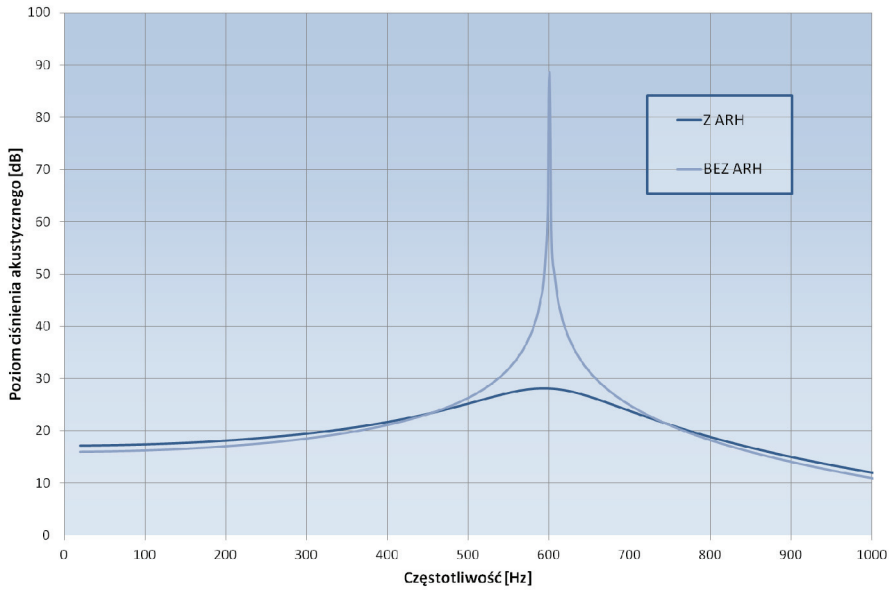
Zakres wykorzystania zaproponowanego modelu układu ARH ogranicza się do jakościowego badania skuteczności układu dla różnych konfiguracji czujników i parametrów sterujących, jak również do analizowania wpływu transmitancji ścieżki wtórnej. Z tego powodu wymagane jest prawidłowe modelowanie właśnie tych dwóch zagadnień. W trakcie weryfikacji modelu w pierwszej kolejności w modelu symulowano działanie układu ARH w komorze bezechowej. Uzyskane wyniki zestawiono z uzyskanymi w rzeczywistości dla różnych charakterystyk źródła hałasu. Dla sztucznie wygenerowanego sygnału harmonicznego o częstotliwości 600 Hz skuteczność układu jest zaprezentowana na rys. 4.3 i 4.4.



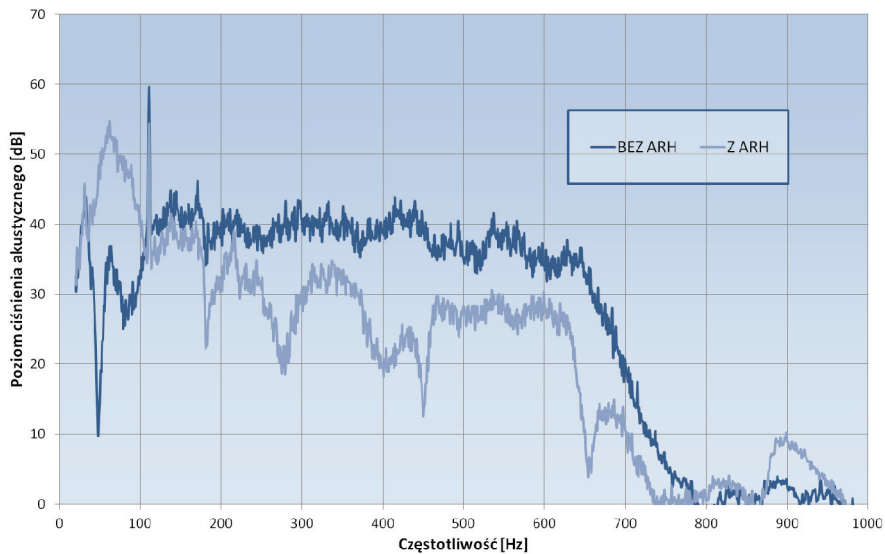
Rys. 4.3. Skuteczność układu ARH w komorze bezechowej dla pojedynczego tonu

Pierwszy z nich przedstawia rozkład ciśnienia akustycznego w dziedzinie częstotliwości, dla włączonego i wyłączzonego układu ARH. W tym przypadku sygnał kompensujący generowany był według algorytmu opóźnionego NLMS, uaktualniającego 512 współczynników filtra SOI. Częstotliwość obrotu pętli sterowania wynosiła 50 kHz, a odległość źródła wtórnego od miejsca kompensacji 93 cm. Takie same parametry zostały ustawione w symulatorze, a rezultaty przedstawia rys. 4.4.

Analizie zaś poddano pełne pasmo częstotliwości. Aby wykres był bardziej czytelny, na rysunku przedstawiono tylko jego wycinek.



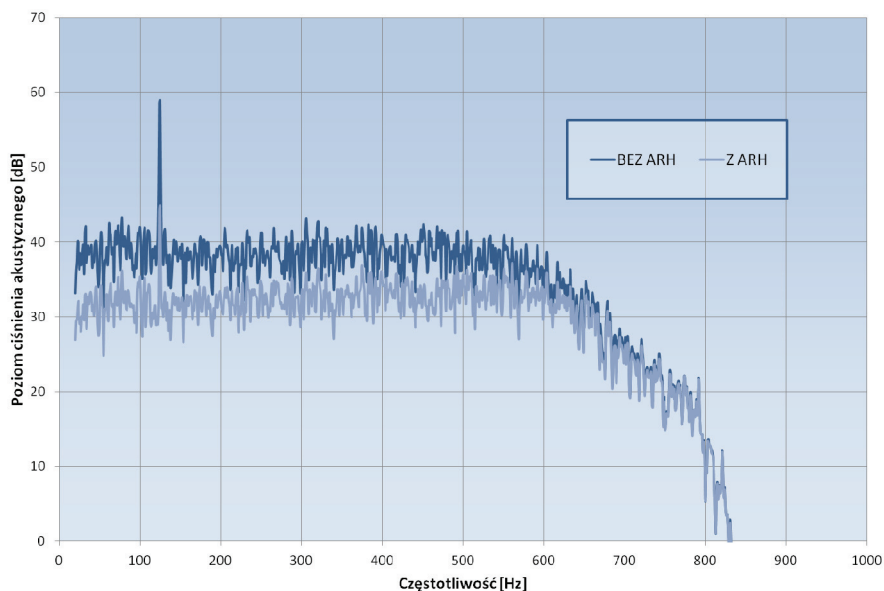
Rys. 4.4. Rezultat symulacji pracy układu ARH w komorze bezechowej dla zaburzenia harmonicznego



Rys. 4.5. Działanie układu ARH w komorze bezechowej dla składowej harmonicznej połączonej z szumem białym

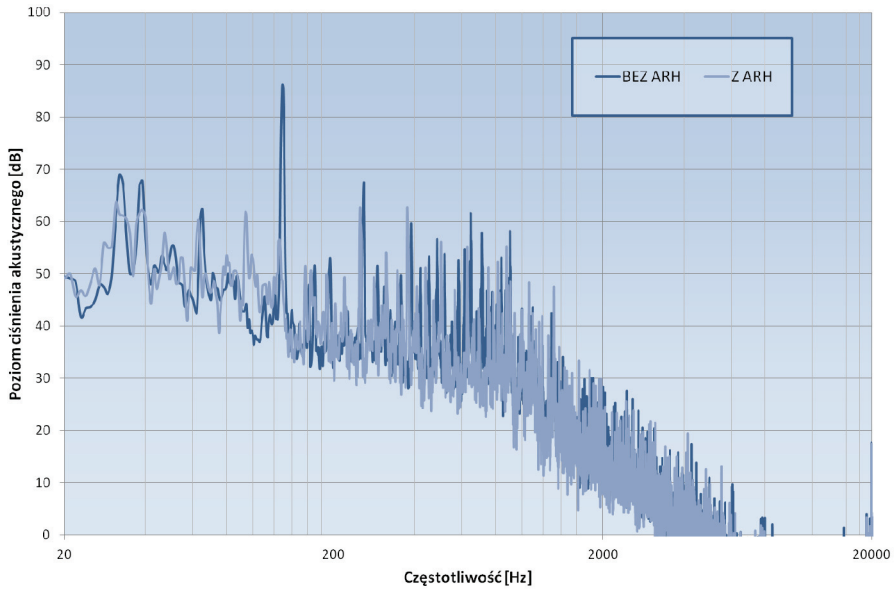
Jak widać na tym przykładzie, omawiany system bardzo dobrze modeluje układy aktywnej redukcji hałasu, kompensujące pojedynczą harmonikę. Uzyskano też podobną kompensację głównej składowej harmonicznej, jak w warunkach rzeczywistych. Całkowity spadek poziomu dźwięku wynosił około 25 dB w obydwu przypadkach (rys. 4.3 i 4.4). Główne różnice między symulacją a teorią sprowadzają się do różnych poziomów podstawy szumowej, które nie mają zasadniczego wpływu na wyniki.

Analogiczną zgodność w badaniach w komorze i symulacji uzyskano dla mocno zaszumionego zaburzenia harmonicznego (rys. 4.5 i 4.6). Tak samo, jak w poprzednim przypadku, główna różnica między modelem a rzeczywistością to inny poziom podstawy szumowej (w komorze wynosił około 0 dB dla wysokich częstotliwości). Dodatkowe zafalowanie rozkładu skuteczność układu, widoczne w badaniach w komorze, wynika z charakterystyki przenoszenia głośnika użytego jako źródło wtórne. W przypadku układów ARH nabiera ona szczególnego znaczenia, gdy zaburzenie ma charakter szerokopasmowy, tak jak właśnie występujący tu szum biały. Z tego też powodu składowa harmoniczna została słabiej zredukowana – znalazła się w gorszej części charakterystyki amplitudowej głośnika. Aby zwiększyć dokładność modelowania, należy w modelu uwzględnić charakterystykę przenoszenia źródła wtórnego. Jednak w badaniach porównawczych można uznać, że odwzorowanie zjawiska przez model jest wystarczające.

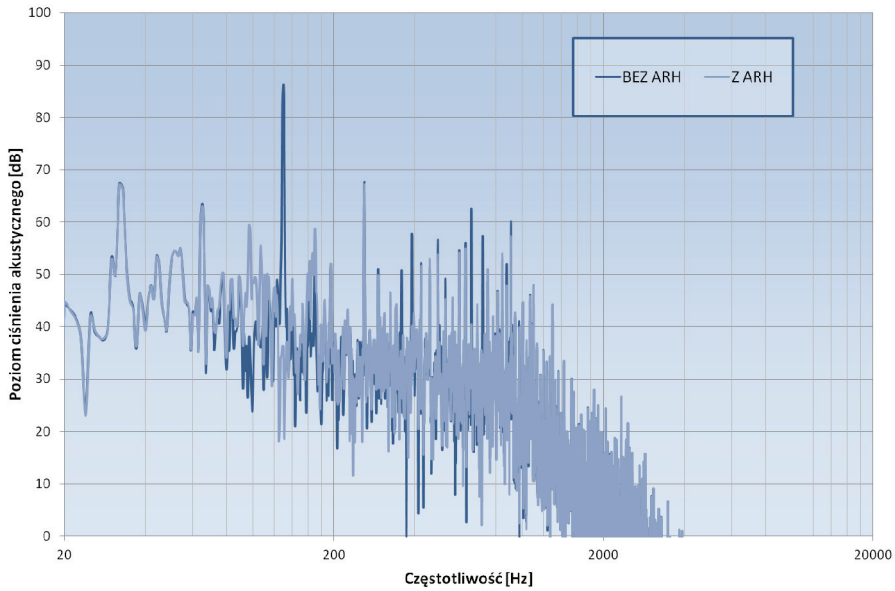


Rys. 4.6. Symulacja skuteczności ARH składowej harmonicznej o częstotliwości 120 Hz połączonej z szumem białym

Dla pełnego obrazu sprawdzono model dla najbardziej złożonego przypadku analizowanego hałasu – dźwięku zarejestrowanego w kabinie samochodu osobowego.

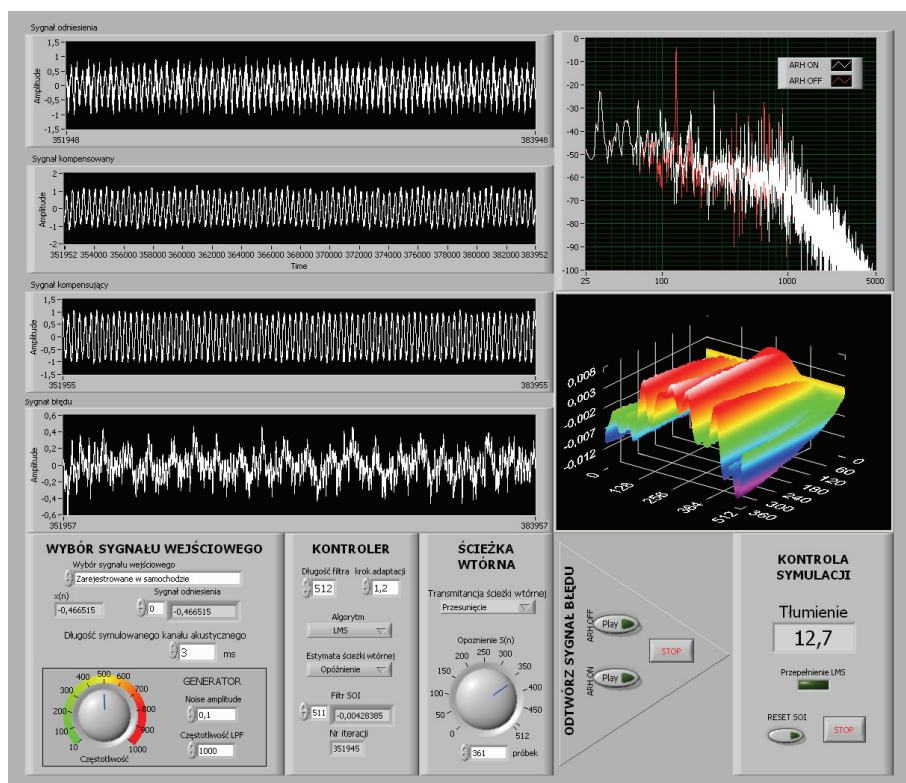


Rys. 4.7. Skuteczność algorytmu opóźnionego LMS w kabinie samochodu



Rys. 4.8. Skuteczność symulowanego układu ARH dla sygnału zarejestrowanego w samochodzie

Ciśnienie akustyczne zostało zarejestrowane nad tylnym fotelem pasażera Forda Fusion, na postoju, dla silnika pracującego z prędkością 4 tys. obrotów na minutę. Po zapisaniu przebiegu hałasu w tym miejscu został uruchomiony układ ARH. Uzyskane widmo poziomu ciśnienia akustycznego przy wyłączonym i włączonym układzie zaprezentowano na rys. 4.7. Następnie wyniki pomiarów porównano z tymi uzyskanymi podczas symulacji, gdzie wymuszeniem był sygnał zarejestrowany w kabinie, natomiast wszystkie parametry symulacji zostały ustawione tak, jak w samochodzie. Charakter widm uzyskanych z symulacji jest zbliżony (rys. 4.8), a wszystkie najważniejsze cechy widma doświadczalnego są zachowane. Podstawowa składowa harmoniczna w modelu jest kompensowana nieco zbyt mocno, ale ogólna skuteczność pozostaje na zbliżonym poziomie i wynosi około 12,5 dB. Widok interfejsu użytkownika modelu symulacyjnego w trakcie przeliczania omawianego przykładu przedstawiono na rys. 4.9.

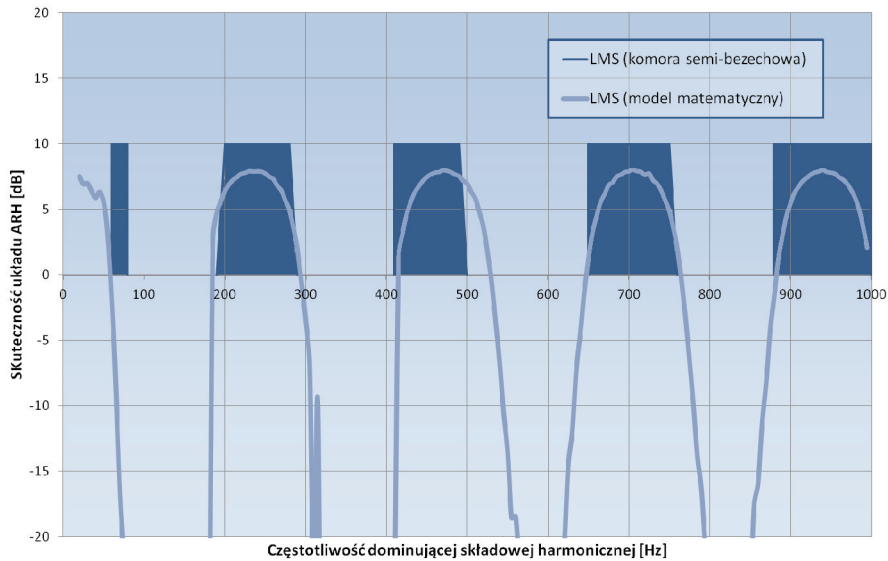


Rys. 4.9. Okno programu symulującego działanie układu ARH w samochodzie

Na podstawie przedstawionych wybiórczych, ale reprezentatywnych przykładów wyników badań można stwierdzić, że proponowany model jest wystarczająco dokładny do porównywania jakościowej konfiguracji ARH. Uzyskiwana skuteczność jest zbliżona do osiągnięć rzeczywistego układu. Zmiana ich wartości,

w wyniku zmiany parametrów pracy układu w symulacji, zachowuje ten sam trend, co w rzeczywistości.

Zdolność stworzonego modelu symulacyjnego do badania wpływu transmitancji ścieżki wtórnej na działanie układu ARH sprawdzono, wykorzystując efekt „grzebieńia”. Jego nazwa bierze się stąd, że w zależności od konfiguracji opóźnień w ścieżce pierwotnej i wtórnej układ bez ich kompensacji zachowuje się jak filtr grzebieniovyy dla pobudzeń harmonicznycch – w dziedzinie częstotliwości obszary zbieżności układu sąsiadują na przemian z zakresami, gdzie układ jest rozbieżny. Efekt ten, poruszony również w [13], szerzej zostanie opisany w rozdziale 8.



Rys. 4.10. Efekt filtra grzebienioviego dla układu ARH bez kompensacji opóźnień w ścieżce wtórnej

Jeżeli model symulacyjny układu prawidłowo odwzorowuje zagadnienie opóźnień, to powinien również odwzorowywać wspomniany efekt. Aby to sprawdzić, w komorze bezechowej zainstalowano układ ARH, działający pod kontrolą algorytmu LMS (bez estymaty transmitancji ścieżki wtórnej). Czujnik odniesienia (mikrofon) i źródło wtórne (głośnik) umieszczono w odległościach, które później zostały odwzorowane w symulacji. Następnie, wykorzystując generator przestrajalnego sygnału harmonicznego (ang. *sweep*), zarejestrowano zakresy, w których zachodziła interferencja destrukcyjna. W ten sposób otrzymano wykres przedstawiony na rys. 4.10. Zakresy oznaczone ciemnym kolorem pokazują dane doświadczalne: wartości dodatnie oznaczają częstotliwości, dla których algorytm był zbieżny, zero wartość oznacza, że algorytm był rozbieżny. Na wykres nałożono przebieg skuteczności algorytmu LMS w funkcji częstotliwości dźwięku (tonu prostego), uzyskany w symulacji. W komorze długość kanału akustycznego wynosiła 1 m, natomiast odległość źródła wtórnego od miejsca wyciszanego 1,2 m. W symulacji ta

ostatnia wynosiła 1,4 m. Te 20 cm różnicy jest odległością wirtualną, która przekłada się na czas, jaki zabiera przetwarzanie sygnału przez przetworniki, wzmacniacze itp., stąd faktyczne opóźnienie odpowiadało przemieszczeniu się fali dźwiękowej w powietrzu na odległość 1,4 m.

Jak widać na przedstawionym przykładzie, model bardzo dobrze oddaje charakterystykę działania układu z opóźnieniem. W pozostałych przypadkach, dla kilkunastu sprawdzonych wartości odległości, wyniki symulacji pokrywają się z danymi uzyskanymi doświadczalnie. Jedyną różnicą jest nieuwzględnienie pewnej nieregularności rozkładu, występującej w wynikach eksperymentu, gdzie szerokość kolejnych zakresów skutecznego działania układu nie jest jednakowa. Jednakże należy uznać, że model ten bardzo dobrze sprawdził się w modelowaniu zjawiska transmancji ścieżki wtórnej. Więcej przykładowych wyników opisujących to zagadnienie znajduje się w rozdziale 8.

Przeprowadzone badania weryfikacyjne udowodniły, że model symulacyjny o zaproponowanej strukturze jest użytecznym narzędziem, pozwalającym analizować działanie projektowanego układu ARH, na długo przed jego faktycznym uruchomieniem. Daje zbieżne rezultaty, zarówno z wynikami doświadczeń w komorze bezechowej, jak i w samochodzie. Pozwala prognozować zachowanie układu ARH również wtedy, gdy występuje spore opóźnienie w ścieżce wtórnej. Bardzo przydatny jest w badaniach porównawczych różnych konfiguracji układu i nie wymaga przeprowadzania procesu identyfikacji. Błąd względny uzyskiwanych rezultatów mieścił się w zakresie do 10 %; dla przedstawionego przykładu błąd odległości miejsca wyciszanego od źródła wtórnego wyniósł 5 cm.

5. Badania laboratoryjne układów aktywnej redukcji hałasu

5.1. Stanowisko do testowania metod sterowania

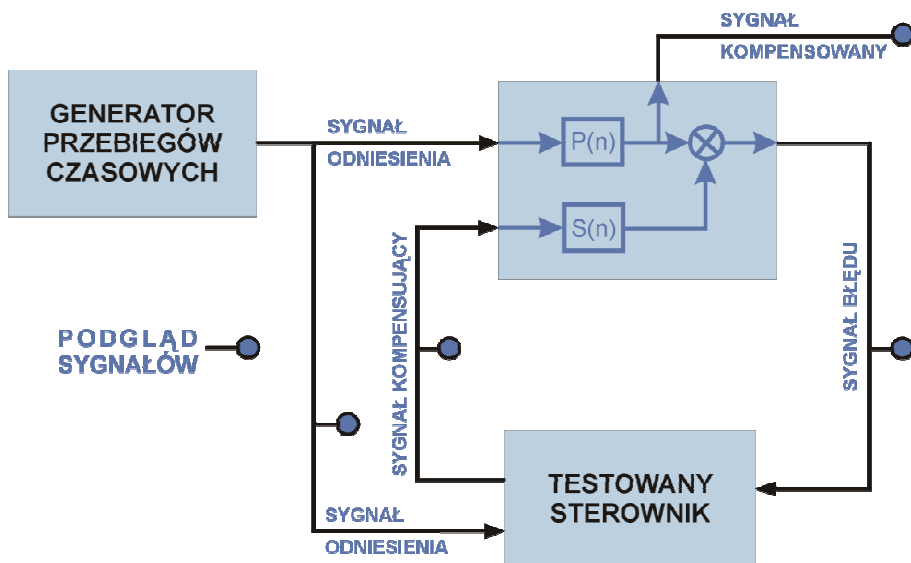
Algorytmy stosowane w układach aktywnej redukcji hałasu stawiają wysokie wymagania sterownikom cyfrowym, na których są implementowane. Systemy obliczeniowe odpowiednie do takich zastosowań muszą charakteryzować się wystarczająco dużą mocą obliczeniową, determinizmem czasowym wykonywania programu oraz niewielkim opóźnieniem między wejściem a wyjściem. Są to cechy, których weryfikacja symulacyjna (poza właściwym systemem) jest niezwykle trudna. W układach ARH, ze względu na dużą szybkość działania i silną zależność wyników obliczeń od szybkozmiennych sygnałów zewnętrznych, trudne jest nawet stwierdzenie, czy zaimplementowane algorytmy funkcjonują poprawnie – czy nie występują jakieś błędy w programie.

Przeciwnstawne wymagania dotyczące okresu pętli sterowania i dużej ilości obliczeń powodują, że ostateczna weryfikacja poprawności implementacji jest możliwa tylko w czasie rzeczywistym. W trakcie pracy duża liczba operacji, wykonywanych przez sterownik w określonej jednostce czasu, uniemożliwia używanie klasycznych narzędzi programistycznych do weryfikowania poprawności wykonywanego kodu (tzw. debuggerów). Próba zaś podejrzenia programu w trakcie pracy sprawia, że jego wykonywanie jest na chwilę wstrzymywane, co w systemach wymagających determinizmu czasowego (a takim jest układ aktywnej redukcji hałasu), prowadzi do uzyskania niepoprawnych wyników. Z drugiej strony, badanie sterownika cyfrowego w jego naturalnych warunkach pracy wymaga zaangażowania dużych zasobów i jest czasochłonne. Ponadto, przeprowadzenie racjonalnego wnioskowania bardzo często jest niemożliwe ze względu na zbyt złożony charakter odpowiedzi układu ARH.

Najlepszym rozwiązaniem problemu testowania sterownika aktywnej redukcji hałasu jest zbudowanie stanowiska testowego. Stanowi ono swego rodzaju symulator rozchodzenia się fali akustycznej i zachodzenia interferencji destruktywnej, działający w czasie rzeczywistym. W związku z tym stanowisko zawiera odpowiedniki funkcjonalne elementów rzeczywistego systemu: źródło pierwotne, źródło wtórne, strefę „ciszy”, ścieżki akustyczne (pierwotną, wtórną i błądu). Sterownik połączony jest z testerem sygnałami: odniesienia, kompensowanym i błędu (rys. 5.1). Takie stanowisko, oprócz możliwości arbitralnego generowania sygnałów zasilających układ, umożliwia również obserwację (a nawet rejestrację) wysyłanych przez niego sygnałów. Lepszy obraz tego, co się dzieje wewnątrz algorytmów sterujących, można uzyskać, gdy do sygnałów wymienianych między sterownikiem a stanowiskiem testowym wprowadzi się kilka sygnałów kontrolnych. Aby cały układ był stabilny, jeden takt pracy symulatora musi być równie krótki jak testowanego sterownika.

Z kolei opóźnienia między wejściami i wyjściami stanowiska testowego powinny być jak najmniejsze, aby nie ograniczać przestrzeni modelowanych opóźnień (np. w ścieżce błędu). Tester, w którym zwłoka jest minimalna, umożliwia sprawdzenie systemu w warunkach modelowych (ułatwia pierwsze uruchomienie syste-

mu). Takie idealne warunki badawcze pozwalają na sprawdzenie właściwości naturalnych sterownika, wynikających bezpośrednio z zastosowanych w nim struktur i algorytmów. Dzięki temu można wychwycić niepożądane działanie sterownika. W rzeczywistych warunkach trudno byłoby odseparować tego typu odpowiedzi od zaburzeń wynikających ze specyfiki aplikacji, a w konsekwencji postawić prawidłową diagnozę. Symulator pozwala również na oszacowanie wpływu zmiany poszczególnych parametrów systemu na ogólne osiągi układu aktywnej redukcji hałasu.



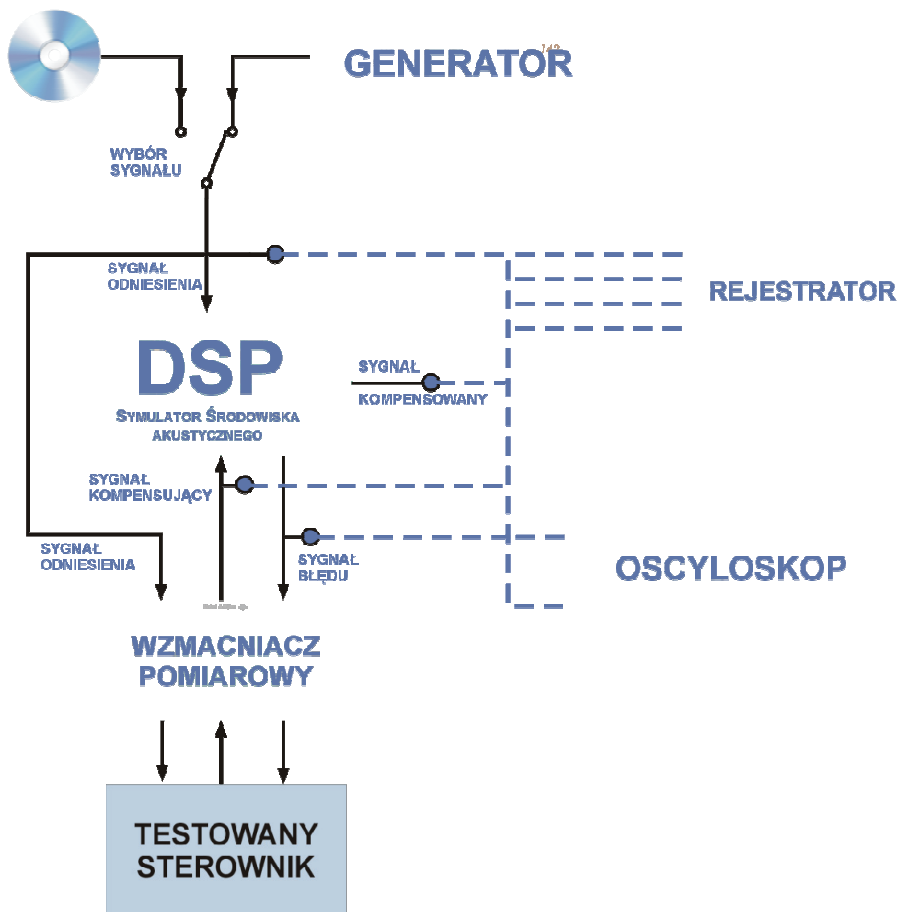
Rys. 5.1. Symulacja akustycznego środowiska pracy sterownika ARH

Idealne rozwiązanie stanowiska testowego musi stwarzać sprzyjające warunki do stopniowego zwiększania komplikacji modelu środowiska pracy sterownika. Kolejne dokładanie do badanego systemu obliczeniowego najbardziej znaczących zjawisk zachodzących w warunkach rzeczywistych umożliwia bowiem stopniowe przybliżanie parametrów pracy tego systemu do wartości optymalnych dla danej aplikacji. Na tym etapie wdrażania układu aktywnej redukcji hałasu ewentualne poprawki strukturalne czy parametryczne wprowadza się bardzo prosto i szybko otrzymuje się rezultaty.

5.1.1. Budowa stanowiska

Bazując na powyższych wytycznych, zbudowano wzorcowe stanowisko testowe, składające się z niezależnych komponentów symulujących i rejestrujących (rys. 5.2). Podstawowym elementem stanowiska jest symulator środowiska akustycznego, wykorzystujący procesor DSP firmy Texas Instruments serii 6713. Dzięki zastosowaniu wyspecjalizowanej, szybkiej jednostki obliczeniowej, wykonującej instrukcje w arytmetyce zmiennoprzecinkowej, możliwe jest testowanie sterownika FPGA pracującego w warunkach, w jakich będzie on działał w pojeździe. Jako źródła

pierwotnego (odpowiednika źródła hałasu w rzeczywistym systemie) można używać zamiennie: generatora sygnałów harmoniczych, odtwarzacza CD (z nagranyymi na płycie sygnałami zarejestrowanymi w różnych pojazdach) lub generatora szumu różowego. W zależności od wariantu prowadzonego testu, do symulatora i testowanego sterownika podłączony został jeden z nich (generowany przebieg był wyświetlany na oscyloskopie cyfrowym). Wyjście sygnału kompensującego w badanym sterowniku zostało podłączone bezpośrednio do odpowiedniego wejścia w symulatorze (opcjonalnie można je również wyświetlać na oscyloskopie). Na podstawie tych dwóch wejść (sygnału odniesienia i kompensującego) symulator generował sygnał błędu i kontrolnie sygnał kompensowany. Sygnał błędu przesyłany był zwrótnie do badanego sterownika i wyświetlany na oscyloskopie.



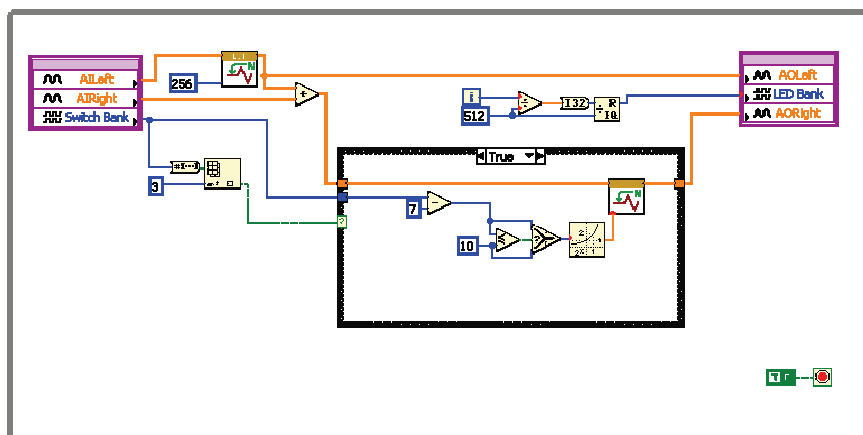
Rys. 5.2. Schemat stanowiska testowego sterownika ARH

Po pierwszym etapie testów stanowisko zostało uzupełnione o jeszcze jeden element, który jest konieczny w trakcie badań w komorze bezechowej i samocho-

dzie. Chodzi mianowicie o wzmacniacz kondycjonujący sygnały z przetworników (mikrofonów lub akcelerometrów) i dopasowujący sygnał kompensujący, zasilający wzmacniacz mocy głośnika (źródła wtórne). Uwzględnienie na tym etapie tego elementu miało na celu sprawdzenie wpływu charakterystyk przenoszenia (amplitudowych i fazowych) torów sygnałowych wzmacniacza na funkcjonowanie układu aktywnej redukcji hałasu. Niezastosowanie wzmacniacza pomiarowego w ogóle spowodowałoby niepełne wykorzystanie dynamiki przetworników A/C i C/A, występujących w sterowniku układu ARH – co w konsekwencji oznaczałoby znacznie niższą jego skuteczność ze względu na niską rozdzielczość obliczeń.

W testach wykorzystano trzy niezależne źródła sygnałów, reprezentujące źródło pierwotne:

1. generator harmoniczny – typowy generator laboratoryjny z regulacją amplitudy sygnału wyjściowego, generujący sinusoidy o częstotliwościach od 0,1 Hz do 100 kHz,
2. odtwarzacz CD z płytą testową, na której zostały zapisane sygnały zarejestrowane mikrofonem w kabinach różnych samochodów osobowych (Nissan Micra, Ford Sierra); niektóre z rejestracji zapisane były stereofonicznie (jeden z kanałów rejestrowany był na przednim, a drugi na tylnym siedzeniu w samochodzie),
3. generator losowy ograniczony pasmowo – na potrzeby testowania sterownika ARH został napisany specjalny program komputerowy, który przez kartę dźwiękową generował szum różowy; częstotliwość graniczną pasma, w którym generowany jest sygnał, można regulować w zakresie od 10 Hz do 1000 Hz; dzięki zastosowaniu filtrów NOI powyżej tej częstotliwości sygnał maleje w tempie 250 dB/okt.



Rys. 5.3. Schemat programu sterującego symulatora środowiska akustycznego

Program sterujący został napisany w graficznym zintegrowanym środowisku LabVIEW firmy National Instruments (jest on przedstawiony na rys. 5.3).

Do symulowania środowiska akustycznego układu aktywnej redukcji hałasu wykorzystano układ elektroniczny, zawierający procesor sygnałowy i zestaw wysokiej klasy przetworników A/C i C/A. Oprócz tego w urządzeniu znajdowała się nieulotna pamięć typu FLASH (pamięć programu). Wyposażenie układu w pamięć, z której może on ładować program w trakcie swojego rozruchu, sprawiło, że symulator mógł działać jako niezależne urządzenie (bez konieczności łączenia się w trakcie pracy z komputerem). Dzięki zastosowaniu dodatkowego układu interfejsu USB – JTAG, możliwe stało się programowanie procesora bezpośrednio z komputera. Przez ten sam kanał można było również zapisać w pamięci układu wygenerowane na komputerze charakterystyki filtrów, wykorzystywane do modelowania środowiska akustycznego. Używając umieszczonych na płycie przycisków, wybiera się różne tryby pracy symulatora i ustawia wartości opóźnień. Wydawane komendy potwierdza zapalenie się odpowiedniej kombinacji diod na płycie.

5.1.2. Redukcja ilości obliczeń

Duża szybkość prowadzonych obliczeń w procesorach sygnałowych, potrzebna do badania układów FPGA w czasie rzeczywistym, wynika z wykorzystania techniki pakietowania przetwarzanych danych. Blokowe (buforowane) przetwarzanie zwiększa przepustowość, ale powoduje powstawanie opóźnień między wejściem a wyjściem układu. Strategia działania symulatora została oparta na wykorzystaniu podwójnego bufora. Umożliwia on niezakłócone działanie programu symulatora – gdy jedna część danych jest przesyłana z i do przetworników, druga jest przetwarzana zgodnie z zaprogramowanym algorytmem. Dzięki takiemu podejściu dwukrotnie zwiększa się przepustowość układu, jednak wykorzystanie podwójnego bufora powoduje również dwukrotne zwiększenie już istniejących opóźnień. Z tego powodu wskazane było uproszczenie obliczeń, tak aby wielkość buforów danych pozostawała na minimalnym poziomie. W układzie ARH takie uproszczenie jest możliwe, pod warunkiem że określona zostanie część wspólna transmitancji $P(x)$ i $S(x)$. A to z kolei można uzyskać przy założeniu, że fale akustyczne rozchodzą się w polu swobodnym, a źródło pierwotne, wtórne i przetwornik błędu są ustawione w jednej linii. Tak więc mamy:

$$P(x) = P_c(x) \cdot U_c(x) \quad (5.1)$$

gdzie:

$$U_c(x) \equiv S(x) \quad (5.2)$$

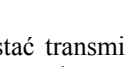
Zgodnie z założeniami, $P_c(x)$ (część transmitancji znajdująca się w ścieżce pierwotnej symulatora) reprezentuje transmitancję między źródłem pierwotnym a źródłem wtórnym, natomiast $U_c(x)$ – transmitancję między źródłem wtórnym a przetwornikiem błędu. Interpretacją fizyczną takiego zabiegu jest przeniesienie interferencji destruktywnej do punktu umieszczenia źródła wtórnego. Tak wyprowadzona transmitancja $U_c(x)$ może być wstawiona w ścieżkę błędu, w związku z tym uwzględniona zostanie tylko raz w każdym cyklu wykonania programu. W modelowanych zagadnieniach transmitancja ta z reguły jest znacznie bardziej złożona niż występująca między źródłami pierwotnym i wtórnym, w związku z tym uzyskujemy istotną redukcję obliczeń. Takie podejście zostało zastosowane w algo-

rytmie zaimplementowanym w opisywanym symulatorze. Dzięki temu zabiegowi częstotliwość próbkowania wynosiła 88,2 kHz, a długość pojedynczego bufora jedynie 30 próbek.

5.1.3. Warianty symulacji

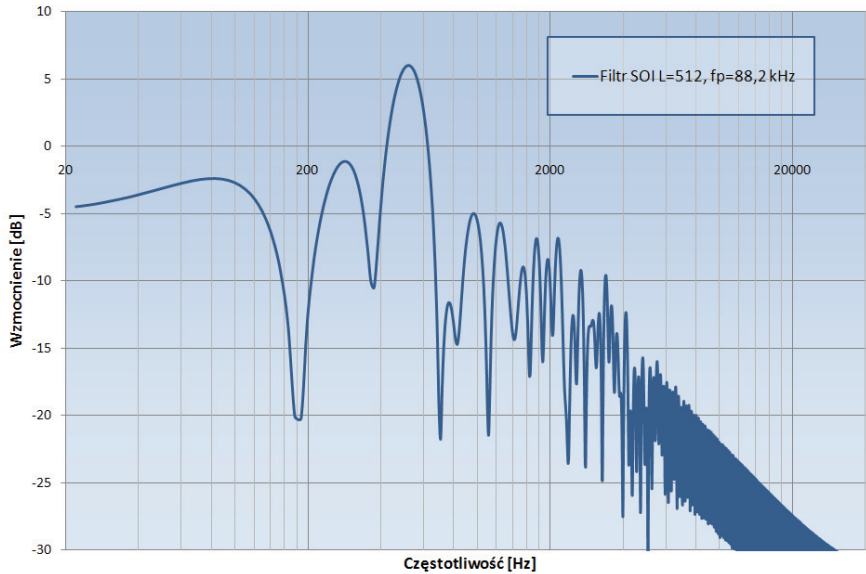
W programie symulatora zostały uwzględnione dwie postacie transmitancji, umieszczonej w ścieżce błędu. W pierwszym przypadku jest ona symulowana jako opóźnienie czasowe. Wartość tego opóźnienia można regulować zgodnie z kodami pokazanymi w tab. 5.1. Dla przyjętej częstotliwości próbkowania oznacza to możliwość ustawienia symulowanej odległości między źródłem wtórnym a miejscem kompensacji hałasu w zakresie od 3 mm do blisko 4 m. Taki wybór jest wystarczający do sprawdzenia działania sterownika w większości spotykanych zastosowań. Dla przykładu, w samochodzie odległość między głośnikiem zamontowanym w drzwiach a głową pasażera wynosi około 1 m.

Tab. 5.1. Ustawienia opóźnienia czasowego w testerze sterowników układów ARH

USTAWIENIE		OPÓŹNIENIE	
BINARNIE	DZIESIĘTNIE	PRÓBEK	MILISEKUND
	0	1	0,01
	1	2	0,02
	2	4	0,05
	3	8	0,09
	4	16	0,18
	5	32	0,36
	6	64	0,73
	7	128	1,45
	8	256	2,90
	9	512	5,80
	10	1024	11,61

Drugą postać transmitancji reprezentuje filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej. Zgodnie z własnościami takiego filtra, ciąg jego współczynników jest równoważny dyskretnej postaci odpowiedzi impulsowej ścieżki, a tą można łatwo wy-

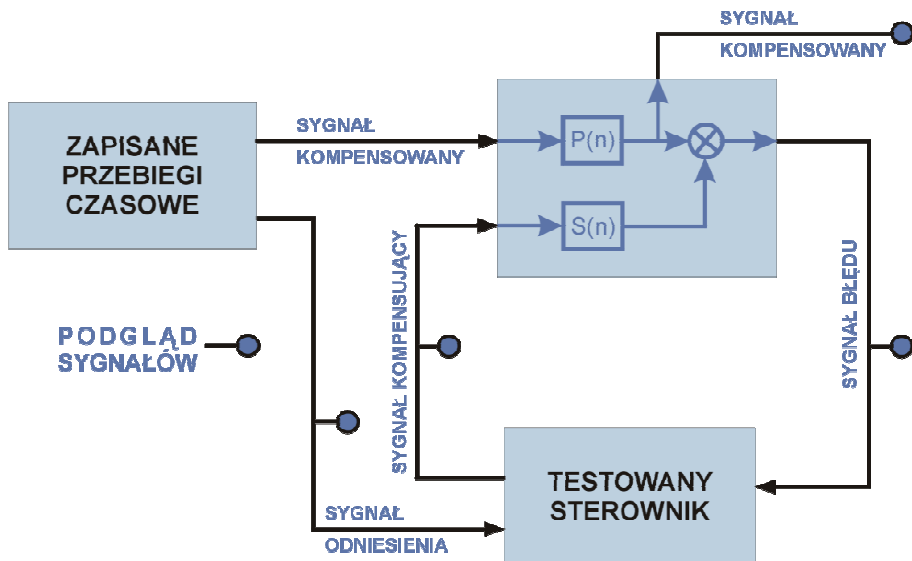
znaczyć doświadczalnie. Można także zmierzyć rzeczywistą transmitancję między źródłem wtórnym a miejscem, w którym planuje się obniżyć poziom hałasu i wykorzystać ją w symulatorze – testowany sterownik jest wtedy poddawany próbie w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Przykładową charakterystykę amplitudową filtra używanego do testów przedstawiono na rys. 5.4. O tym, która postać transmitancji jest w danym momencie używana, decyduje pozycja przełączników znajdujących się na płycie.



Rys. 5.4. Charakterystyka amplitudowa filtra reprezentującego kabinę samochodu osobowego

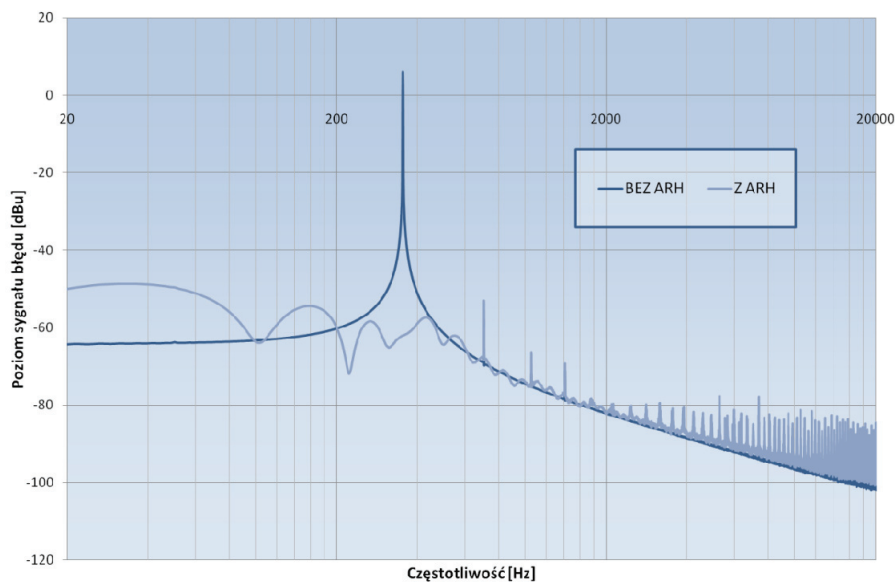
Używając stworzonego symulatora, można również testować sterownik, przy wykorzystaniu rzeczywistego sygnału kompensowanego. Pozwala on na sprawdzanie sterownika dla aplikacji, w których transmitancja między źródłami pierwotnym i wtórnym jest zbyt złożona, aby można było ją opisać prostą zależnością analityczną. Dotyczy to między innymi przypadków, w których sygnał odniesienia jest sygnałem drganiowym. Umożliwia również testowanie sterownika dla układów ARH, w których transmitancja ta znacząco ewoluje w trakcie ich działania.

Pierwszym krokiem do takich badań było przygotowanie synchronicznie zarejestrowanych sygnałów odniesienia i kompensowanego. W samochodzie sygnałem odniesienia mogą być drgania kadłuba głowicy, a sygnałem kompensowanym – przebieg ciśnienia akustycznego w miejscu, gdzie znajduje się głowa pasażera. Poszczególne kanały zostały podłączone do symulatora zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 5.5. Symulator opóźnienia w ścieżce pierwotnej (reprezentowany przez $P(x)$) został wyłączony. Wykorzystanie rzeczywistego sygnału kompensującego spowodowało, że wyniki uzyskiwane na tak zbudowanym stanowisku były bardzo bliskie osiąganym w rzeczywistości.



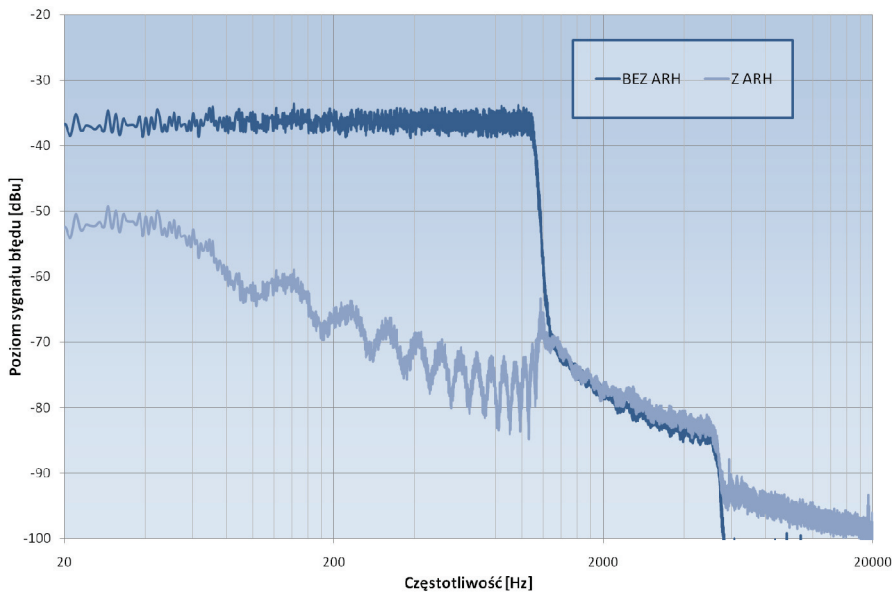
Rys. 5.5. Testowanie sterownika układu ARH dla rzeczywistej ścieżki pierwotnej

5.1.4 Przykładowe wyniki testów



Rys. 5.6. Skuteczność sterownika wykorzystującego układ FPGA na stanowisku testowym (wymuszenie harmoniczne)

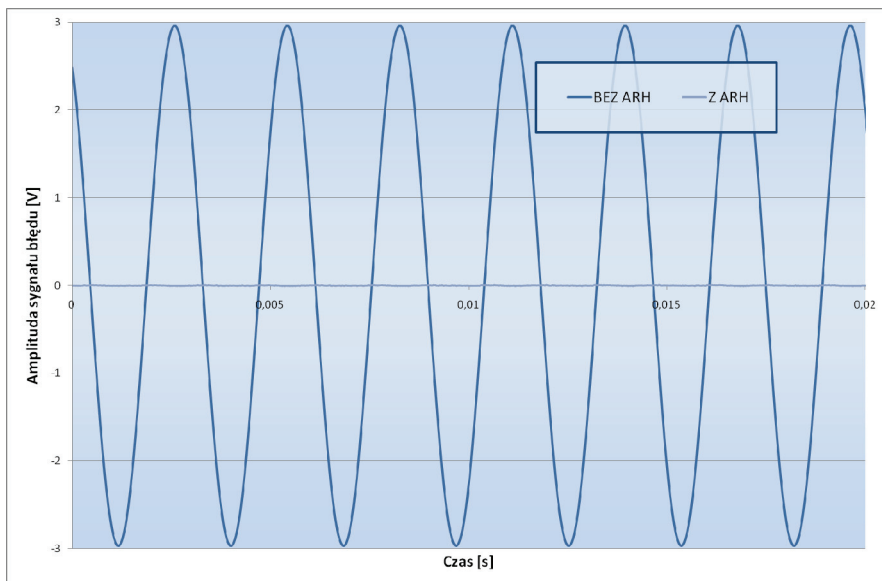
Na rys. 5.6 i 5.7 przedstawiono widma poziomego sygnału błędu (dla poziomu odniesienia wynoszącego 1VRMS), uzyskanego w trakcie testowania sterownika na stanowisku testowym. Sercem badanego sterownika był układ FPGA Virtex-5 LX50 firmy Xilinx. Częstotliwość próbkowania systemu wynosiła 50 kHz, natomiast współczynnik adaptacji wynosił 1×10^{-5} . W przedstawionych przykładach stanowisko testowe modelowało środowisko akustyczne, w którym ścieżka pierwotna była kanałem akustycznym o długości 1,5 m, natomiast odległość między symulowanym źródłem wtórnym a miejscem kompensacji hałasu wynosiła 0,5 m. Ścieżkę wtórną modelowało opóźnienie czasowe sygnału. Pasma częstotliwości, w którym pracował sterownik, zostało ograniczone jedynie od dołu – sygnały docierające do sterownika filtrowane były przez filtr górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej 10 Hz.



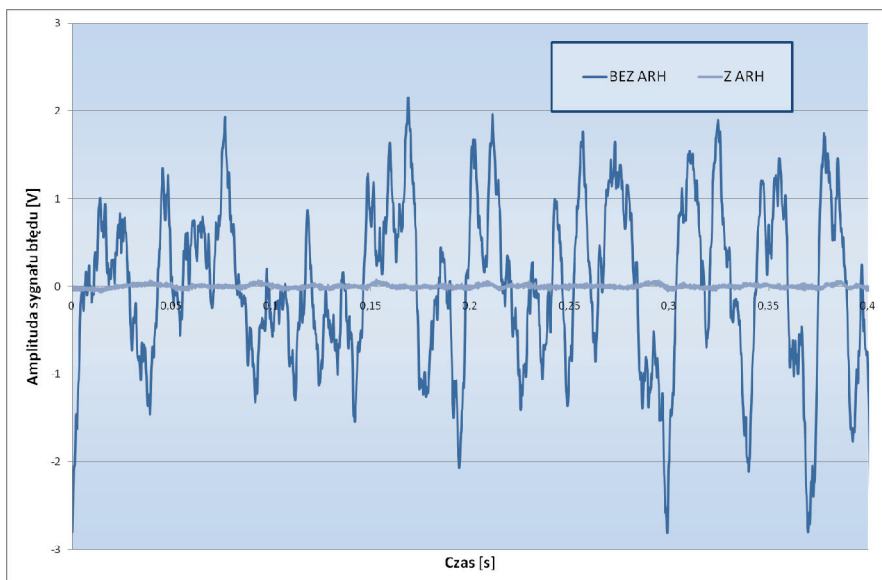
Rys. 5.7. Skuteczność sterownika wykorzystującego układ FPGA na stanowisku testowym (wymuszenie sygnałem losowym)

Na kolejnych rysunkach (5.8 i 5.9) zaprezentowano przebiegi czasowe zarejestrowane na wejściach symulatora. Wartości reprezentują amplitudę napięcia sygnału błędu, a więc poziomu dźwięku w miejscu aktywnej redukcji. Pierwszy wykres przedstawia działanie układu ARH, kiedy do symulatora podłączony był sterownik działający pod kontrolą algorytmu FxLMS, gdzie parametry symulacji były identyczne z tymi przedstawionymi w pierwszym przykładzie. Symulowanym akustycznym sygnałem zaburzającym była sinusoida o częstotliwości 350 Hz. Przedstawiony wykres odpowiada redukcji o 42 dB (rys. 5.8). Drugi przebieg czasowy przedstawia skuteczność tego samego układu ARH w kompensacji hałasu samochodu. W tym przypadku symulator odwzorowuje środowisko akustyczne kabiny małego samochodu osobowego. Do tego celu wykorzystano sygnały akustyczne: odnie-

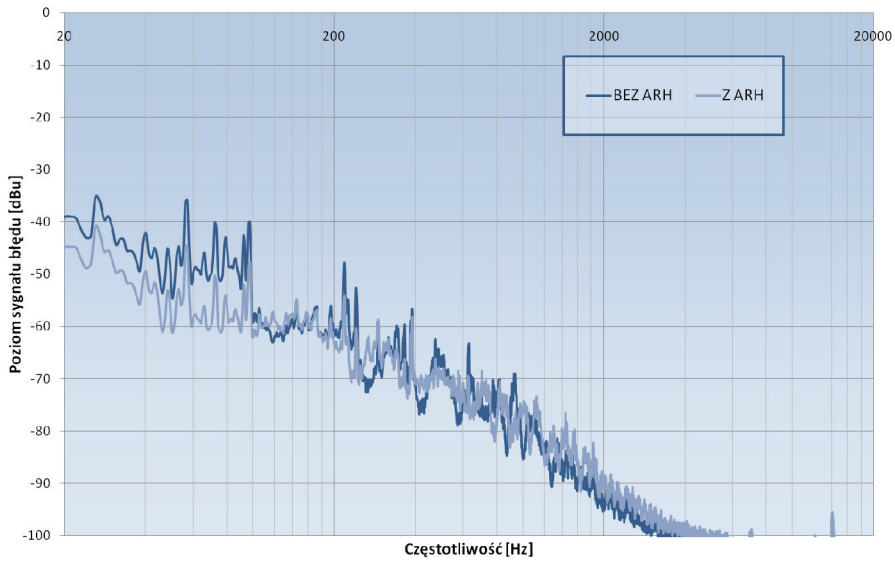
sienia i kompensowany, synchronicznie zarejestrowane w czasie jazdy na drugim biegu przy prędkości około 70 km/h.



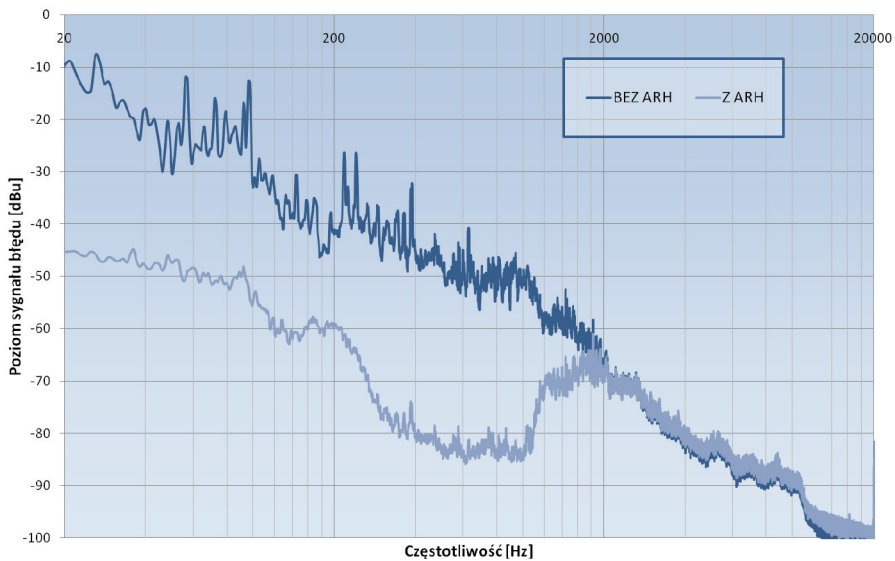
Rys. 5.8. Działanie układu ARH w symulowanym środowisku akustycznym, przed i w trakcie kompensacji pojedynczego tonu



Rys. 5.9. Działanie układu ARH w symulowanym środowisku kabiny samochodu osobowego



Rys. 5.10. Działanie układu ARH w symulowanej kabinie małego samochodu osobowego (sterownik bez wzmacniacza kondycjonującego)



Rys. 5.11. Skuteczność układu ARH, wykorzystującego wzmacniacz pomiarowy, w symulowanej kabinie małego samochodu osobowego

Przykładem, pokazującym znaczenie stosowania wzmacniaczy pomiarowych w układach ARH, jest kolejna analiza. Działanie układu redukującego hałas w kabinie samochodu przedstawiają rys. 5.10 i 5.11. Akustyczne sygnały, odniesienia i kompensowany, zostały wprowadzone do symulatora zgodnie z rys. 5.1. Sterownik uaktualniał wagi filtra SOI o długości 512 współczynników zgodnie z algorytmem FxLMS. W obydwu przypadkach częstotliwość próbkowania wynosiła 50 kHz, a krok adaptacji 1×10^{-5} . Odzwierciedlona przez symulator odległość między źródłem wtórnym a miejscem aktywnej kompensacji hałasu wynosiła 46 cm.

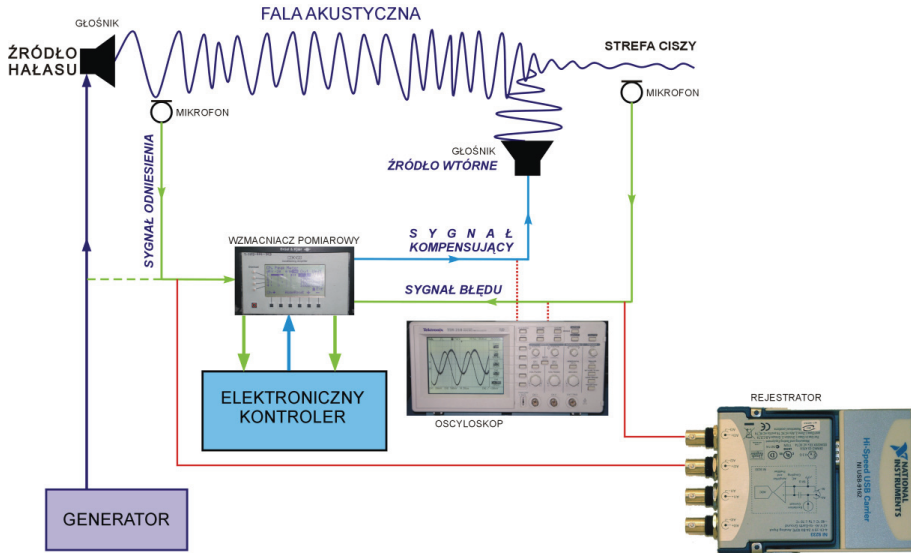
Na rys. 5.10 przedstawiono widmo sygnału dla układu ARH, w którym sterownik nie wykorzystywał wzmacniacza kondycjonującego sygnał. Drugi rysunek również przedstawia widma sygnału błędu dla włączonego i wyłączzonego układu ARH, ale wykorzystującego wzmacniacz, dopasowujący sygnały mierzone przez sterownik do zakresu pomiarowego przetworników wejściowych. To właśnie z tego wynika różnica w dynamice sygnałów na jednym i drugim wykresie. Pomimo że zastosowanie wzmacniacza wprowadza dodatkowe opóźnienia, wpłynął on pozytywnie na osiągi układu, powodując spadek uzyskanego ogólnego poziomu dźwięku. Zwiększył się również zakres częstotliwości, w których występował pozytywny efekt interferencji destrukcyjnej.

5.2. Komora bezechowa jako narzędzie badawcze

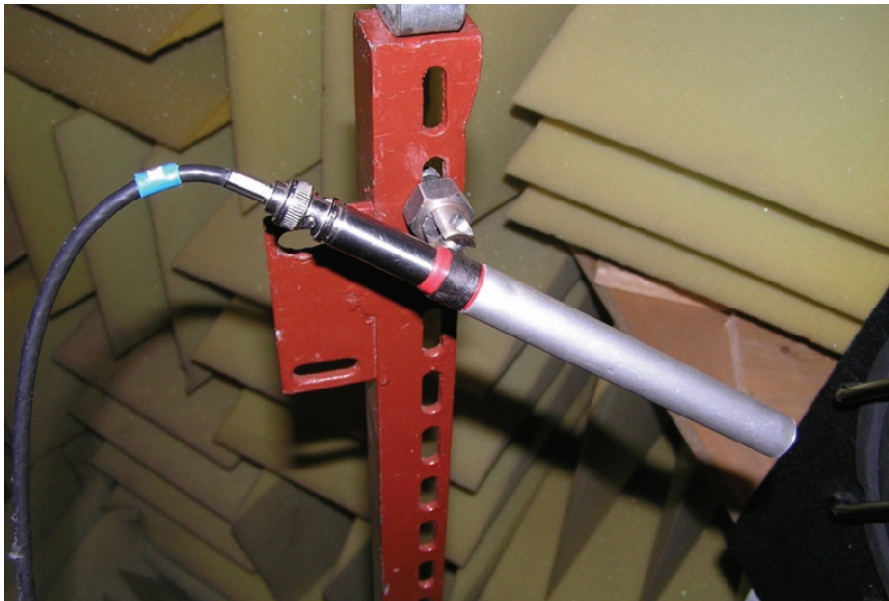
Najbardziej racjonalną metodą wdrażania układu czynnej redukcji hałasu jest podzielenie procesu na jak najmniejsze kroki. Zakłada ona, że na każdym kolejnym etapie należy nieznacznie zwiększać stopień złożoności przez uwzględnianie kolejnych cech, spodziewanych w układzie docelowym. Oznacza to, że należy zacząć od analizy wibroakustycznej źródła hałasu i przestrzeni wokół planowanego miejsca obniżonego poziomu dźwięku, następnie trzeba określić wstępną koncepcję systemu i zgodnie z tym zarejestrować próbki sygnałów. W kolejnym kroku powinno się wybrać docelową strukturę układu, uwzględniając wcześniej wykonane pomiary. Zanim zaimplementuje się wybrany algorytm sterujący w sterowniku, należy przeprowadzić komputerową symulację pracy układu. Przed programowaniem właściwego systemu wskazane jest podjęcie decyzji w kluczowych zagadnieniach – wdrażanie koncepcji na docelowym sterowniku jest bardzo pracochłonne, a każda zasadnicza zmiana po tym etapie wymaga programowania od nowa. Bardzo pomocne przy implementowaniu algorytmów jest korzystanie ze stanowiska do testowania sterowników w czasie rzeczywistym. Gotowy system przed sprawdzeniem go w samochodzie wymaga jeszcze przetestowania w komorze akustycznej. W razie nieprawidłowej pracy sterownika znacznie łatwiej jest zidentyfikować problem w komorze, niż w samochodzie.

Przyjmując taką metodykę postępowania po gruntownym przetestowaniu sterownika na stanowisku testowym, przeprowadzono jego badania w komorze bezechowej. Celem pomiarów było przeanalizowanie zachowania zaimplementowanego systemu aktywnej redukcji hałasu (wykorzystującego algorytm FxLMS) w rzeczywistej kompensacji dźwięków rozchodzących się w powietrzu. Strukturę stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 5.12. Źródłem pierwotnym hałasu był głośnik niskotonowy, umieszczony w rogu pomieszczenia, zasilany stacjonarnym wzmacniaczem audio, na którego wejściach podawane były sygnały testowe. W badaniach

wykorzystano zarówno sygnały sztucznie wygenerowane, jak i rzeczywiste – zarejestrowane w kabinach samochodów.



Rys. 5.12. Schemat logiczny stanowiska badawczego systemów aktywnych w komorze bez-echoowej



Rys. 5.13. Prosta modyfikacja mikrofonu, poprawiająca charakterystykę kierunkową

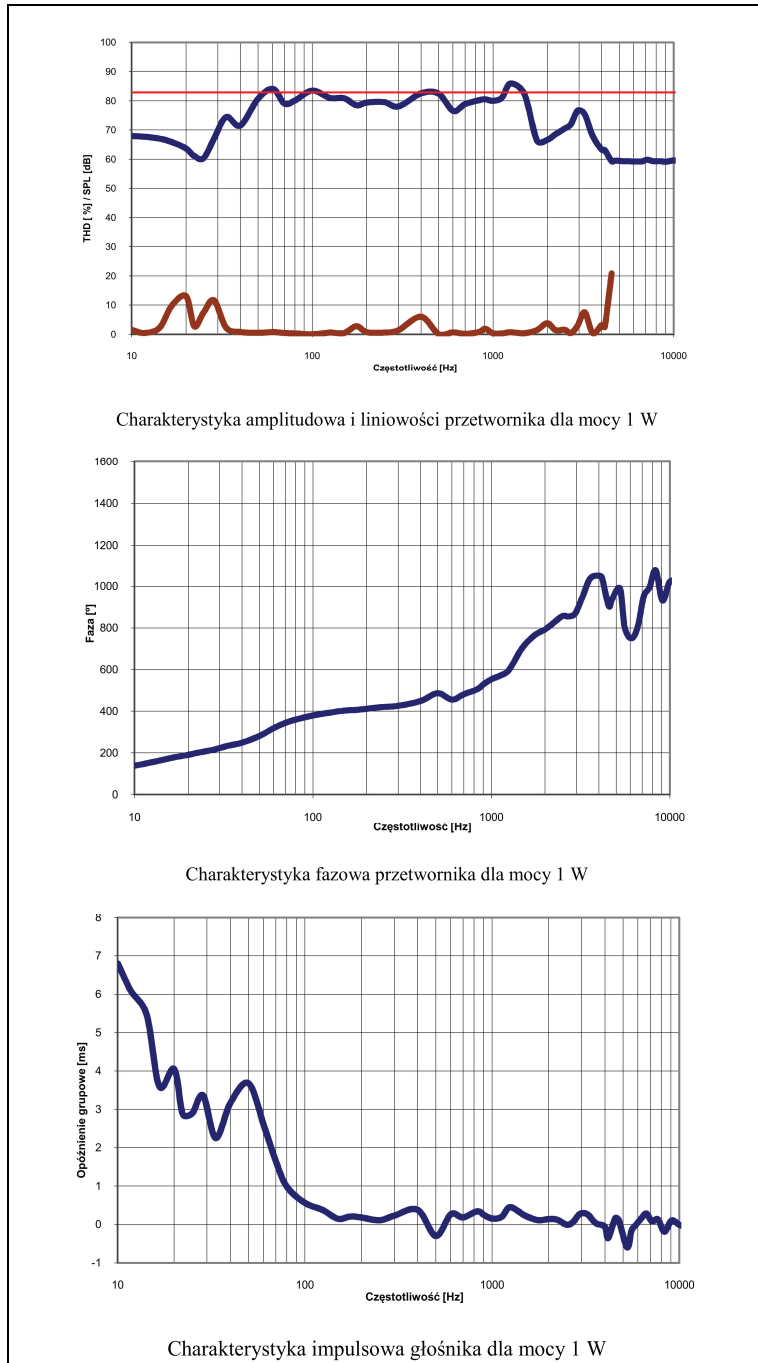
Testom poddano dwie konfiguracje systemu aktywnej redukcji hałasu: w pierwszej sygnał odniesienia pobierany był bezpośrednio w postaci elektrycznej z generatora sygnałów, w drugiej hałas rejestrował kierunkowy mikrofon, umieszczony tuż przed źródłem pierwotnym i skierowany na środek membrany. Aby uzyskać charakterystykę zbliżoną do kierunkowej mikrofonu kardioidalnego, na mikrofon założono 10-centymetrową rurkę o średnicy wewnętrznej zbliżonej do średnicy mikrofonu (rys. 5.13). Różnica między obydwoma sygnałami polega głównie na uwzględnieniu charakterystyki źródła pierwotnego w przypadku sygnału odniesienia rejestrowanego mikrofonem. Przez analogię – mikrofon jako źródło sygnału odniesienia reprezentował taki sam przetwornik zainstalowany w kabinie samochodu, natomiast sygnał odniesienia pobierany bezpośrednio z generatora symulował użycie w samochodzie akcelerometru (brak sprzężenia zwrotnego). Oczywiście, takie porównanie jest dopuszczalne pod warunkiem, że dostępne są sygnały zarejestrowane w samochodzie. Widok wnętrza komory z zainstalowanymi przetwornikami przedstawia rys. 5.14.



Rys. 5.14. Widok wnętrza komory bezchowej w trakcie badań

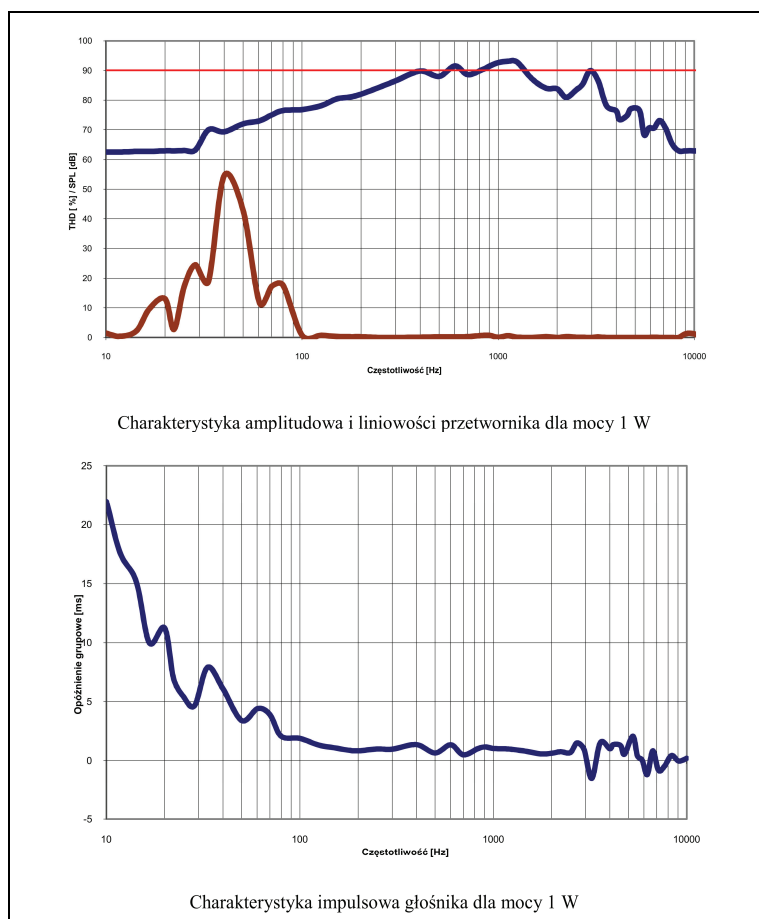
Wzdłuż przekątnej komory zostały zainstalowane pozostałe komponenty systemu aktywnej redukcji hałasu: źródło wtórne w postaci głośnika niskotonowego i mikrofon sygnału błędu. Dzięki zamontowaniu mikrofonu i źródła wtórnego na listwie zaciskowej możliwe było regulowanie odległości między poszczególnymi komponentami systemu. A zmiana odległości przetwornika błędu od źródła wtórnego umożliwiała sterowanie opóźnieniem w ścieżce wtórnej sygnału.

Dla potrzeb układów aktywnej redukcji hałasu zaprojektowano specjalny głośnik niskotonowy. Został on zintegrowany z wysokiej klasy wzmacniaczem samochodowym w taki sposób, aby całość mogła stanowić niezależny, mobilny komponent układu ARH. Parametry przetwornika i jego obudowy były tak dobierane, aby jak najlepiej mógł on pełnić funkcję źródła wtórnego dźwięku. Charakterystykę głośnika przedstawiono na rys. 5.15.



Rys. 5.15. Główne charakterystyki głośnika JL Audio 12w0-4 w obudowie specjalnej

Szczególnie dużo uwagi poświęcono obniżeniu dolnej częstotliwości granicznej pasma przenoszenia oraz zapewnieniu niewielkiego poziomu zniekształceń harmoniczných i najniższej wartości opóźnienia grupowego (zwłaszcza w dolnych rejestrach). Charakterystykę opóźnienia grupowego można traktować jako miarę liniowości charakterystyki fazowej głośnika. Wymagania dotyczące pasma przenoszenia i opóźnienia grupowego są przeciwstawne – obniżając dolną częstotliwość graniczną, powiększa się zaburzenia liniowości charakterystyki fazowej. Dodatkowo na tę relację wpływa konstrukcja obudowy głośnika. Z tego powodu nie zdecydowano się na obudowę typu bass-reflex, ale na zamkniętą. Stosując tą pierwszą, można bardzo rozszerzyć pasmo przenoszenia, lecz kosztem liniowości fazy. Na charakterystyce takiej kolumny głośnikowej, dla częstotliwości rezonansowej tunelu bass-reflex, następuje odwrócenie fazy o 180° – kolumna zaczyna emitować dźwięk otworem wlotowym tunelu, a nie membraną.

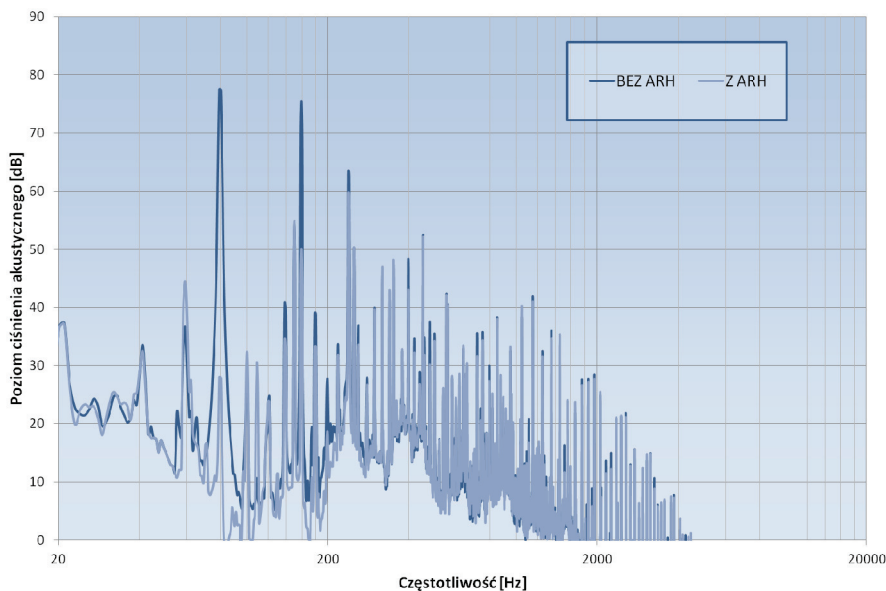


Rys. 5.16. Główne charakterystyki głośnika ATEX Sound AT6910A

Dla potrzeb układów aktywnej redukcji hałasu bardzo ważna jest liniowość charakterystyki fazowej i równomierność charakterystyki amplitudowej. Duże zniekształcenia tych charakterystyk powodują niższą skuteczność układu, a dla dużych zaburzeń nawet jego niestabilność.

Porównanie wybranych charakterystyk typowego głośnika stosowanego w fabrycznych miejscach montażowych prezentuje rys. 5.16. Z reguły w samochodach montowany jest typowy głośnik średnionowy, niezbyt dobrze sprawdzający się w przenoszeniu niskich częstotliwości. Sądząc z jego charakterystyki, przeznaczony jest raczej do odtwarzania audycji radiowych, gdzie wymagana jest czytelność tak zwanych „wokali”, a nie wierne odtwarzanie dźwięków, zwłaszcza w zakresie niskich częstotliwości.

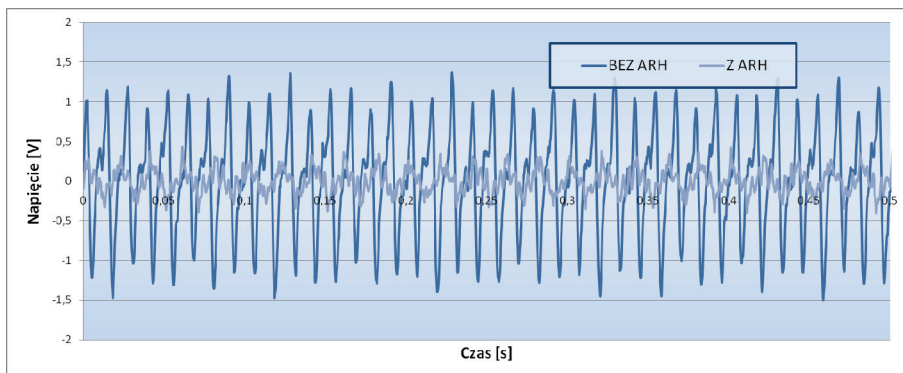
Badania sterownika rozpoczęły się od analizy skuteczności dla prostych sygnałów teoretycznych. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego przed i po włączeniu układu aktywnej redukcji hałasu przedstawia rys. 5.17. Harmonika na wejściu źródła pierwotnego miała 80 Hz; widoczne na widmie dodatkowe składowe harmoniczne są wynikiem zniekształceń sygnału wzorcowego wprowadzanych przez głośnik źródła pierwotnego.



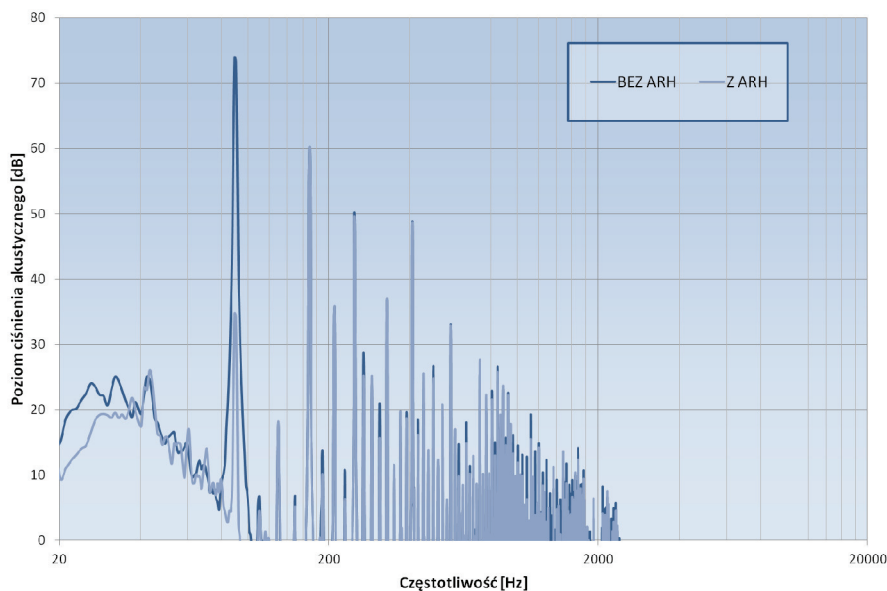
Rys. 5.17. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego w komorze dla sinusoidy 80 Hz i sygnału odniesienia pobieranego mikrofonem

Częstotliwość próbkowania przez sterownik wynosiła 50 kHz, natomiast algorytm Opóźnionego LMS uaktualniał 512 wag filtra SOI z krokiem korekcji wynoszącym 1×10^{-5} . Długość ścieżki wtórnej wynosiła 141 próbek. Przebieg czasowy sygnału błędu przed i po redukcji prezentuje rys. 5.18. Wartość osiągniętej kompensacji całkowitej wyniosła 8,2 dB dla poziomu dźwięku A oraz 26,4 dB dla charakte-

rystyki liniowej. Jako źródła sygnału odniesienia w badaniu użyto mikrofon. Jeżeli sygnał odniesienia był pobierany bezpośrednio z generatora, skuteczność systemu wyniosła odpowiednio 5 dB dla poziomów skorygowanych charakterystyką A oraz 28,6 dB dla charakterystyki liniowej (rys. 5.19).



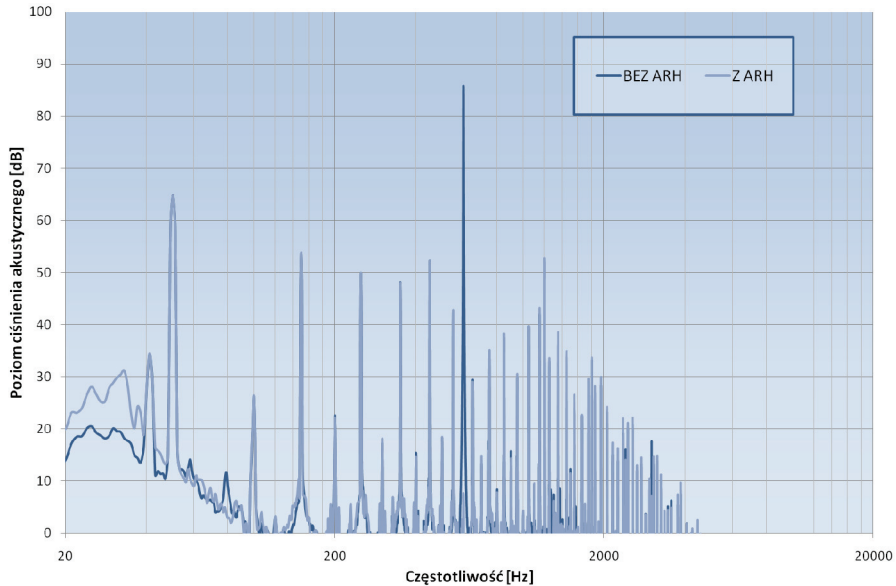
Rys. 5.18. Przebieg czasowy amplitudy napięcia sygnału błędu dla włączonego/wyłączonego systemu aktywnej redukcji hałasu



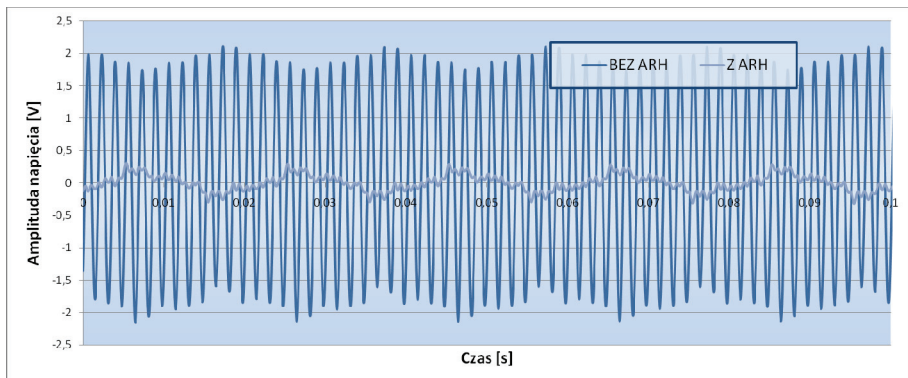
Rys. 5.19. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego w miejscu kompensacji dla sygnału wzorcowego 80 Hz i bezpośredniego sygnału odniesienia

Jeśli częstotliwość generowanej sinusoidy została zmieniona na 600 Hz, to układ aktywnej redukcji hałasu pracował, jak przedstawiono to na rys. 5.20.

Widoczne na widmie modulacje są wynikiem przetwarzania sygnału wzorcowego przez źródło pierwotne.



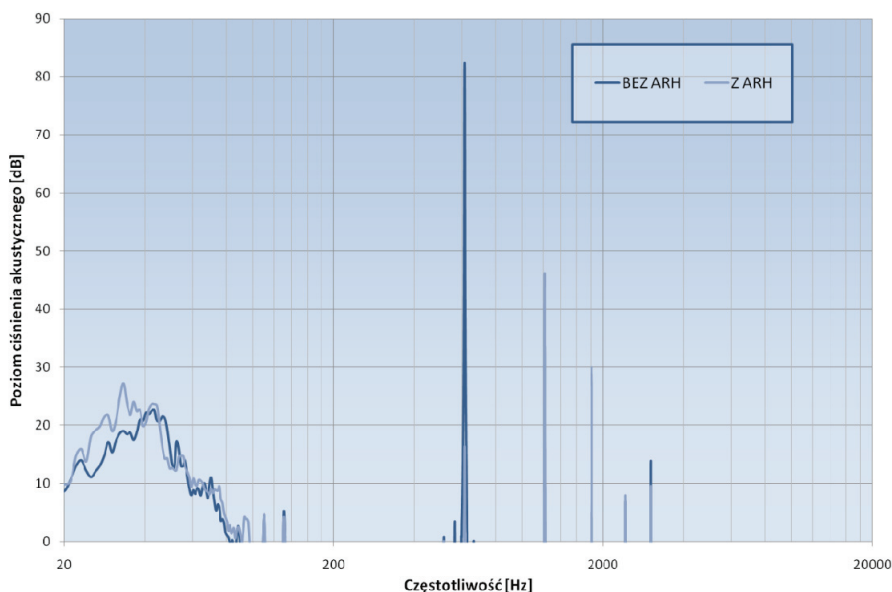
Rys. 5.20. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego w komorze dla sinusoidy 600 Hz i sygnału odniesienia pobieranego mikrofonem



Rys. 5.21. Przebieg czasowy amplitudy napięcia sygnału błędu dla włączonego/wyłączonego układu aktywnej redukcji hałasu

Częstotliwość próbkowania przez sterownik wynosiła 50 kHz, filtr miał długość 512 współczynników. Opóźnienie między źródłem wtórnym a przetwornikiem błędu wynosiło 141 próbek. Krok korekcji algorytmu Opóźnionego LMS wynosił

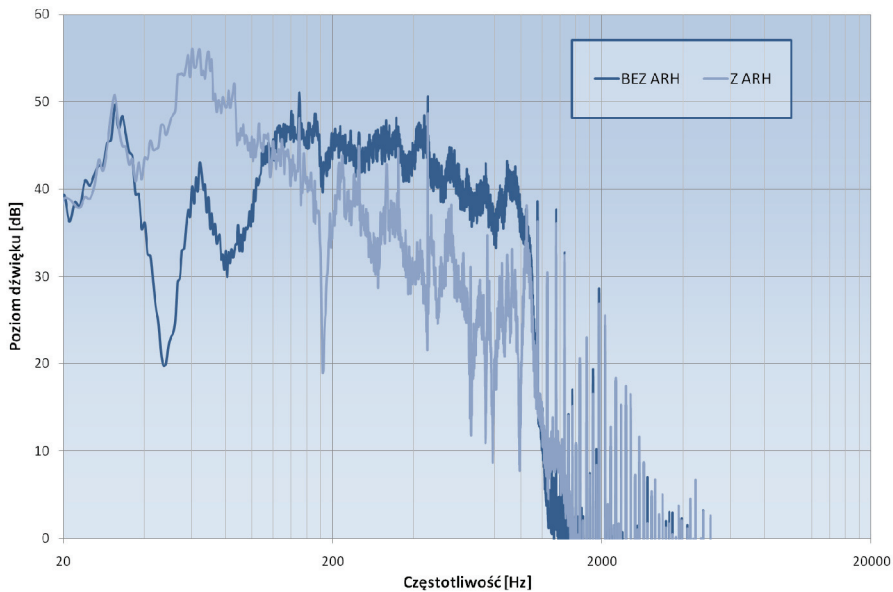
1×10^{-5} . Przebieg czasowy sygnału błędu przed i po redukcji zaprezentowano na rys. 5.21. Główna składowa została zredukowana o przeszło 70 dB! Całkowita skuteczność układu wyniosła odpowiednio: 29 dB dla skorygowanej charakterystyki częstotliwościowej A oraz 41,5 dB dla charakterystyki liniowej. Jako źródła sygnału odniesienia użyto mikrofonu. Jeżeli sygnał odniesienia był pobierany bezpośrednio z generatora sygnałów (pozostałe parametry pozostały bez zmian), to redukcja poziomu dźwięku A wyniosła (rys. 5.22) 33 dB oraz 71 dB dla poziomu nieskorygowanego.



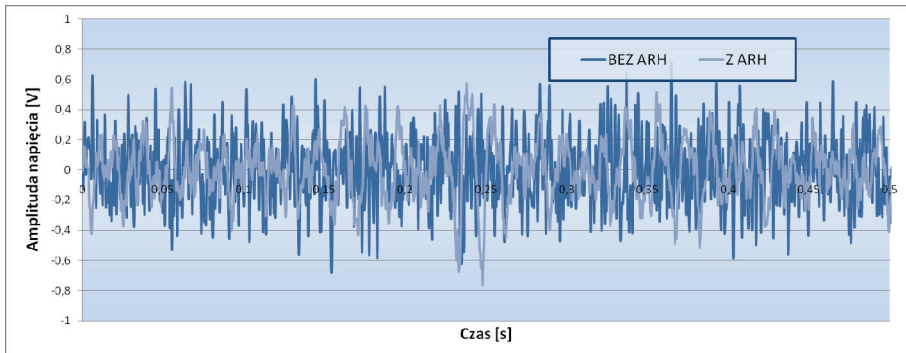
Rys. 5.22. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego w miejscu kompensacji dla sygnału wzorcowego 600 Hz i bezpośredniego sygnału odniesienia

Zupełnie inaczej przedstawiają się osiągi systemu w przypadku, gdy hałas ma postać losową. Widmo poziomu dźwięku przed i po włączeniu układu aktywnej redukcji hałasu przedstawiono na rys. 5.23. Na wejściu źródła pierwotnego wprowadzano szum biały ograniczony filtrem dolnoprzepustowym, którego górna graniczna częstotliwość wynosiła 970 Hz. Częstotliwość próbkowania przez sterownik wynosiła 50 kHz, rząd filtra wynosił 512. Opóźnienie między źródłem wrotnym a przetwornikiem błędu wynosiło 141 próbek. Krok korekcji algorytmu Opóźnionego LMS wynosił 1×10^{-5} . Przebieg czasowy sygnału błędu przed i po redukcji prezentuje rys. 5.24.

Wartość osiągniętej redukcji poziomu ciśnienia akustycznego wyniosła 9,3 dB dla poziomu skorygowanej charakterystyki częstotliwościowej A oraz 3,6 dB dla charakterystyki liniowej. Jako źródła sygnału odniesienia użyto mikrofonu, ustawionego tuż przed pierwotnym źródłem hałasu.



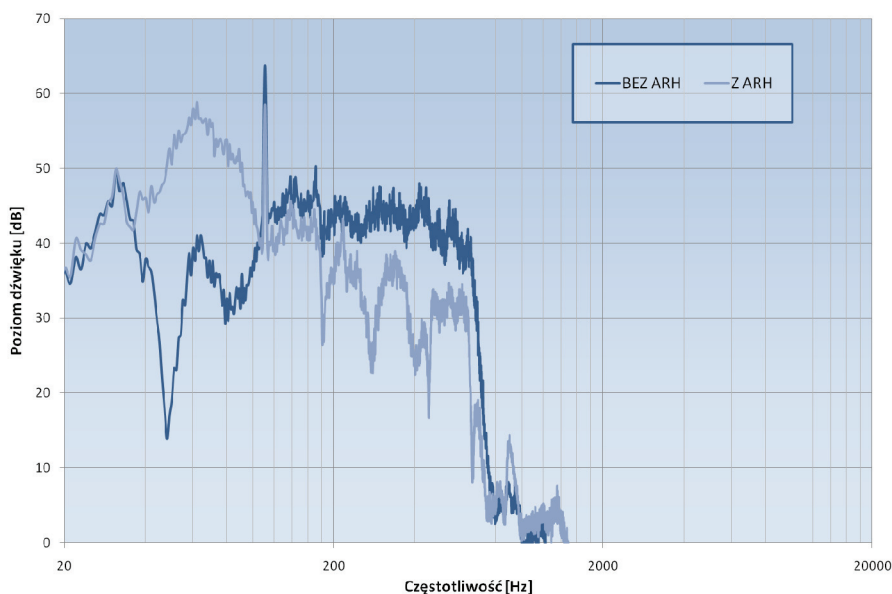
Rys. 5.23. Widmo poziomu dźwięku w komorze sygnału losowego i sygnału odniesienia pobieranego mikrofonem



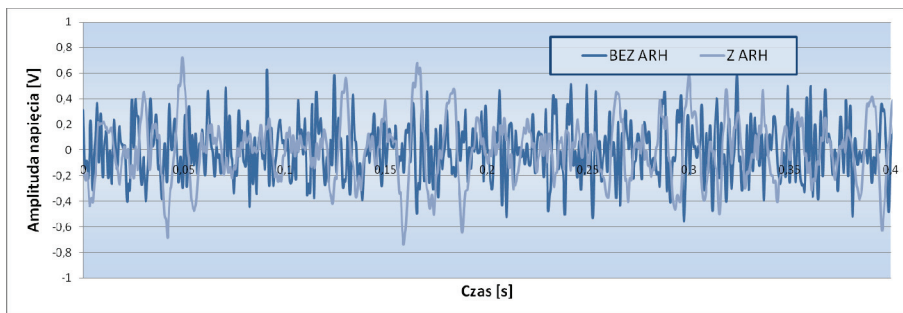
Rys. 5.24. Przebieg czasowy napięcia sygnału błędu dla włączonego/wyłączonego układu aktywnej redukcji hałasu

Następnym krokiem było połączenie wcześniejszego sygnału losowego z pojedynczym tonem prostym. Okazało się, że pomimo ogólnego wzrostu amplitudy ciśnienia akustycznego, po uruchomieniu systemu, był on odbierany jako bardziej cichy od poprzedniego. Wpływ na to ma nierównomierne (w skali częstotliwości) postrzeganie dźwięków przez człowieka i umiejętność adaptacji ludzkiego ucha. Widmo ciśnienia akustycznego przed i po włączeniu układu aktywnej redukcji hałasu przedstawia rys. 5.25. Na wejściu źródła pierwotnego wprowadzano szum biały ograniczony w paśmie do 630 Hz i mocniejszą o 15 dB składową harmoniczną o częstotliwości

110 Hz. Częstotliwość próbkowania przez sterownik wynosiła 50 kHz, natomiast filtr miał długość 512 współczynników. Opóźnienie między źródłem wtórnym a przetwornikiem błęd wynosiło 141 próbek. Krok korekcji algorytmu Opóźnionego LMS wynosił 1×10^{-5} . Przebieg czasowy sygnału błędu przed i po redukcji pokazano na rys. 5.26. Wartość osiągniętej redukcji całkowitego poziomu dźwięku A wyniosła 9 dB oraz -3,4 dB dla charakterystyki liniowej. Źródłem sygnału odniesienia był mikrofon.



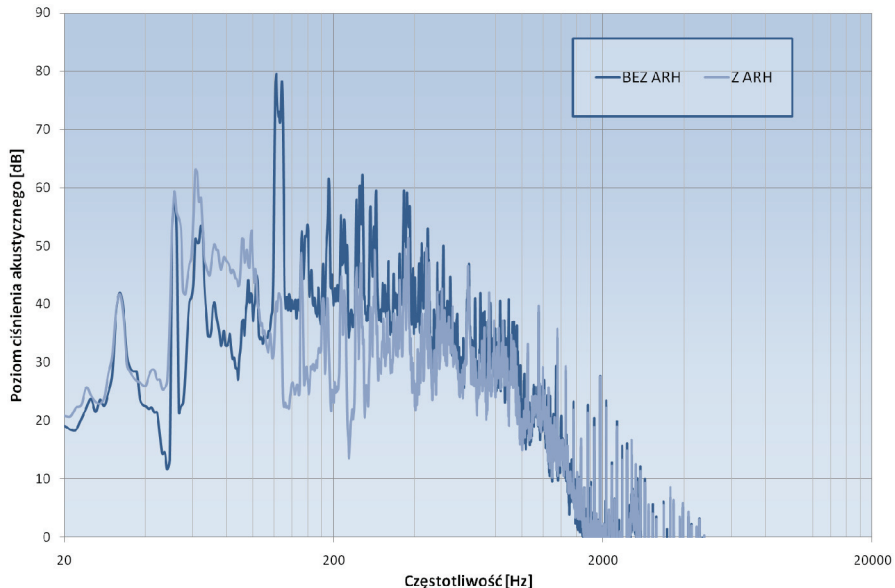
Rys. 5.25. Widmo poziomu dźwięku w komorze dla sygnału kombinowanego i sygnału odniesienia pobieranego mikrofonem



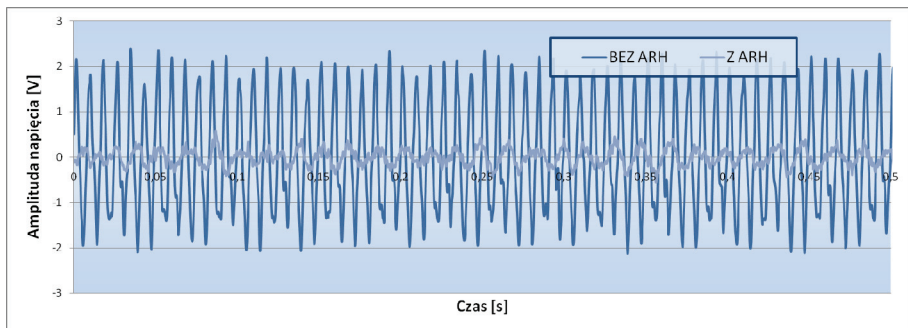
Rys. 5.26. Przebieg czasowy amplitudy napięcia sygnału błędu dla włączonego/wyłączonego systemu aktywnej redukcji hałasu

W badaniach wykorzystano również sygnały rzeczywiste, zarejestrowane w samochodzie Nissan Micra K12. W pierwszej kolejności przetestowano zachowa-

nie układu aktywnej redukcji hałasu w czasie postoju samochodu z włączonym silnikiem (3700 obr./min). Widmo poziom dźwięku przed i po włączeniu układu ARH przedstawiono na rys. 5.27.



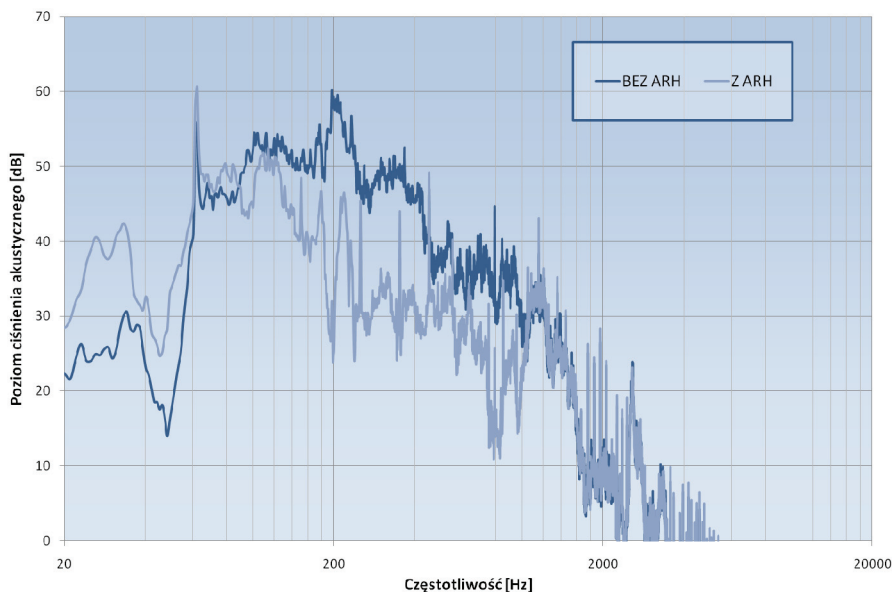
Rys. 5.27. Widmo poziom dźwięku w komorze bezchowej dla sygnału zarejestrowanego w kabinie samochodu Nissan Micra na postoju (silnik pracujący z prędkością 3700 obr./min)



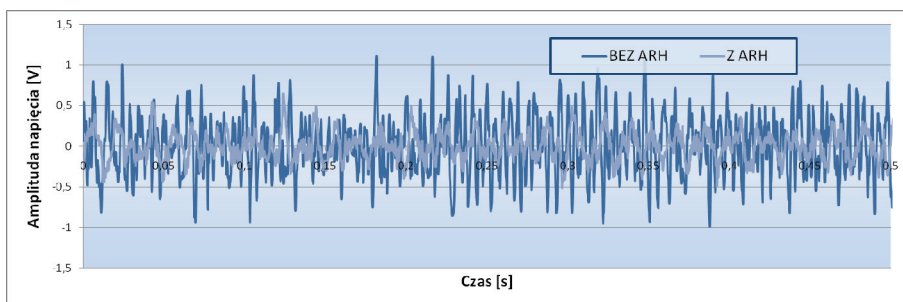
Rys. 5.28. Przebieg czasowy amplitudy napięcia sygnału błędu dla włączonego/wyłączonego układu aktywnej redukcji hałasu silnika pracującego z prędkością 3700 obr./min (zarejestrowany komorze bezchowej)

Częstotliwość próbkowania przez sterownik wynosiła 50 kHz, natomiast filtr miał długość 512 współczynników. Opóźnienie między źródłem wtórnym a przetwornikiem błędu wynosiło 141 próbek. Krok korekcji algorytmu Opóźnionego

LMS wynosił 1×10^{-5} . Przebieg czasowy sygnału błędu przed i po redukcji zaprezentowano na rys. 5.28. Rejestrowany poziom ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A obniżył się o 10,6 dB, natomiast poziom ciśnienia nieskorygowanego obniżył się o 34,2 dB. Jako źródła sygnału odniesienia użyto mikrofonu.



Rys. 5.29. Widmo poziomu dźwięku w komorze dla sygnału zarejestrowanego w kabinie samochodu Nissan Micra na postoju (włączony silnik i wentylator klimatyzacji)

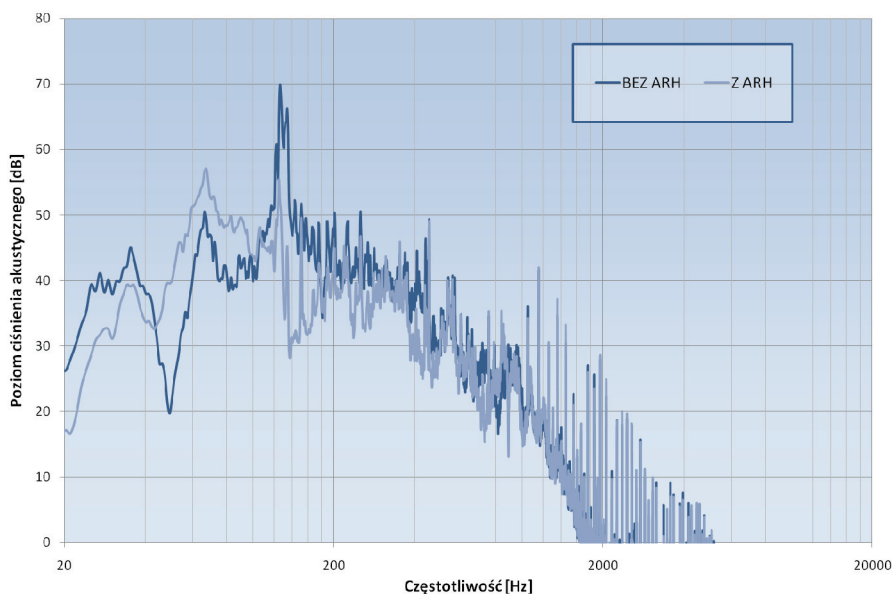


Rys. 5.30. Przebieg czasowy amplitudy napięcia sygnału błędu dla włączonego/wyłączonego układu aktywnej redukcji hałasu silnika i wentylacji samochodu (zarejestrowany w komorze bezechowej)

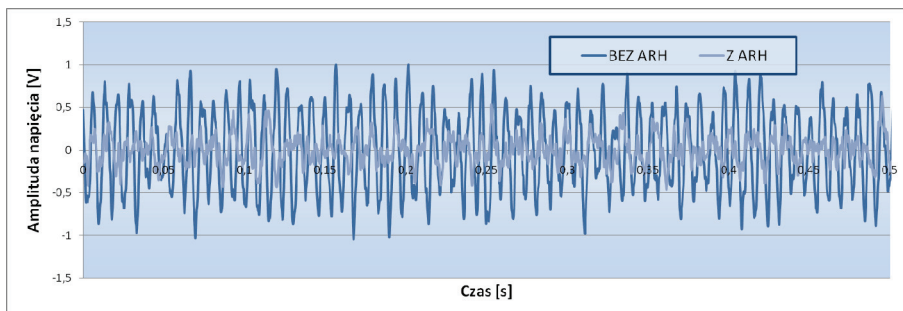
Kolejna testowana postać hałasu była bardzo podobna do poprzedniej. Z tą różnicą, że silnik pracował na wolnych obrotach, natomiast wentylator przewietrzania wnętrza został ustawiony na maksymalne obroty. Celem tego testu było spraw-

dzenie, czy możliwe jest zminimalizowanie za pomocą układu ARH również takiej postaci hałasu. Widmo poziomu dźwięku przed i po włączeniu układu aktywnej redukcji hałasu przedstawia rys. 5.29. Częstotliwość próbkowania przez sterownik wynosiła 50 kHz, natomiast rząd filtra wynosił 512. Opóźnienie między źródłem wtórnym a przetwornikiem błędu wynosiło 141 próbek. Krok korekcji algorytmu Opóźnionego LMS wynosił 1×10^{-5} . Przebieg czasowy sygnału błędu przed i po redukcji prezentuje rys. 5.30. Całkowita skuteczność układu wyniosła 8,8 dB dla poziomów dźwięku A oraz 15 dB dla charakterystyki liniowej. Jako źródła sygnału odniesienia użyto mikrofonu.

Ostateczną weryfikacją funkcjonalności układu czynnej redukcji hałasu było sprawdzenie jego skuteczności dla sygnału zarejestrowanego wewnątrz samochodu w czasie jazdy. Przebieg czasowy wykorzystywany w testach został zarejestrowany w Nissanie Micra K12 w czasie jazdy na III biegu z prędkością około 70 km/h. Widmo poziomu dźwięku przed i po włączeniu układu aktywnej redukcji hałasu przedstawiono na rys. 5.31. Częstotliwość próbkowania przez sterownik wynosiła 50 kHz, natomiast filtr miał długość 512 współczynników. Opóźnienie między źródłem wtórnym a przetwornikiem błędu wynosiło 141 próbek. Krok korekcji algorytmu Opóźnionego LMS wynosił 1×10^{-5} . Przebieg czasowy sygnału błędu przed i po redukcji prezentuje rys. 5.32. Wartość osiągniętej kompensacji całkowitej wyniosła 4,9 dB dla poziomu ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A oraz 17,5 dB dla charakterystyki liniowej. Jako źródła sygnału odniesienia użyto mikrofonu.



Rys. 5.31. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego w komorze bezechowej dla sygnału zarejestrowanego w kabinie samochodu Nissan Micra w czasie jazdy z prędkością 70 km/h



Rys. 5.32. Przebieg czasowy amplitudy napięcia sygnału błęd w komorze bezechowej dla włączonego/wyłączonego układu aktywnej redukcji hałasu jadącego samochodu

W przedstawionych badaniach przetestowano sterownik na sygnałach generowanych i zarejestrowanych w samochodzie. Pozwoliły one na zweryfikowanie kolejnych źródeł sygnału odniesienia – od najprostszych, aż do źródeł akustycznych. Ponadto, sprawdzono poprawność przyjętej struktury sterownika i wyboru algorytmu adaptacji wag filtra SOI.

Badania te potwierdziły wyniki uzyskane na stanowisku do testowania sterowników układów aktywnej redukcji hałasu w czasie rzeczywistym, przedstawionym w rozdziale 7. Układ działał stabilnie i nie generował żadnych artefaktów akustycznych, które świadczyłyby o nadmiernych przestojach w przepływie sygnałów wewnątrz sterownika. Ponadto należy zwrócić uwagę, że układ ARH zwalczał również hałas generowany przez wentylator przewietrzania wnętrza, czego układy z syntezą sygnału kompensującego nie potrafią.

W trakcie przedstawionych badań w komorze bezechowej, kilkakrotnie musiały zostać nieznacznie zmodyfikowane współczynniki sterowania do wartości bardziej optymalnych. Tych modyfikacji nie udało się zrobić w samochodzie. Eksperymenty trwały akceptowalną ilość czasu i umożliwiały szybkie wyizolowanie pojawiających się problemów. Tak kompleksowych analiz nie udało się zrealizować wyłącznie na obiekcie docelowym, jakim jest samochód osobowy.

6. Transmitancja ścieżki wtórnej – pomijany problem

6.1 Wpływ ścieżki wtórnej na działanie algorytmu adaptacji

Występowanie złożonej transmitancji ścieżki wtórnej jest jednym z najistotniejszych zagadnień, ograniczających zastosowania układów aktywnej redukcji hałasu. Zaburzenie relacji pomiędzy poszczególnymi składowymi w dziedzinie częstotliwości (pod warunkiem że zachodzi liniowo) nie ma dużego znaczenia. Natomiast występujące relatywnie duże stałe opóźnienie czasowe wpływa bezpośrednio na zależności przyczynowo-skutkowe układu sterowania. Zaburzenie to można opisać w następujący sposób: dla najprostszej formy sterowania ze sprzężeniem do przodu sterownik generuje sygnał oddziałujący na wyciszaną strefę. W idealnej sytuacji w następnym cyklu iteracji sterownik otrzymuje odpowiedź, w jaki sposób zareagował obserwowany układ na wcześniejsze wymuszenie. Zgodnie z odpowiedzią układu, sterownik tak aktualizuje współczynniki decydujące o generowanym sygnale, aby zbliżyć się do pożądanego celu. Jeżeli odpowiedź układu ARH na wymuszenie pojawia się później niż w następnej iteracji, to sterownik nabiera pewnej bezwładności w działaniu. Im bardziej jest spóźniona odpowiedź układu, tym jest ona większa. Opóźnienie to powoduje, że w algorytmie adaptacji układu ARH trzeba zmniejszyć krok adaptacji, który jest wzmocnieniem w gałęzi sprzężenia zwrotnego. Zbyt duża wartość sprawia, że układ nie jest zbieżny. Jeżeli duże opóźnienie w ścieżce wtórnej układu ARH wynika z dużej odległości między źródłem wtórnym a przetwornikiem błędu, to problem można również rozwiązać przez zmniejszenie częstotliwości próbkowania sterownika. Dla opóźnienia stałego w czasie mniejsza częstotliwość oznacza mniej cykli pętli sterowania między generacją sygnału a odpowiedzią z przetwornika błędu. Częstotliwość próbkowania można zmniejszać, aż zupełnie zostanie zlikwidowane opóźnienie liczone w próbkach.

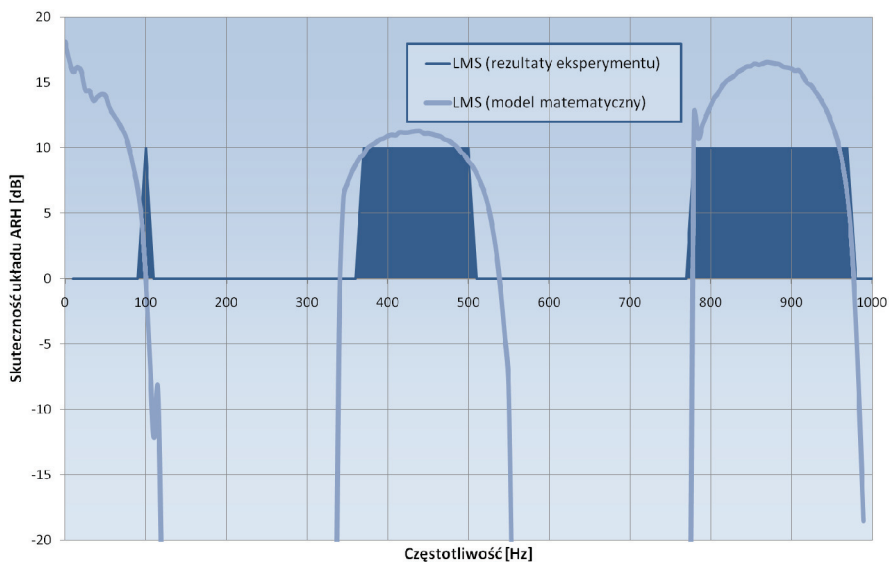
Analiza powyższych zależności doprowadziła do powstania wzoru, określającego zależność między częstotliwością próbkowania a odległością źródła wtórnego od miejsca kompensacji hałasu:

$$f_p = \frac{c}{l} \quad (6.1)$$

gdzie: f_p – częstotliwość próbkowania, c – prędkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu, l – odległość w metrach źródła wtórnego od przetwornika błędu.

Takie rozwiązanie ma jednak wady. Zmniejszenie częstotliwości próbkowania ogranicza robocze pasmo częstotliwości, w którym układ ARH będzie kompensował dźwięki. Istnieje jednak specyficzny przypadek aplikacji układu ARH, w której, pomimo niespełnienia przedstawionej wyżej zależności, jest on zbieżny. Dzieje się tak, gdy sygnał kompensowany jest sinusoidą [26, 84]. Okresowość tej funkcji powoduje, że wszystkie sygnały w układzie (odniesienia, kompensujący, błędu) powtarzają się dokładnie co okres. To sprawia, że dla opóźnienia w ścieżce wtórnej równemu okresowi, algorytm działa tak, jakby tego opóźnienia nie było. Zjawisko to tłumaczy rezultaty badań, które przeprowadzono w komorze

bezechowej, a później potwierdzono w symulacji. W obydwu przypadkach analizy prowadzono zgodnie z następującą procedurą. Do ścieżki wtórnej wprowadzano opóźnienie czasowe niezmienną się w trakcie pomiarów (w komorze bezechowej ustawiony był głośnik w dużej odległości od przetwornika błędu). Nie zmieniała się również częstotliwość próbkowania sterownika. Układ kompensował zaburzenie harmoniczne o przestrajalnej częstotliwości, zmienianej od najmniejszej do największej ze stałym krokiem. Dla każdej częstotliwości uruchamiany był układ ARH i po upływie ustalonego czasu zostało zanotowane osiągnięte ciśnienie akustyczne. Skuteczność układu ARH w funkcji częstotliwości zaburzenia, zarejestrowana w komorze bezechowej, zaprezentowana jest na rys. 6.1. Emitowany, pojedynczy ton w zakresie od 100 Hz do 1000 Hz był zaburzony szumem białym. Odległość między źródłem pierwotnym a źródłem wtórnym wynosiła 1 m, natomiast długość ścieżki wtórnej – 60 cm.



Rys. 6.1. Porównanie obszarów zbieżności układu ARH uzyskanych w eksperymencie w komorze bezechowej i w symulacji

Bardzo podobnie przedstawiał się wykres symulacji, przeprowadzonych z wykorzystaniem stworzonego modelu symulacyjnego układu ARH. Symulowana odległość między źródłem pierwotnym a źródłem wtórnym również wynosiła 1 m, natomiast długość ścieżki wtórnej – 75 cm (dodatkowe 15 cm wynika z uwzględnienia opóźnienia sprzętowego). Powstały „grzebień” jest efektem trafiaania wielokrotnością okresu funkcji zaburzenia w wartość opóźnienia czasowego. Tam, gdzie układ był niestabilny, opóźnienie nie jest w przybliżeniu wielokrotnością okresu. Zmieniając odległość między źródłem wtórnym i przetwornikiem sygnału błędu, można dowolnie modelować otrzymywane wykresy: rozciągając je i zmniejszając.

Warto zwrócić uwagę, że we wszystkich zakresach, w których układ ARH jest stabilny, osiąga on podobną skuteczność w redukowaniu hałasu. W zakresie do 100 Hz wchodzimy w zakres częstotliwości, w którym suma opóźnień w ścieżce wtórnej i w ścieżce błędu jest mniejsza niż okres emitowanego dźwięku.

6.2. Uproszczenie transmitancji ścieżki wtórnej

W rzeczywistości hałas będący harmoniką o stałej częstotliwości jest przypadkiem szczególnym i nieczęsto spotykanym, więc rzadko można wykorzystać przedstawione w poprzednim podpunkcie zjawisko. Stąd problem ścieżki wtórnej jest najczęściej poruszonym zagadnieniem w publikacjach naukowych – poszukuje się rozwiązań, służących zminimalizowaniu tego problemu [5, 7, 14]. Z reguły chodzi tu o rozwiązania globalne – z natury bardzo trudne i skomplikowane. Istnieje jednak klasa zagadnień, w których problem ścieżki wtórnej można rozwiązać w uproszczony sposób. Rozwiązania te bazują na podziale transmitancji ścieżki wtórnej na dwie części. Pierwsza z nich odpowiada opóźnieniu stałemu dla wszystkich częstotliwości, o rząd wielkości większemu od przesunięć fazowych pomiędzy częstotliwościami. Przesunięcia fazowe, razem ze zniekształceniami amplitud w dziedzinie częstotliwości, stanowią drugą część. Można więc zapisać to jako iloczyn opóźnienia i pewnej transmitancji cząstkowej.

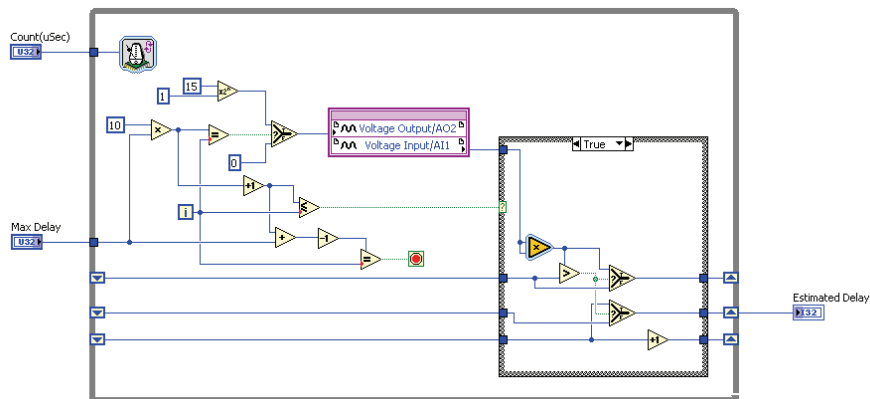
Transmitancja cząstkowa dla fali akustycznej rozchodzącej się w powietrzu w polu swobodnym jest bliska jedności. Dlatego można przyjąć, że dla zagadnień wdrażania układów ARH, w których ścieżka wtórna jest ścieżką powietrzną w polu swobodnym, istotne będzie tylko stałe opóźnienie. Takie założenie prowadzi do znacznego uproszczenia układu sterowania i w niewielkim stopniu do ograniczenia pasma, nawet jeżeli źródło wtórne będzie daleko od miejsca wyciszanego. Dla prawidłowego działania systemu wystarczy użyć algorytmu Opóźnionego LMS, a identyfikację opóźnienia przeprowadzić każdorazowo przed uruchomieniem układu. Badania w komorze bezechowej wykazały, że taka procedura jest wystarczająca do prawidłowego działania systemu. Dla zaburzenia będącego harmoniką, szumem, a nawet sygnałem zarejestrowanym w samochodzie, układ ARH był skuteczny i stabilny. Przy zmianie położenia źródła wtórnego lub przetwornika błędu wystarczyło przed włączeniem układu ponownie wyznaczyć czas opóźnienia sygnału.

Elementy wnętrza samochodu, takie jak obicia foteli, deska rozdzielcza, obicia drzwi czy podsufitka, stosunkowo dobrze tłumią dźwięki. Dlatego można przyjąć, że w samochodzie mamy do czynienia z polem wystarczająco bliskim swobodnemu, aby wykorzystać uproszczone podejście do problemu ścieżki wtórnej.

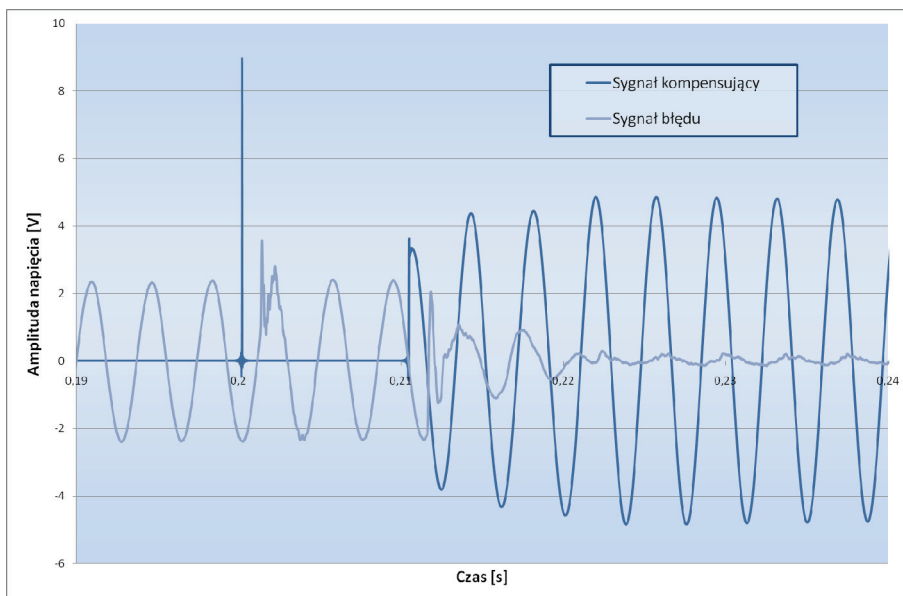
6.3. Praktyczne wyznaczanie ścieżki wtórnej

Zgodnie z przekształceniem opisanym w rozdziale 4, zamiast wyznaczać wyłącznie opóźnienie ścieżki wtórnej, czyli ścieżki między źródłem wtórnym a przetwornikiem błędu, można określić całkowite opóźnienie ścieżki wtórnej i ścieżki błędu. Takie uproszczenie bardzo ułatwia całą procedurę. W praktyce sprowadza się to do zmierzenia przesunięcia czasowego między generowanym sygnałem wyjściowym a odpowiedzią na wejściu sygnału błędu. Metody wyznaczania tego przesunięcia

czasowego są bardzo różne, ale najprostsza to posłużenie się impulsem jednostkowym. Ponieważ interesuje nas tylko przesunięcie czasowe, amplituda tego impulsu ma drugorzędne znaczenie.



Rys. 6.2. Schemat programu mierzącego długość ścieżki wtórnej

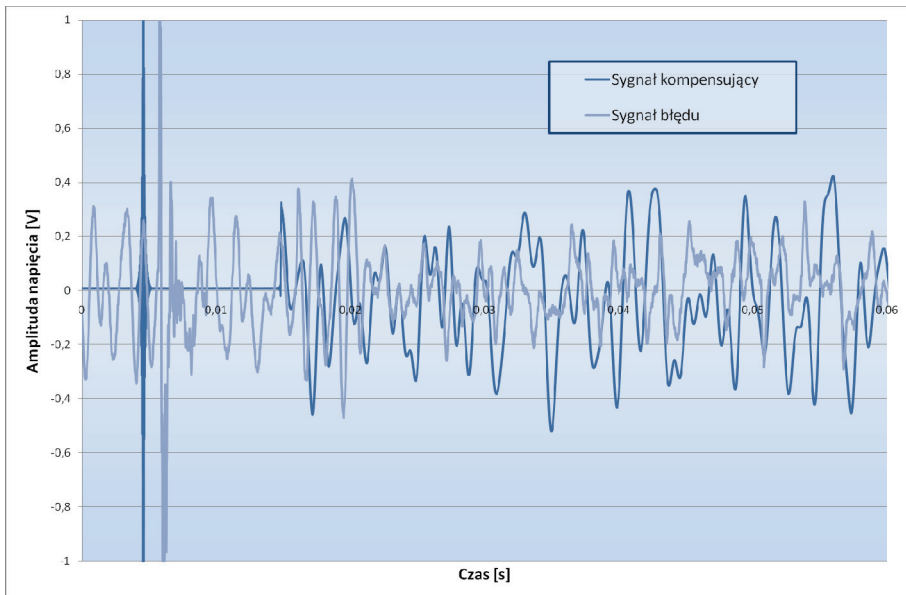


Rys. 6.3. Przebiegi czasowe sygnału kompensującego i błędny w trakcie startu układu ARH z detekcją długości ścieżki wtórnej i ścieżki błędny

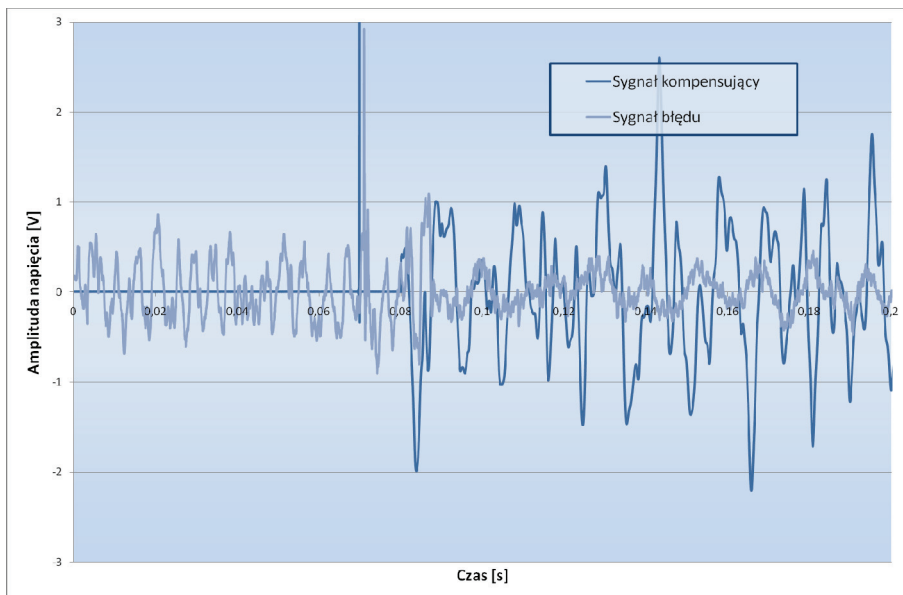
Schemat programu wyznaczającego opóźnienie przedstawiono na rys. 6.2. Został on napisany w środowisku LabVIEW i można go uruchamiać w systemie pracującym pod kontrolą układu FPGA. Program wykorzystuje dokładnie te same

tory generacji i akwizycji sygnałów co algorytm ARH, w związku z tym może być wykonany tuż przed jego uruchomieniem. Przebieg czasowy sygnału kompensującego i sygnału błędu dla układu ARH wykorzystującego powyższy program przedstawiono na rys. 6.3. Przebiegi te zostały zarejestrowane w komorze bezechowej. Zaburzeniem był pojedynczy ton o częstotliwości 260 Hz. Na przebiegu czasowym sygnału kompensującego widać wygenerowany impuls, który po 63 próbkach pojawia się w odpowiedzi układu, czyli sygnale błędu. Po wyznaczeniu opóźnienia czasowego sterownik uruchamia właściwy program. Zaimplementowany opóźniony LMS wykorzystuje wyznaczoną wartość opóźnienia. Jak widać, na przebiegach rozpoczyna się skuteczna interferencja destruktywna.

Ta metoda wyznaczania opóźnienia charakteryzuje się stosunkowo dużą odpornością na zakłócenia zewnętrzne. Sprawdziła się zarówno w środowisku laboratoryjnym, gdzie zaburzenia były sztucznie dodawane, jak również w kabinie samochodu osobowego (nawet przy włączonym silniku). Na rys. 6.4 przedstawiono te same przebiegi jak poprzednio, z tą różnicą, że do zaburzenia harmonicznego został dodany sygnał losowy. Udział składnika losowego jest tak duży, że na przebiegu czasowym trudno jest rozróżnić sinusoidę. Mimo to procedura wyznaczania opóźnienia zadziałała poprawnie i po ułamku sekundy rozpoczęła się aktywna kompensacja hałasu. Przebieg sygnału błędu na rysunku 6.5 dotyczy pierwszych 200 ms po włączeniu stworzonego sterownika układu ARH w kabinie Nissana Micry. W około 70. milisekundzie następuje wygenerowanie impulsu akustycznego i zmierzenie odpowiedzi kabiny – opóźnienia. Po 90 ms następuje start układu ARH, co można rozpoznać po zmniejszającej się amplitudzie sygnału z przetwornika błędu.



Rys. 6.4. Zaszumiony sygnał kompensujący i sygnał błędu w trakcie uruchamiania układu ARH z detekcją długości ścieżki wtórnej w komorze bezechowej



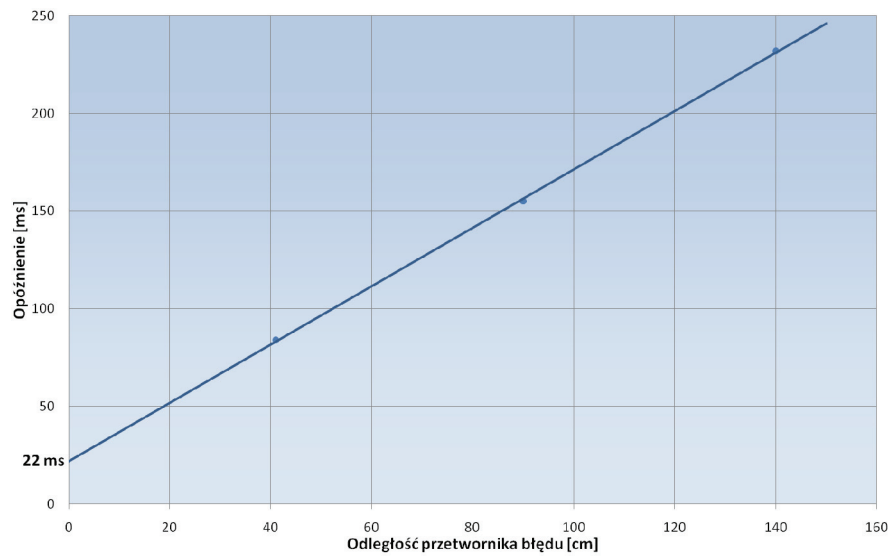
Rys. 6.5. Przebieg sygnału kompensującego i błędu w trakcie uruchamiania układu ARH w kabinie samochodu w funkcji czasu

Wbrew pozorom, wykorzystanie impulsu akustycznego do wyznaczania opóźnienia nie jest uciążliwe dla osób znajdujących się w obszarze oddziaływania źródła wtórnego. Związane jest to z charakterystyką amplitudową głośników, wykorzystywanych jako źródło wtórne. O uciążliwości impulsów akustycznych decyduje głównie ich ostry przebieg, który w dziedzinie częstotliwości jest odwzorowywany w górnych rejestrach. Ponieważ głośniki stosowane w układach ARH mają największą sprawność w zakresie niskich częstotliwości, stanowią swego rodzaju filtr, który blokuje tego typu dźwięki. W trakcie wyznaczania opóźnienia do uszu człowieka dociera impuls złagodzony, nieznacznie rozciągnięty w czasie, który nie jest już tak drażniący. W trakcie badań w samochodzie zdarzały się nawet sytuacje, że impulsy akustyczne generowane przez system były na tyle maskowane przez ogólny hałas panujący w kabinie w czasie jazdy, że stawały się niezauważalne.

Wyznaczając całkowite opóźnienie dla różnych odległości źródła wtórnego od przetwornika błędu, można określić, jaki jest udział opóźnienia wynikającego z przetwarzania sygnału w sterowniku i wzmacniaczu, a jaki z prędkości rozchodzenia fali akustycznej. Dla układu zawierającego następujące elementy:

- sterownik systemu ARH oparty na układzie FPGA,
- wzmacniacz pomiarowy B&K NEXUS,
- wzmacniacz akustyczny mocy SIGNAT,

przeprowadzono analizę opóźnienia sprzętowego. Zależności zmierzone doświadczalnie przedstawiono na rys. 6.6. Wartość trendu liniowego w zerze reprezentuje opóźnienie sprzętowe. Zmierzona wartość (22 ms) wskazuje, że tego typu opóźnienia mają znaczący udział w opóźnieniu całkowitym. Dlatego bardzo ważny jest właściwy dobór sprzętu stosowanego we wdrażanych układach aktywnej redukcji hałasu.

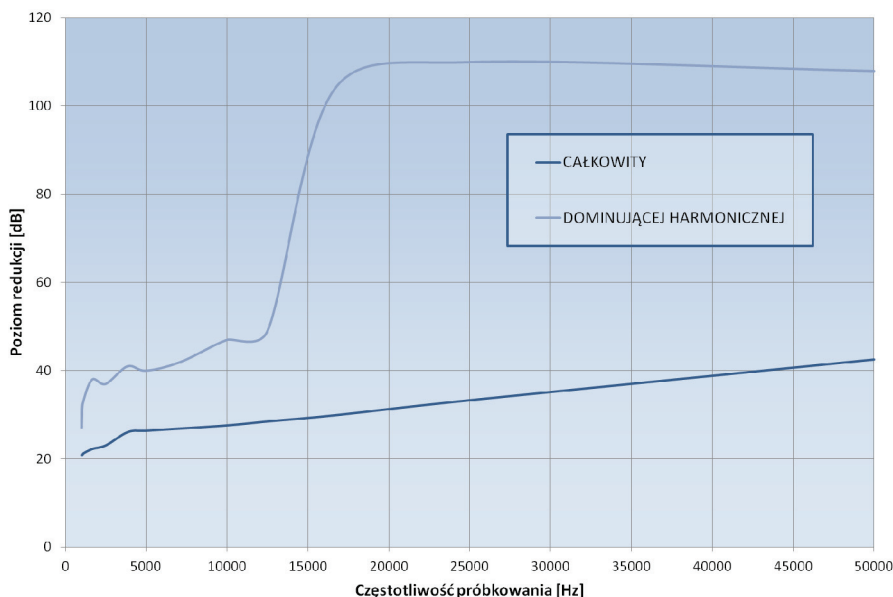


Rys. 6.6. Zależność opóźnienia mierzonego przez sterownik ARH od odległości między przetwornikiem wtórnym i przetwornikiem błędu

7. Przegląd stosowanych środowisk obliczeniowych

7.1. Częstotliwość próbkowania sterownika

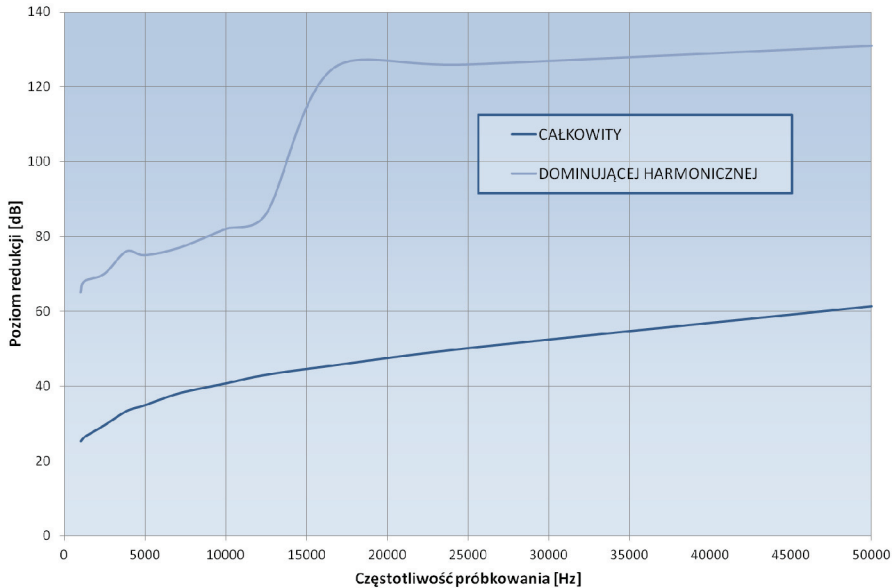
Obecnie na rynku dostępnych jest wiele rozwiązań sprzętowych, umożliwiających implementację cyfrowego sterownika systemu aktywnej redukcji hałasu. Aby dokonać właściwego wyboru, najpierw trzeba odpowiedzieć sobie na kilka pytań, dotyczących najistotniejszych wymagań, jakie taki sterownik musi spełnić. Jedno z ważniejszych to maksymalna częstotliwość próbkowania pętli sterowania. Do tej pory była ona ograniczona odległością między źródłem wtórnym a miejscem kompensacji [46, 31]. Jednakże po wprowadzeniu algorytmu FxLMS problem ten zmniejsza się. Rodzi się pytanie co się stanie, jeśli znacznie zwiększymy częstotliwość próbkowania, do wartości dużo wyższej niż wynikałoby to z zasady Nyquista? Czy i jakie efekty spowoduje wprowadzenie nadpróbkowania [45]? Ze względu na zadania realizowane przez system ARH można spodziewać się, że wzrośnie dokładność modelowania sygnałów. Krótsze okresy między iteracjami pętli sterowania powinny spowodować również większą prędkość zbiegania algorytmu.



Rys. 7.1. Skuteczność algorytmu LMS w funkcji częstotliwości próbkowania sterownika

Aby sprawdzić, jaki wpływ będzie miało skrócenie okresu próbkowania, przeprowadzono serię badań na symulacyjnym modelu systemu ARH. Pierwsze próby dotyczyły prostego algorytmu LMS, gdy wymuszenie było połączeniem szumu różowego (ograniczonego do 500 Hz) i wybijającej się składowej harmonicznej

(300 Hz). Kanał akustyczny między sygnałem odniesienia a sygnałem kompensowanym był modelowany jako 3 ms opóźnienie. Rząd filtra SOI wynosił 512, a krok korekcji był równy 10. Widmo odpowiedzi układu (widmo sygnału błędu) przedstawiono na rys. 7.1. Widać wyraźnie, że zwiększanie częstotliwości pracy sterownika systemu ARH przynosi pozytywne rezultaty – zwiększa się skuteczność systemu. Podobny efekt wystąpił, gdy sterownik symulowanego systemu pracował pod kontrolą algorytmu NLMS (rys. 7.2).

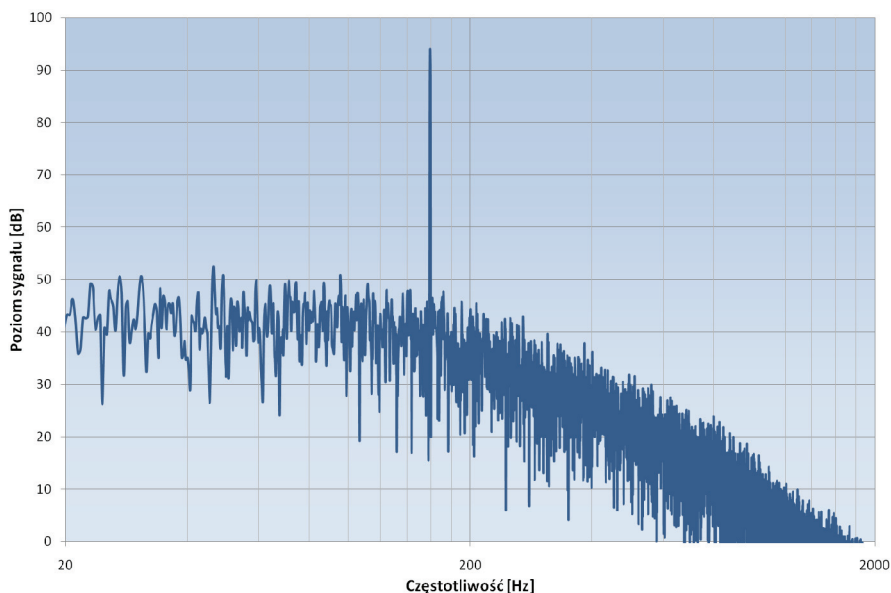


Rys. 7.2. Wzrost skuteczności algorytmu NLMS w funkcji częstotliwości próbkowania sterownika

Na podstawie przedstawionych wyników można wywnioskować, że im większy współczynnik nadpróbkowania pasma, w którym chce się uzyskać efekt redukcji, tym lepsza skuteczność systemu. Spowodowane jest to większą dokładnością modelowania przebiegu czasowego kompensowanego sygnału. Efekt ten można wytłumaczyć na przykładzie dyskretnego odwzorowywania funkcji harmonicznej. Jeżeli taką funkcję będziemy próbkować z częstotliwością Nyquista, to w każdym okresie odwzorowane zostaną dwa punkty. Na podstawie takiego dwupunktowego odwzorowania cyfrowego sterownik nie jest w stanie precyzyjnie wyznaczyć sygnału kompensującego. Jeżeli dodatkowo uwzględnimy, że idealnie odtwarzający filtr dolnoprzepustowy w rzeczywistości nie istnieje [76], to okaże się, że system nie będzie wiernie odtwarzał wejściowej funkcji harmonicznej. Te dwa czynniki sprawiają, że składowe znajdujące się blisko częstotliwości granicznej są zniekształcane, więc również nieskutecznie kompensowane. Aby poprawić warunki pracy dla filtrów wyjściowych, a tym samym ich charakterystykę, zwiększa się odstęp między częstotliwością próbkowania a górną granicą użytecznego pasma częstotliwości.

Nadpróbkowaniem określa się dyskretne w czasie odwzorowanie sygnału ciągłego z częstotliwością próbkowania wielokrotnie większą od podwojonej częstotliwości Nyquista, czyli górnej granicy interesującego pasma. Wprowadzony współczynnik nadpróbkowania jest ilorazem tych dwóch wielkości. Dla próbkowania sygnału z minimalną częstotliwością, konieczną do właściwego odwzorowania sygnału, współczynnik ten będzie wynosił 1. Dyskretyzowanie funkcji harmonicznej ze współczynnikiem nadpróbkowania 5 będzie oznaczało, że na każdy okres funkcji jest zapisywanych 10 wartości amplitudy.

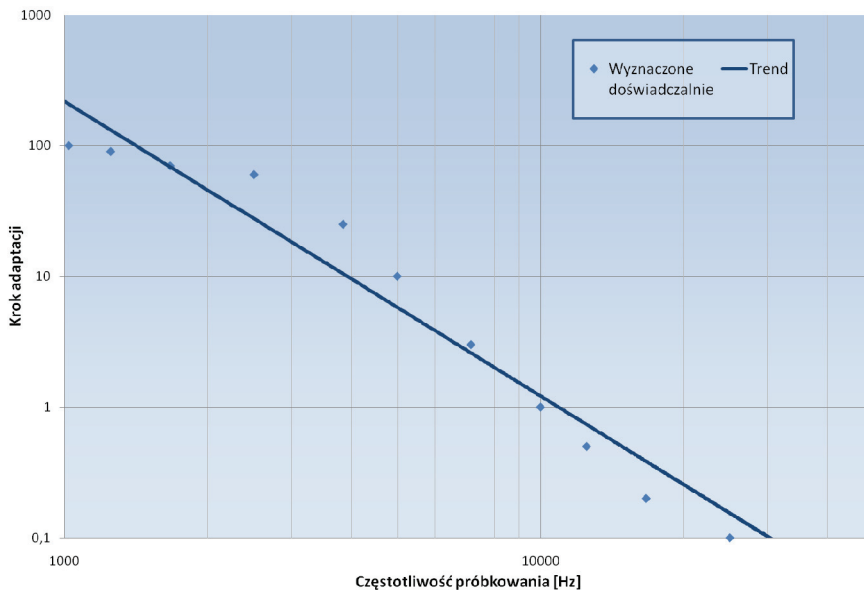
Jak widać na rys. 7.1 i 7.2, w przypadku układów ARH dla sterowników używających algorytmów LMS lub NLMS nawet 50-krotne nadpróbkowanie przynosi wzrost skuteczności redukcji hałasu. Sytuacja wygląda gorzej, gdy transmitancja ścieżki wtórnej jest istotnym elementem układu ARH (zwłaszcza gdy odległość między źródłem wtórnym a przetwornikiem błędu jest duża). Stosując algorytm adaptacji FxLMS, można zapewnić stabilność układu, ale ze względu na większe opóźnienia w ścieżce wtórnej trzeba zmniejszyć wartość kroku adaptacji w stosunku do takiego bez opóźnień. Po zwiększeniu współczynnika nadpróbkowania, zwiększa się opóźnienie (liczone w próbkach), z jakim sygnał błędu wraca do sterownika – czyli odpowiedź na ostatnią adaptację wag filtra. Z tego powodu im wyższa częstotliwość próbkowania, tym niższy maksymalny krok adaptacji, przy którym algorytm jest stabilny.



Rys. 7.3. Uśrednione widmo symulowanego hałasu w kabinie samochodu

Spróbujmy jednak dokładniej przyjrzeć się działaniu układu ARH w warunkach, w jakich będzie funkcjonował w kabinie samochodu osobowego. Aby to sprawdzić, przeprowadzono test, w którym jako zaburzenie podano na wejściu sy-

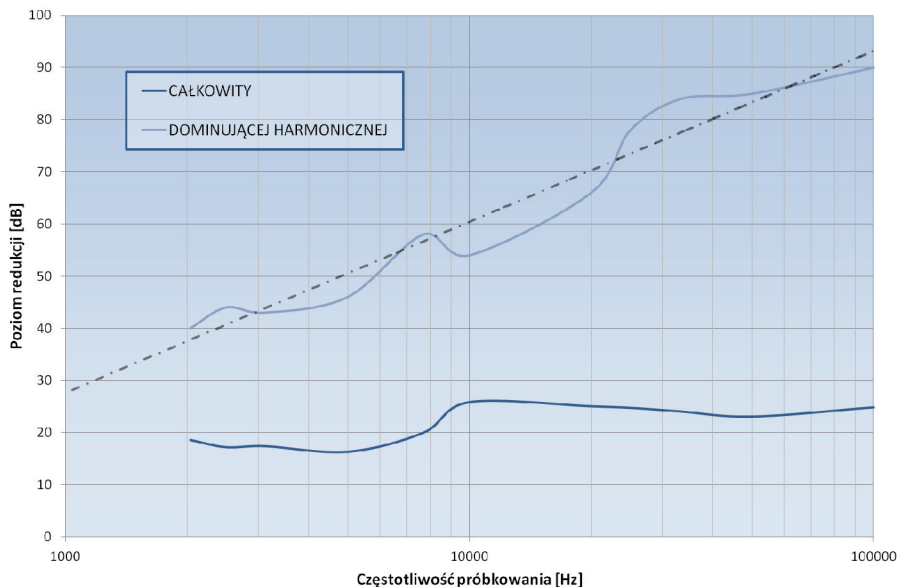
mulatora sygnał zbliżony postacią do hałasu wewnątrz pojazdu, składający z dominującej funkcji harmonicznej o częstotliwości 160 Hz i łagodnie opadającego szumu około 40 dB/oktawę, od 200 Hz (rys. 7.3). W ścieżce wtórnej umieszczono stałe opóźnienie czasowe o wartości 4 ms (w zależności od częstotliwości próbkowania sterownika, liczba próbek opóźnienia była inna). Taka wartość odpowiada odległości 1,36 m między źródłem wtórnym a przetwornikiem błędu, czyli orientacyjnej odległości między głośnikiem zamontowanym w oryginalnie przewidzianym do tego miejscu w drzwiach a głową pasażera. Dla każdej badanej częstotliwości próbkowania ustalany był niezależny, maksymalny, znormalizowany krok adaptacji, dla którego system był stabilny. Z drugiej strony, dla takiej wartości współczynnika system uzyskiwał maksymalną sprawność dla danej częstotliwości. Wykres przedstawiający zależność maksymalnego stabilnego kroku adaptacji od częstotliwości obrotu pętli sterowania przedstawiono na rys. 7.4.



Rys. 7.4. Zależność między maksymalnym stabilnym krokiem adaptacji a częstotliwością próbkowania symulowanego systemu ARH

Rezultaty symulacji skuteczności systemu wykorzystującego filtr z 512 współczynnikami, którego wagi są uaktualniane zgodnie z algorytmem FxNLMS, przedstawiono na rys. 7.5. Widać, że jeżeli częstotliwość próbkowania przekroczy 10 kHz, to skuteczność liczona dla całego pasma stabilizuje się na maksymalnym poziomie. Powyżej tego progu wszelkie zyski, wynikające z dokładniejszego modelowania przez nadpróbkowanie, kompensowane są przez straty spowodowane koniecznością zmniejszenia znormalizowanego kroku adaptacji. Jeżeli jednak weźmie się pod uwagę wyłącznie redukcję składowej harmonicznej występującej w sygnale, to można zauważyć, że zwiększanie częstotliwości próbkowania powyżej 10 kHz

powoduje dalszy wzrost skuteczności. Wynika z tego, że dla hałasu, takiego jak panujący w kabinie samochodu osobowego, warto zwiększać współczynnik nadpróbkowania sterownika, nawet do wartości dwucyfrowych.



Rys. 7.5. Skuteczność symulowanego układu ARH w samochodzie (algorytm adaptacji – opóźniony NLMS), w zależności od częstotliwości próbkowania sterownika

7.2. Opóźnienia czasowe w układach aktywnej redukcji hałasu

Kolejnym aspektem, istotnym dla praktycznej implementacji ARH, są opóźnienia występujące w tych układach, czyli przesunięcia fazowe stałe w całym zakresie częstotliwości. Im mniejsza wartość tych opóźnień, tym większa skuteczność układu (pośrednio wykazano to w poprzednich akapitach tego rozdziału). Na czas przetwarzania sygnałów (mierząc od rejestracji sygnału odniesienia do wygenerowania akustycznego sygnału kompensującego) mają wpływ następujące elementy:

- Opóźnienie w czujniku odniesienia
Wynika ono z czasu, jaki potrzebuje czujnik odniesienia (np. mikrofon lub akcelerometr) na zmianę mierzonej wielkości fizycznej na sygnał elektryczny. Odbyya się to w sposób ciągły, jednak występuje niewielka zwłoka między wyjściem a wejściem.
- Opóźnienie związane z długością kabla łączącego czujnik ze sterownikiem
Wynika to bezpośrednio ze skończonej prędkości rozchodzenia się impulsów elektrycznych w przewodnikach.
- Opóźnienia w sterowniku [50]:
 - kondycjonowanie sygnałów na wejściu,

- przetworzenie z postaci analogowej na cyfrową,
 - transfer sygnału (danych) z przetwornika do jednostki obliczeniowej,
 - opóźnienia wynikające z realizacji algorytmu sterującego,
 - transfer sygnału z jednostki obliczeniowej do przetwornika wyjściowego,
 - przetworzenie sygnału na postać analogową,
 - kondycjonowanie sygnału na wyjściu.
- Opóźnienie związane z transmitancją ścieżki wtórnej
Jest ono związane z drogą, jaką musi przebyć sygnał kompensujący od jego generacji do miejsca kompensacji. Najbardziej istotnymi elementami ze względu na całkowite opóźnienie jest źródło wtórne i akustyczna ścieżka wtórna. Głośnik, jako przetwornik sygnału elektrycznego na akustyczny, charakteryzuje się opóźnieniem zależnym od częstotliwości przenoszonego sygnału. Jego wartości jednak są o rząd mniejsze od opóźnienia wynikającego z czasu, jaki musi przebyć fala dźwiękowa od źródła wtórnego do miejsca kompensacji.
- Opóźnienie związane ze ścieżką błędu
Ma ono początek w miejscu interferencji destrukcyjnej, a koniec na wejściu sygnału cyfrowego do algorytmu adaptacji. W związku z tym wszystkie występujące w ścieżce błędu opóźnienia są identyczne, jak w ścieżce sygnału odniesienia.

Opóźnienia powstające w przetworniku odniesienia i przewodach są relatywnie niewielkie, a ich dodatkowa minimalizacja trudna do osiągnięcia. Z kolei opóźnienia w ścieżce wtórnej wynikają bezpośrednio z przyjętej strategii oddziaływania na hałas i trudno byłoby je zminimalizować bez naruszania przyjętych założeń funkcjonalnych systemu. Dlatego najbardziej racjonalne wydaje się minimalizowanie opóźnień występujących w sterowniku systemu ARH. W samym sterowniku opóźnienia występują na kolejnych etapach akwizycji, przetwarzania i generowania sygnałów sterujących. W zależności od przyjętej platformy sprzętowej opóźnienia te rozkładają się na poszczególne etapy w różnych proporcjach.

7.3. Najpopularniejsze platformy sprzętowe

Rozwój informatyki spowodował, że obecnie dostępnych jest wiele systemów komputerowych, które można by zastosować jako bazę sprzętową do realizacji układu aktywnej redukcji hałasu. Niektóre z nich są rozważane przez badaczy zajmujących się układami ARH tylko ze względu na ich dużą popularność. Czy na pewno jest to dobry wybór? Analizę struktur (ze zwróceniem szczególnej uwagi na częstotliwość próbkowania), będących reprezentantami najważniejszych gałęzi najczęściej wykorzystywanych sterowników cyfrowych, przedstawiono poniżej.

Komputer PC

Budowę tego komputera oparto na architekturze x86. Dzięki jego dużej uniwersalności wykorzystywany jest do różnych zastosowań: od narzędzia do pisania, aż po konsolę do gier. Struktura wewnętrzna tego komputera, która decyduje o jego wszechstronności, jednocześnie sprawia, że w żadnym z zastosowań nie pracuje on w efektywny sposób. Dlatego też, pomimo że na tę platformę dostępnych jest wiele aplikacji pomiarowych lub kontrolnych, wszystkie mają

mniejsze lub większe wady. Komputer PC nigdy nie był konstruowany z myślą o pracy w trybie czasu rzeczywistego [1] i z tego powodu czas wykonania tej samej porcji kodu jest różny w zależności od iteracji. Oczywiście, istnieją systemy czasu rzeczywistego przeznaczone na komputery, ale wyegzekwowanie determinizmu czasowego oznacza pogodzenie się z niską szybkością zegara próbującego lub dużymi opóźnieniami w relacji wyjście-wejście.

Do przetwarzania sygnałów z postaci analogowej do cyfrowej, i odwrotnie, w tych komputerach wykorzystywane są przetworniki zainstalowane na kartach rozszerzeń, ogólnie nazywanych kartami pomiarowymi. O ile samo przetwarzanie sygnału trwa dosyć krótko, to słabym ogniwem tej architektury jest interfejs łączący kartę pomiarową z jednostką centralną. Na płaszczyźnie fizycznej jest to magistrała dzielona z wieloma innymi urządzeniami w komputerze, co powoduje, że transfer sygnałów zależy od aktywności innych podzespołów; jeśli jest ona duża, jego praca może być nawet czasowo wstrzymywana. Z kolei na płaszczyźnie logicznej transferem tym zarządza oddzielny układ scalony, przez który dane przesyłane są do procesora, a następnie do pamięci. To zaś sprawia, że w komputerze PC do transferu danych zaangażowane są cenne zasoby obliczeniowe procesora głównego. Istnieje możliwość transferu bezpośredniego do pamięci w tak zwanym trybie DMA, ale z kolei ta metoda, aby działała płynnie, wymaga zastosowania podwójnych buforów o dużych rozmiarach. Reasumując, komplikacja transferu sygnałów w komputerach klasy x86 powoduje bardzo duże opóźnienia, a przede wszystkim brak determinizmu czasowego.

Procesor komputera PC jest uniwersalnym układem scalonym, którego zadaniem jest realizacja jak najszerszego spektrum funkcji. Dodatkowo przy jego konstruowaniu nacisk kładziono na wsparcie dla typowych zastosowań, czyli pracy biurowej. Stąd przy przetwarzaniu sygnałów, a zwłaszcza przy wykonywaniu algorytmów układów ARH, nie ma możliwości pełnego wykorzystania teoretycznie wysokiej mocy obliczeniowej. Ponadto, procesor część swoich zasobów musi przeznaczyć na zarządzanie wszystkimi podzespołami komputera przez system operacyjny. Liczba urządzeń w komputerze powoduje, że trudno jest narzucić wykonanie kodu w sposób szybki i jednocześnie deterministyczny.

Z powodu przedstawionych wad, komputer PC jako platforma sprzętowa dla układów ARH, sprawdza się w mizernym stopniu. Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że kompletny układ zrealizowany z wykorzystaniem tej platformy i zakodowany w języku programowania wysokiego poziomu osiąga opóźnienia na poziomie 30 ms (dla filtrów o rozdzielczości 512 próbek). Takie rezultaty praktycznie eliminują tę platformę z tego typu zastosowań. Oczywiście, można pokusić się o implementację układu ARH w kodzie maszynowym (razem z własnym systemem operacyjnym), jednakże to rozwiązanie wymaga dużej wiedzy i nakładu pracy ze względu na złożoną budowę komputera. Tak skonstruowany system ARH jest w stanie osiągnąć częstotliwość obrotu pętli sterowania na poziomie kilku kilohertzów.

Procesor sygnałowy

Układy scalone, nazywane DSP (ang. *Digital Signal Processor*) są jednostkami wyspecjalizowanymi do zaawansowanego przetwarzania sygnałów [83, 40]. Ich

konstrukcja jest optymalizowana do wykonywania obliczeń najczęściej wykorzystywanych w tego typu zadaniach. W związku z tym wewnątrz układu zintegrowana jest potrzebna pamięć i jednostki arytmetyczne. Taki układ scalony umieszcza się na specjalnie zaprojektowanej płytce, na której znajdują się również przetworniki A/C i C/A. Wymiana informacji odbywa się przez te przetworniki i specjalny interfejs cyfrowy, umożliwiający wgranie programu sterującego. Po jego zapisaniu w pamięci trwałej, całe urządzenie (płytką) staje się całkowicie samodzielne.

Bardzo prosta konstrukcja systemu opartego na układzie DSP sprawia, że największe opóźnienia generuje samo przetwarzanie algorytmów. Zamiana sygnałów z postaci analogowej na cyfrową i przesłanie ich do procesora trwa znacznie krócej niż ich obróbka w procesorze. Z tego powodu kluczowa dla szybkości działania całego systemu jest prędkość samego układu DSP. Dzięki temu, że nie traci on zasobów na realizację zadań pobocznych i dzięki temu, że jego architektura wewnętrzna zaprojektowana została do przetwarzania sygnałów, przy relatywnie małej ogólnej mocy obliczeniowej uzyskuje się dość dużą prędkość działania. Jednak jest to tylko specjalizacja częściowa, dla całej gamy zadań rozumianej jako przetwarzanie sygnałów. Realizacja algorytmów układów ARH jest tylko jednym z nich. Stąd, aby zachować uniwersalność, dalej używany jest system operacyjny, natomiast niektóre złożone operacje matematyczne, niezbędne w układach ARH, wymagają wielu cykli pracy procesora.

Rozwiązania wykorzystujące układy DSP mają również minusy. Dostępne narzędzia programistyczne i architektura wewnętrzna sprawiają, że wprowadzanie jakichkolwiek zmian w programie procesora jest bardzo żmudne. Często mała, wręcz banalna, zmiana w strukturze algorytmu powoduje konieczność zaprojektowania od nowa struktury kodu przeznaczonego dla tych układów scalonych. Na przykład, wykorzystywane metody programistyczne optymalizujące prędkość wykonywania kodu są przyczyną braku możliwości wyboru częstotliwości pracy urządzenia po wgraniu do niego programu. Dodatkowo obliczenia wykonywane wewnątrz algorytmu można obserwować wyłącznie wyrywkowo. W praktyce dostępna jest tylko obserwacja sygnałów zewnętrznych. W razie niewłaściwego działania całego urządzenia bardzo to utrudnia znalezienie błędu.

Wykorzystując „triki” i uproszczenia programistyczne w kodzie zaimplementowanym na najszybszych dostępnych procesorach DSP, można osiągnąć częstotliwość pętli sterowania układu ARH na poziomie 20 kHz. Powyższa wartość została uzyskana dla algorytmu LMS zmieniającego współczynniki filtra SOI o rozdzielczości 512.

Układ FPGA

Układy FPGA (ang. *Field Programmable Gate Array*) to układy scalone, umożliwiające w prosty sposób wielokrotną zmianę wewnętrznych połączeń elektrycznych [89]. Wyposaża się je w dużą ilość najbardziej elementarnych układów logicznych, których odpowiednia kombinacja pozwala na uzyskiwanie różnych funkcjonalności. Dzięki temu można uzyskiwać układy cyfrowe bardzo wysoko specjalizowane, które w jednym momencie realizują jedno zadanie, aby po przeprogramowaniu móc realizować zupełnie inne. Zanim pojawiły się tego

typu możliwości, stworzenie specjalizowanego układu scalonego wymagało ogromnych nakładów finansowych, co powodowało, że były one opłacalne przy produkcji kilkuset tysięcy sztuk. Dzięki FPGA można tworzyć pojedyncze jednostki, które nawet bardzo złożone operacje będą wykonywały w jednym cyklu pracy procesora, a więc z częstotliwościami bliskimi kilku megahertzom.

Właśnie szybkość działania jest głównym powodem częstego stosowania układów FPGA [27, 28]. Co prawda, nie ma możliwości „zaprogramowania” w nich przetwornika A/C i C/A, jednak wszystkie pozostałe komponenty systemu ARH mogą być zintegrowane w tej jednej kości. I tak naprawdę cały algorytm sterujący układem ARH można zrealizować przez odpowiednie połączenia elektryczne. Klasycznych opóźnień przy transferze danych nie ma, bo nie istnieje pamięć, w której byłyby one przechowywane. Próbką z przetwornika trafia bezpośrednio do jednostki obliczeniowej. Szybkość obliczeń zależy w praktyce tylko od wielkości układu i maksymalnego zegara taktującego. Jeżeli układ jest odpowiednio duży i algorytm na to pozwala, to bardzo złożone operacje można realizować równolegle. Na przykład, w algorytmie LMS adaptację wag filtra można zacząć, zanim skończy się właściwa filtracja. Dodatkową zaletą sprzętowej realizacji programu jest pełny determinizm czasu wykonania. Nie ma żadnych nieokreślonych opóźnień czasowych, poza zdefiniowanymi w trakcie programowania.

Do tej pory szersze stosowanie układów FPGA ograniczały dostępne narzędzia programistyczne. Wymagały one, oprócz dużej wiedzy programistycznej, doskonałej znajomości zagadnień elektroniki cyfrowej. Dopiero po pojawieniu się systemów umożliwiających programowanie tego typu układów w językach wysokiego poziomu otworzyły się możliwości ich wykorzystania również przez mniej wyspecjalizowanych programistów. Dobrym przykładem takiego narzędzia jest moduł LabVIEW FPGA, który – wykorzystując znane środowisko programistyczne – umożliwia szybkie prototypowanie nietypowych urządzeń elektronicznych.

Wykorzystując to środowisko, oparty na algorytmie LMS program sterujący układem ARH został przeniesiony na platformę FPGA. System może zmieniać do 1024 współczynników filtra SOI według różnych algorytmów: LMS, FxLMS, NLMS, FxNLMS, Opóźniony LMS i Opóźniony NLMS. Dodatkowo wbudowano funkcję automatycznego wyznaczania transmitancji ścieżki wtórnej przed każdym uruchomieniem systemu ARH. Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że dla filtra składającego się z 512 współczynników adaptowanych pod kontrolą Opóźnionego NLMS maksymalna częstotliwość obrotu pętli sterowania wynosi 100 kHz (przy częstotliwości pracy układu 75 MHz). Jest to najlepszy rezultat spośród wszystkich testowanych platform.

W badanych platformach sprzętowych kondycjonowanie sygnałów, zarówno wejściowych, jak i wyjściowych, realizowane jest poza samym sterownikiem. W analogowych torach wejściowych i wyjściowych wstawiane są wysokiej klasy przedwzmacniacze, dopasowujące sygnały do przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych. Używanie zewnętrznego wzmacniacza kondycjonującego umożliwia dobranie urządzenia o parametrach optymalnych z punktu widzenia układów ARH. Markowy produkt, przy wyłączonych filtrach ograniczających pasmo

przepustowe, będzie wprowadzał opóźnienia na poziomie 0,5 ms. Taka wartość jest już bliska wartościom wynikającym z teorii filtrowania sygnałów.

Opisane charakterystyki platform są rezultatem kilkuletnich doświadczeń autora tej publikacji nad układami aktywnej redukcji hałasu. Na każdej z nich były uruchamiane i testowane algorytmy sterujące, oparte na filtrowaniu cyfrowym. Charakterystyki działania sterowników sprawdzano przez pomiar charakterystycznych wielkości oraz uruchomienie z każdym z nich układu ARH. Testy prowadzone w komorze bezechowej dały również obraz różnic funkcjonalnych, z punktu widzenia inżyniera uruchamiającego system.

Przeprowadzone badania doprowadziły do następującej konkluzji. Dzięki wprowadzonym nowym narzędziom programistycznym, najlepszą obecnie platformą sprzętową dla sterownika układu ARH wydają się być systemy wykorzystujące układy FPGA. Są one bowiem kompromisem między ich potencjałem (zwłaszcza w zakresie częstotliwości próbkowania), a trudnością w implementacji optymalnego algorytmu sterującego.

8. Metodyka wyboru źródła sygnału odniesienia

8.1. Podejście klasyczne

System aktywnej redukcji hałasu, bazujący na filtrowaniu cyfrowym, w zasadzie jedynie modyfikuje sygnał odniesienia. Wzmacnia go w obrębie niektórych częstotliwości i przesuwają w fazie tak, aby jak najlepiej odpowiadał sygnałowi kompensowanemu. Dlatego system jest tym bardziej skuteczny, im bardziej sygnał odniesienia ma przebieg podobny do sygnału kompensowanego (zawiera zbliżone poziomy istotnych składowych występujących w sygnale kompensowanym i ma podobną charakterystykę fazową). Powyższe stwierdzenie dotyczy również zmiany tych charakterystyk w czasie.

Idealny sygnał odniesienia ma dokładnie taki sam przebieg, jak sygnał kompensowany – jest jedynie przesunięty o czas potrzebny na przetworzenie sygnału i wysłanie go przez źródło wtórne do miejsca aktywnej redukcji. Z tego powodu bardzo często jako przetwornik wykorzystuje się mikrofon, umieszczony w ścieżce powietrznej rozchodzenia hałasu między źródłem pierwotnym a miejscem kompensacji. Popularność tego typu przetwornika wynika z faktu, że dźwięki rozchodzące się w powietrzu (w polu swobodnym dalekim) tłumione są w dość regularny sposób – najbardziej wysokie, a najsłabiej niskie częstotliwości [103]. Dlatego umieszczenie go w praktycznie dowolnym miejscu ścieżki powoduje rejestrację sygnału odniesienia o dobrych charakterystykach. W rzeczywistości rzadko mamy do czynienia z idealnym akustycznym polem swobodnym, w związku z tym pozycja mikrofonu będzie jednak miała niewielki wpływ na skuteczność systemu.

Użycie mikrofonu jako źródła odniesienia często powoduje dodatkowe komplikacje, na przykład związane z powstawaniem zjawiska akustycznego sprzężenia zwrotnego między źródłem wtórnym a mikrofonem. Dlatego zawsze warto poszukać innego źródła odniesienia niż akustyczne [49] (w samochodzie mogą to być: elektryczny sygnał zapłonu lub drgania któregoś z podzespołów pojazdu). Rodzi się jednak pytanie, który będzie najlepszy? Uwzględniając wiedzę na temat rozprzestrzeniania się drgań i hałasu w samochodzie, można wytypować grupę tych źródeł, ale trudno bez przeprowadzenia weryfikacji określić najlepsze położenie czujnika rejestrującego sygnał odniesienia [42]. Dla każdego z przewidywanych punktów można uruchomić kompletny system ARH i sprawdzić, dla którego z nich osiągnęte są najlepsze rezultaty. Taka metoda jest jednak bardzo pracochłonna i wymaga poświęcenia dużej ilości czasu przy wyciszaniu obiekcie, a ponadto system trzeba niekiedy uruchomić w warunkach polowych. Dodatkowym problemem jest narażanie badacza na wysokie poziomy dźwięku. Z reguły zanim uda się uruchomić w pełni prawidłowo działający skuteczny układ ARH, występują momenty jego niestabilnego działania. Oznacza to, zamiast obniżenia poziomu hałasu, znaczne jego podwyższenie (maksymalna uzyskiwana moc akustyczna, w przypadku nieprawidłowego działania, przekracza dwukrotność mocy wyciszanego źródła hałasu). Dlatego bezwzględnie konieczne jest stosowanie w trakcie takich prac ochronników słuchu – nie zawsze można wyjść poza strefę oddziaływania.

Powstaje więc pytanie, w jaki sposób znaleźć sygnał odniesienia bez uruchamiania za każdym razem kompletnego systemu ARH?

8.2. Symulacyjna metoda wyboru czujnika odniesienia

Jedną z metod jest posłużenie się opisanym w rozdziale 4 symulatorem, czyli modelem symulacyjnym systemu ARH. Dzięki możliwości wprowadzenia na wejściu symulatora sygnałów zarejestrowanych w wyciszonym obiekcie, można przeprowadzić badania porównawcze skuteczności działania systemu. Dla różnych sygnałów odniesienia otrzymamy inne symulowane poziomy dźwięku w miejscu kompensacji. Metoda ta wymaga jednak synchronicznego rejestrowania testowanych sygnałów: kompensowanego i odniesienia. Tym sposobem można przebadать całą grupę tych sygnałów i różnych ich kombinacji. Jeżeli w planowanym systemie występuje pomijalne akustyczne sprzężenie zwrotne, można w ten sposób porównać zarówno sygnały odniesienia rejestrowane akcelerometrami, jak i mikrofonami [53, 9, 79]. Ważne jest jednak niezależne dobranie najwyższej stabilnej wartości kroku adaptacji dla każdej kombinacji sygnałów.



Rys. 8.1. Samochód Toyota Hiace wykorzystany w badaniach porównawczych źródeł sygnału odniesienia

Przedstawioną metodę można nazywać bezpośrednią, gdyż różnica między nią a prezentowanym wcześniej podejściem sprowadza się do wykorzystania modelu symulacyjnego zamiast rzeczywistego obiektu (por. [2]). Ale dzięki temu cały proces można zautomatyzować, aby przebiegał on praktycznie bez udziału operatora. A to oznacza, że źródła sygnału odniesienia można ocenić w znacznie krótszym czasie i w warunkach bardziej komfortowych dla badającego.

Wykorzystując powyższą metodę, przeprowadzono analizę porównawczą źródeł sygnału odniesienia w Toyocie Hiace. W tym celu wykonano kilkanaście re-

jeździe w różnych stanach ruchu pojazdu. Synchronicznie zarejestrowano osiem kanałów pomiarowych, ponieważ badanych źródeł było więcej niż wejść sprzętu rejestrującego; niektóre przebiegi zostały wykonane dwukrotnie dla dwóch konfiguracji czujników.

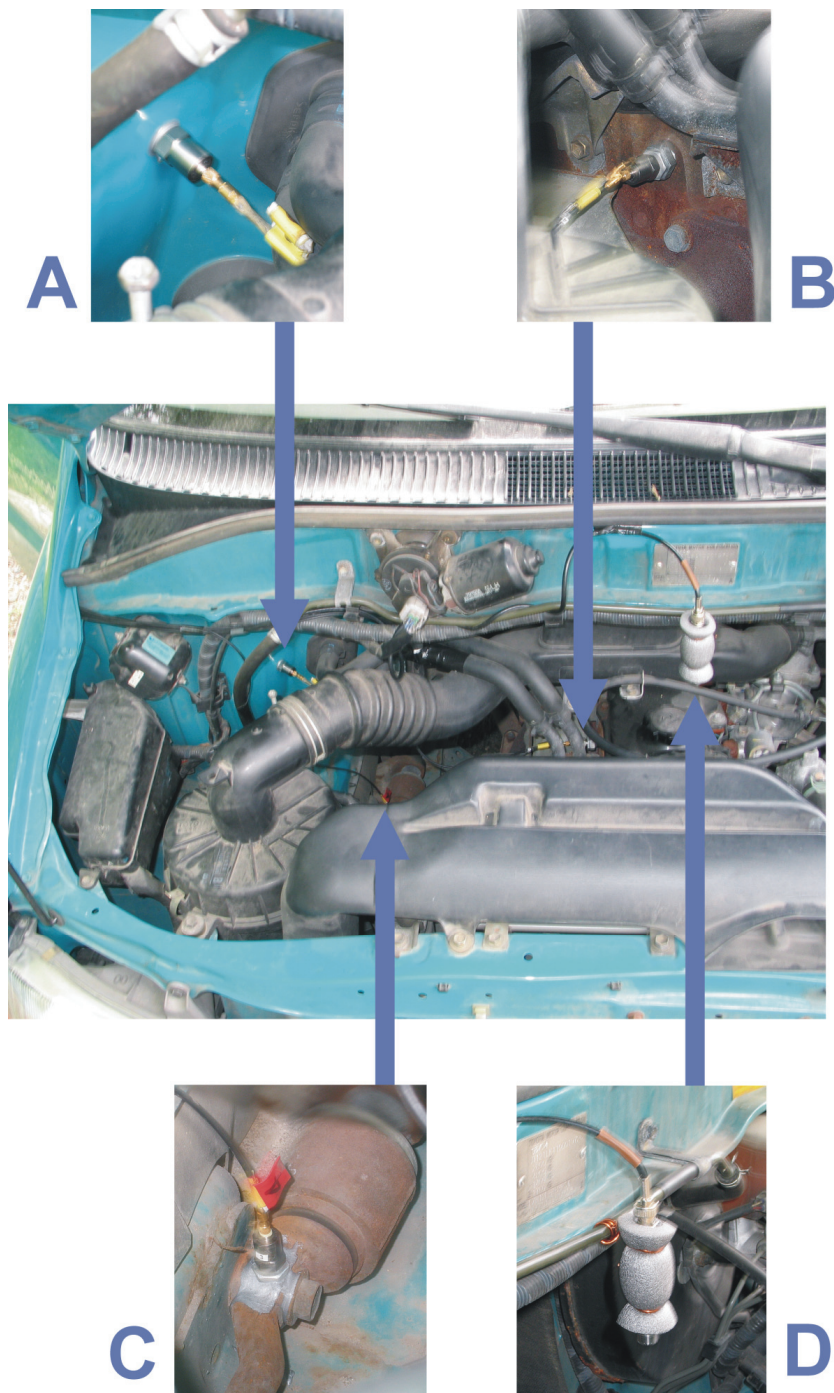
Przeprowadzone badania umożliwiły ocenę hałasu panującego we wnętrzu samochodu oraz wybór źródła sygnału odniesienia. Najważniejsze parametry techniczne badanego pojazdu (rys. 8.1):

Model:	– Toyota Hiace LHX12,
Rok produkcji:	– 1996,
Typ nadwozia:	– van 4-drzwiowe,
Silnik:	– wolnossący diesel, pojemność 2,446 l, rzędowy, 4-cylindrowy, 8-zaworowy, rozrząd napędzany łańcuchem,
Moc silnika:	– 102 KM (75 kW)/3600 obr./min,
Skrzynia biegów:	– manualna, 5-biegowa, napęd na koła tylne,
Prędkość maksymalna:	– 145 km/h,
Maksymalna liczba pasażerów:	– 7,
Przednie zawieszenie:	– wahacze podwójne, drążki skrętne,
Tylne zawieszenie:	– oś sztywna, wahacze wleczone,
Opony:	– letnie, 195/70R15, producent Stomil Olsztyn,
Inne:	– nadwozie samochodu wykonane z blachy stalowej zgrzewanej punktowo, samonośne. Podłoga we wnętrzu dodatkowo wytłumiona gumą i sklejką.

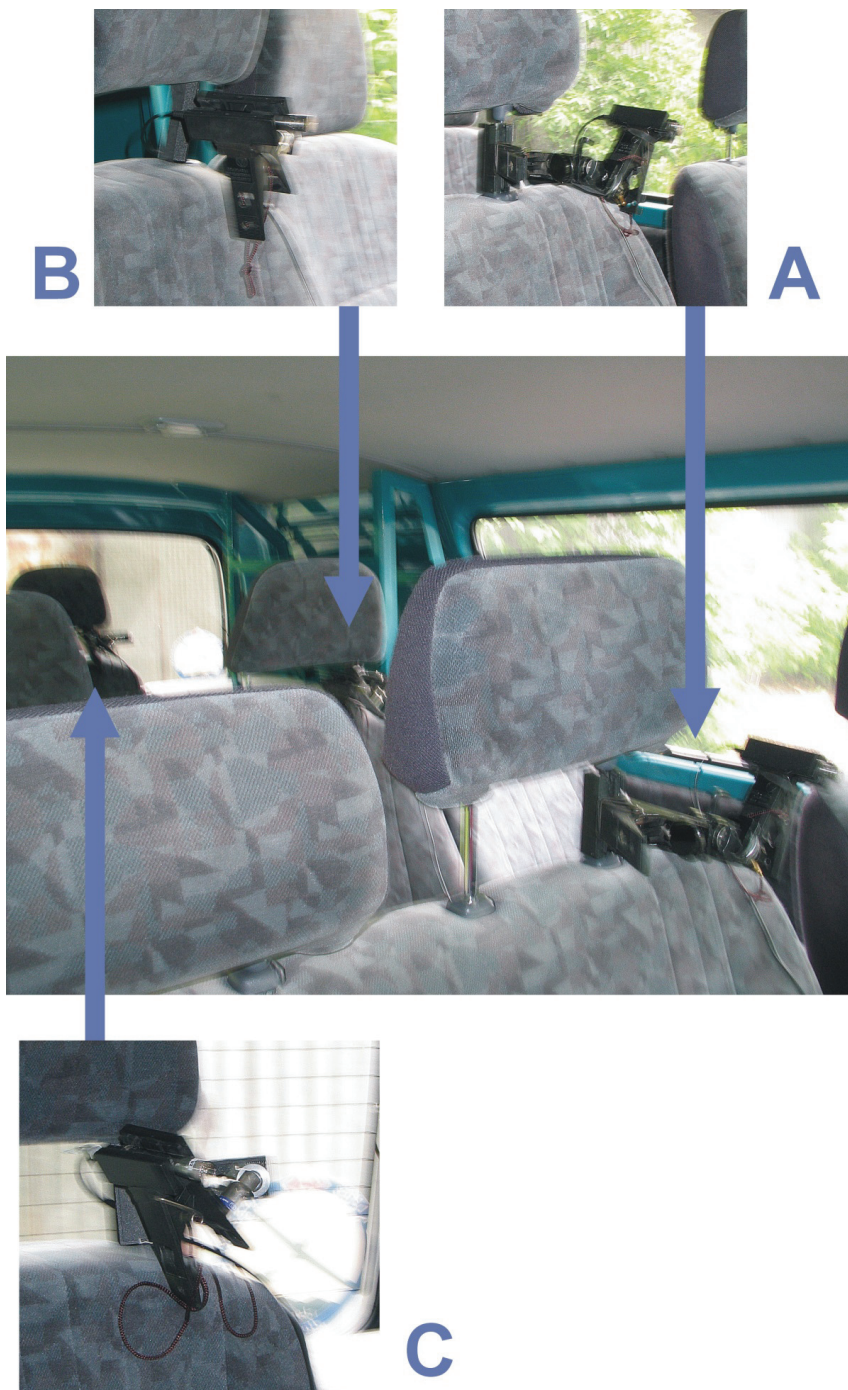
Ponieważ na podstawie wyników tych badań miał być jak najwierniej symulowany układ aktywnej redukcji hałasu, istotne było, aby przetworniki pomiarowe znajdowały się w tych samych miejscach, jak w układzie rzeczywistym. Dlatego rozmieszczono następujące typy przetworników:

- 1) akcelrometr Bruel&Krajer 4384 – na górnym mocowaniu przedniego zawieszenia (rys. 8.2 C),
- 2) akcelrometr Bruel&Krajer 4384 – na przegrodzie przedniej oddzielającej kabinę pasażerską od przedziału silnikowego (rys. 8.2 A),
- 3) akcelrometr Bruel&Krajer 4384 – na głowicy silnika (rys. 8.2 B),
- 4) mikrofon ICP TMS426A01 – w komorze silnika (rys. 8.2 D),
- 5) akcelrometr Bruel&Krajer 4500 – na szybie przedniej (rys. 8.4 A),
- 6) akcelrometr Bruel&Krajer 4501 – na szybie bocznej prawej, przy lusterku (rys. 8.4 B),
- 7) akcelrometr Bruel&Krajer 4366 – na tylnym nadkole,
- 8) mikrofon ICP TMS426A01 – na wysokości 75 cm nad powierzchnią nieobciążonego środkowego przedniego siedzenia (rys. 8.3 A),
- 9) mikrofon ICP TMS426A01 – na wysokości 75 cm nad powierzchnią nieobciążonego środkowego siedzenia w drugim rzędzie (rys. 8.3 B),
- 10) mikrofon ICP TMS426A01 – na wysokości 75 cm nad powierzchnią nieobciążonego obrotowego siedzenia operatora (rys. 8.3 C).

Rozmieszczenie tych przetworników w komorze silnika zaprezentowano na rys. 8.2, natomiast w kabinie – na rys. 8.3 i 8.4. Mikrofony w kabinie skierowane były osią największej czułości w kierunku jazdy samochodu.



Rys. 8.2. Rozmieszczenie czujników w komorze silnika



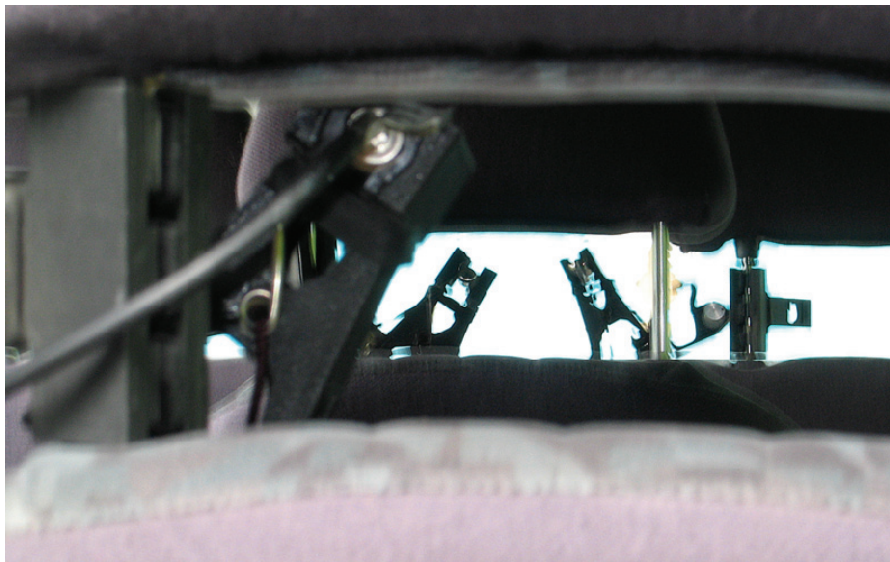
Rys. 8.3. Rozmieszczenie mikrofonów wewnątrz samochodu



Rys. 8.4. Rozmieszczenie akcelerometrów po wewnętrznej stronie szyb

Sygnały z czujników w komorze silnika były transmitowane przewodami przeprowadzonymi do kabiny, w której znajdowały się wzmacniacze pomiarowe. Ponieważ ważne było, aby nie wprowadzać dodatkowych źródeł hałasu, nie występujących podczas normalnej eksploatacji samochodu, przewody poprowadzono pod poszyciem samochodu do otworu drzwiowego. Pozostawienie przewodów na zewnątrz, na powierzchni błotników, mogłoby doprowadzić do zjawiska odrywania się strugi powietrza, co miałyby niekorzystne konsekwencje akustyczne. Kabli nie przepuszczono przez przegrodę czołową ze względu na trudności montażowe, jak również konieczność zachowania szczelności tego elementu. Mikrofony w kabinie

zostały umieszczone tak, aby punkty, w których się znajdują, w przybliżeniu tworzyły linię prostą, równoległą do osi pojazdu (rys. 8.5).



Rys. 8.5. Widok wszystkich mikrofonów umieszczonych w kabinie

Do rejestracji poszczególnych sygnałów wykorzystano wszystkie osiem kanałów cyfrowego magnetofonu TEAC (rys. 8.6). Do badań użyto dwóch czterokanałowych wzmacniaczy pomiarowych – jeden ładunkowy do kondycjonowania sygnałów z akcelerometrów (Bruel&Krajer 2692), drugi napięciowy do współpracy z mikrofonami ICP (Bruel&Krajer 2693). Przed rozpoczęciem pomiarów wykonano kalibrację wszystkich torów pomiarowych.

Przebiegi czasowe każdego sygnału zarejestrowano w trakcie następujących stanów ruchu pojazdu:

- a) jazda z prędkością ustaloną 55 km/h (czwarty bieg) przez 5 s, a następnie maksymalne przyspieszanie aż do osiągnięcia prędkości 110 km/h,
- b) jazda z prędkością ustaloną 60 km/h na trzecim biegu,
- c) jazda z prędkością ustaloną 100 km/h na czwartym biegu,
- d) jazda z prędkością ustaloną 100 km/h na piątym biegu,
- e) wybieg od prędkości 65 km/h do 55 km/h,
- f) wybieg od prędkości 105 km/h do 95 km/h,
- g) pojazd stoi, silnik pracuje na wolnych obrotach (sprzęgło włączone),
- h) pojazd stoi, silnik $\frac{1}{4}$ obrotów maksymalnych, sprzęgło załączone,
- i) pojazd stoi, silnik $\frac{1}{2}$ obrotów maksymalnych, sprzęgło załączone,
- j) pojazd stoi, silnik $\frac{3}{4}$ obrotów maksymalnych, sprzęgło załączone,
- k) pojazd stoi, silnik z maksymalnymi obrotami, sprzęgło załączone.



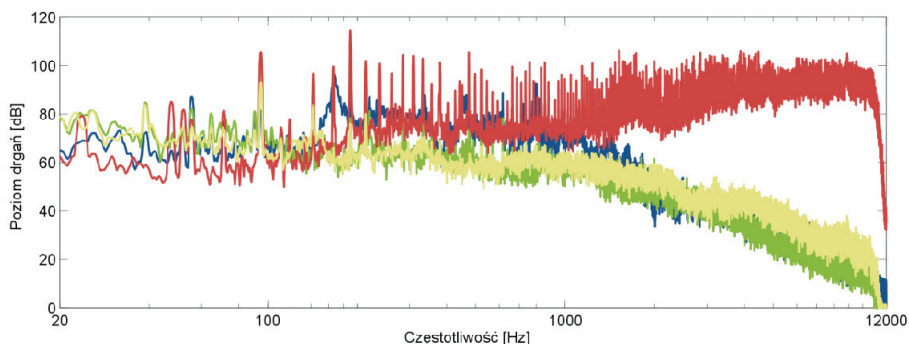
Rys. 8.6. Oprzyrządowanie pomiarowe wewnątrz kabiny

Po analizie wszystkich próbek okazało się, że błędem było zainstalowanie mikrofonu w komorze silnika bez osłony przeciwwietrznej. Sygnał był mocno zakłócony przez świst powietrza wentylującego komorę silnika.

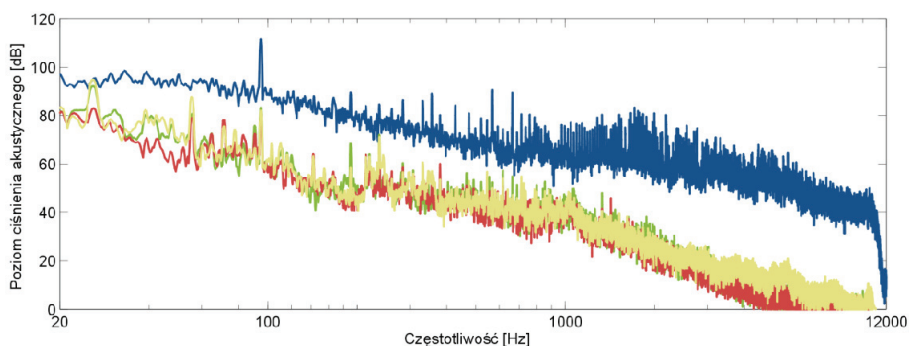
Widmo mocy przyspieszeń drgań przedstawia rys. 8.7, a sygnałów zarejestrowanych mikrofonami – rys. 8.8. Zapisano je przy prędkości 100 km/h na piątym biegu. Widma zostały uzyskane metodą dyskretnej transformaty Fouriera (DFT): rozdzielczość analizy wynosiła 65 536 punkty, zastosowano okno prostokątne (ang. *flat top window*) z pięciokrotnym uśrednianiem. Poziom odniesienia dla widma mocy drgań akceleratorów wynosił $a_0 = 10 \text{ m/s}^2$. Nakładanie się kolejnych analizowanych odcinków wynosiło dwie trzecie długości odcinka.

Jeśli porównamy obydwie przedstawione poniżej widma, zauważymy, że najbardziej zbliżonymi sygnałami zarejestrowanymi przez akcelerometry do sygnałów akustycznych zarejestrowanych nad siedzeniami są drgania szyb (przedniej i bocznej). Powyższy fakt znalazł odzwierciedlenie w przeprowadzonych symulacjach.

Badanie działania układu ARH przeprowadzono dla wszystkich kombinacji przetworników, które wykorzystywano jako źródło sygnału odniesienia lub sygnału kompensowanego. Symulowany sterownik zawierał filtr SOI o długości 512 współczynników, które były uaktualniane zgodnie z algorytmem NLMS. Założono, że transmitancja ścieżki wtórnej jest równa jedności. Czas obrotu pętli sterowania wynosił 41,6(6) ns (24 000 Hz). Skuteczność układu obliczoną na podstawie rejestracji wykonanej w samochodzie Toyota Hiace w trakcie jazdy z prędkością 100 km/h na piątym biegu przedstawiono w tab. 8.1.



Rys. 8.7. Widmo przyspieszeń drgań przedniego zawieszenia (kolor niebieski), szyby przedniej (kolor zielony), głowicy silnika (kolor czerwony), szyb bocznej (kolor żółty)



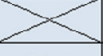
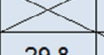
Rys. 8.8. Widmo poziomu dźwięku zarejestrowanego: w komorze silnika (kolor niebieski), nad przednim siedzeniem (kolor zielony), w drugim rzędzie siedzeń (kolor czerwony), nad siedzeniem operatora (kolor żółty)

Najlepsze efekty w redukcji hałasu, niezależnie od wybranego miejsca w kabinie, uzyskano wykorzystując w pętli sterowania tylko sygnały akustyczne. Zaskoczeniem było wzmocnienie hałasu, kiedy źródłem sygnału odniesienia był akcelerometr umieszczony na głowicy silnika. Prawdopodobnie wynikało to z faktu, że sygnał ten zawiera sporo składowych, związanych z pracą mechanizmów wewnątrz silnika, które w kabinie są niesłyszalne, a brak w nim składowych wywołanych toczeniem się kół czy przepływem powietrza.

Tak samo niewielki efekt przyniosło użycie akcelerometru zamontowanego na przegrodzie czołowej, choć wydawałoby się, że jest to jedna z głównych dróg propagacji dźwięku. Wynika z tego, że drgania tego elementu są słabo skorelowane z falą akustyczną rozchodzącą się wewnątrz kabiny. Pomimo niezastosowania osłony przeciwwietrznej na mikrofonie umieszczonym w komorze silnika, skuteczność minimalizacji hałasu przy jego wykorzystaniu była na bardzo dobrym poziomie, zwłaszcza na przednim siedzeniu. Istnieje duże prawdopodobieństwo, że w tym przypadku akustyczne sprzężenie zwrotne będzie bardzo słabe, dlatego można zastosować sterownik, który go nie uwzględnia.

Ciekawym efektem jest uzyskanie zadowalających wyników redukcji poziomu dźwięku, kiedy mikrofon zbierający sygnał odniesienia znajdował się za (patrząc od strony silnika) mikrofonem rejestrującym sygnał kompensowany. Dobre wyniki uzyskano wykorzystując sygnał drgań szyb przedniej i bocznej, z lekkim wskazaniem na akcelerometr znajdujący się na szybie bocznej. Sygnał skompensowany charakteryzował się stosunkowo niewielką wartością szczyt-szczyt, co dawało bardzo dobre odczucia przy jego odsłuchiowaniu. Analiza widma hałasu skompensowanego wykazała, że w sygnale odniesienia zawarte są wszystkie najważniejsze składowe, związane z głównymi źródłami hałasu w samochodzie, dzięki czemu redukcja jest równomierna w całym paśmie.

Tab. 8.1. Redukcje uzyskane z wykorzystaniem NLMS w zależności od źródła sygnałów; kolumny oznaczają źródła sygnału kompensowanego, natomiast wiersze sygnału odniesienia (wszystkie wartości w dB)

	mikrofon nad środkowym fotelem w pierwszym rzędzie	mikrofon nad środkowym fotelem w drugim rzędzie	mikrofon nad fotelem operatora
akcelerometr na górnym mocowaniu przedniego zawieszenia	10,3	6,3	11,1
akcelerometr na przegrodzie przedniej	15,5	11,4	16,2
akcelerometr na głowicy silnika	11,6	7,6	12,3
mikrofon w komorze silnika	27,7	23,8	28,5
akcelerometr na szybie bocznej prawej, przy lusterku	20,6	16,5	21,3
mikrofon nad środkowym fotelem w pierwszym rzędzie		30,3	33,9
mikrofon nad środkowym fotelem w drugim rzędzie	34,1		34,4
mikrofon nad fotelem operatora	32,4	29,8	

8.3. Pośrednia metoda wyboru czujnika odniesienia

Wyniki przeprowadzonych badań wykazują, że możliwa jest selekcja sygnału odniesienia przy wykorzystaniu metody symulacyjnej. Można ją zastosować do porównywania źródeł zarówno akustycznych, jak i drganiowych. Czasem jednak pożądane byłoby (ze względu na dużą liczbę potencjalnych źródeł odniesienia do zweryfikowania) jeszcze większe uproszczenie procedury poszukiwania najlepszego źródła odniesienia. Naturalną techniką analizy, mogącą w efekcie prowadzić do optymalnego wyboru punktu, jest analiza koherencyjna. Pozwala ona bowiem na ocenę spójności oddziaływania dwóch sygnałów dotyczących różnych procesów fizycznych (w tym sygnału drganiowego i akustycznego). Poza tym funkcja koherencji zwyczajnej jest mnożnikiem bezwymiarowym, a suma koherencji cząstkowych spełnia zależność [69, 3]:

$$\sum_{i=1}^N r_i^2(f) \leq 1 \quad (8.1)$$

co pozwala na separację części sygnału spójnego i sygnałów reszkowych.

Bezpośrednie zastosowanie koherencji jako wskaźnika jakości wyboru punktu odniesienia jest jednakże trudne. Koherencja jest funkcją częstotliwości. Fakt, że część składowych widmowych jest koherentna, sam w sobie nie niesie jeszcze informacji o jakości sygnału odniesienia, gdyż składowe te niekoniecznie muszą być istotne. Podobną wadę ma wartość funkcji koherencji uśredniona po zadanym zakresie częstotliwości. Istnieją dwie drogi postępowania. Albo możemy spróbować opisać (zidentyfikować) wszystkie ścieżki propagacji źródło hałasu – punkt odniesienia i źródło hałasu – wyjście, a następnie zbudować kryterium optymalizacji tych dróg (lokalizacji punktu odniesienia), albo znaleźć wskaźnik jakości łączący koherencję między punktami odniesienia i wyjściem, odpowiadający poziomowi energii (mocy) koherentnej części sygnału.

Jak zaznaczono na początku tego rozdziału, system ARH jedynie modyfikuje sygnał odniesienia tak, aby uzyskać pożądaną odpowiedź – sygnał kompensowany. Stwierdzono również, że im sygnał odniesienia jest bliższy kompensowanemu, tym większa jest skuteczność układu. Z przyjęcia takich stwierdzeń wynika, że filtr cyfrowy w układzie ARH modeluje jedynie różnicę między sygnałem odniesienia a sygnałem kompensowanym. Stąd im mniejsze tłumienie ścieżki, której wejściem jest punkt rejestracji sygnału odniesienia, a wyjściem miejsce wyciszane, tym większa skuteczność układu. Idealną transmitancją będzie brak jakiejkolwiek modyfikacji sygnału, czyli w reprezentacji widmowej:

$$\lim_{\omega} H(j\omega) = 1 \quad (8.2)$$

W przypadku, gdy ścieżka wtórna (czyli ścieżka sygnału kompensującego) jest różna od jedności, idealną teoretyczną transmitancją między sygnałem odniesienia a kompensowanym będzie właśnie transmitancja ścieżki wtórnej. Nasuwa się pytanie, w jaki sposób szybko i skutecznie oceniać tę transmitancję w praktyce?

Uwzględniając powyższe rozważania, wprowadźmy wskaźnik: Poziom Mocy Koherentnej (PMK) będący uśrednioną po czasie próbkowania mocą koherentnej części sygnału odniesienia zgodnie ze wzorem:

$$PMK = 20 \log \frac{\int_0^{f_N} (\gamma_{xy}^2(f) \cdot G_{yy}(f)) df}{f_N \cdot 20 \cdot 10^{-6}} \quad (8.3)$$

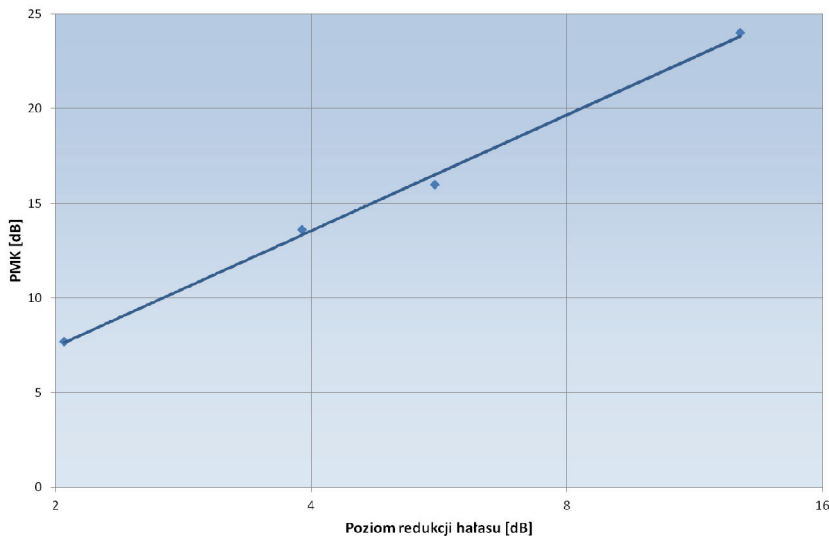
gdzie $\gamma_{xy}^2(f)$ jest koherencją zwyczajną między sygnałem odniesienia i kompensowanym, $G_{yy}(f)$ – widmo mocy sygnału kompensowanego, f_N – częstotliwość Nyquista (równa połowie częstotliwości próbkowania). Poziom odniesienia wynosi $20 \cdot 10^{-6}$ W. Jest to moc koherentna, dla której teoretyczny układ ARH kompensuje szum różowy o 0 dB.

Tak zdefiniowany wskaźnik jest łatwy do wykorzystania w praktyce. Obydwie funkcje (koherencję i widmo mocy) można łatwo uzyskać, wykorzystując dyskretną transformatę Fouriera. Większość systemów pomiarowych ma zaimplementowane bardzo szybkie algorytmy do liczenia FFT, dzięki czemu są w stanie podawać ją na bieżąco, w trakcie pomiarów. Łatwo więc można przystosować takie systemy do obliczania Poziomu Mocy Koherentnej. Jedną z możliwych reprezentacji transmitancji

układu jest funkcja odpowiedzi częstotliwościowej, czyli inaczej charakterystyka częstotliwościowa. Funkcję dyskretnego widma mocy sygnału kompensowanego mnożonego skalarnie przez dyskretną postać funkcji koherencji można traktować jako funkcję ważącą, uwypuklającą tylko te składowe widmowe, które mają istotne znaczenie w wyciszonym hałasie (czyli sygnale kompensowanym). W ten sposób wysokie wartości powstałej funkcji oznaczają użyteczne źródło odniesienia dla danej aplikacji układu ARH. Wartość średnia tego iloczynu w całym przedziale badanych częstotliwości umożliwia jednowymiarową ocenę badanego pasma częstotliwości.

Zgodnie z definicją poziomu mocy koherentnej, jest on zależny od sygnału zaburzenia i ilości informacji na temat tego zaburzenia zawartej w sygnale odniesienia. W związku z tym można go wykorzystać do przeprowadzenia dwóch rodzajów analiz. Pierwszy z nich dotyczy analizy różnych źródeł odniesienia, na przykład poszukiwania najlepszego położenia przetwornika drgań. Można też dobierać do aplikacji przetworniki o różnych charakterystykach użytkowych i badać wrażliwość układu na ich parametry (przykład sztucznie uszkodzonego mikrofonu przedstawiono na rys. 8.10). Analizę tę można rozszerzyć o badanie przetworników różnych typów, na przykład drganiowych i akustycznych przy zachowaniu warunku jednakowego oddziaływania w sprzężeniu zwrotnym.

Drugim sposobem wykorzystania wskaźnika może być analiza tego samego przetwornika dla różnych aplikacji ARH. Będzie ona na pewno mniej wykorzystywana, ponieważ z reguły najpierw mamy miejsce o dużym poziomie hałasu (aplikację), a dopiero później chcemy stworzyć układ ARH, który ten hałas obniży (więc dobieramy czujniki). Taki sposób wykorzystania poziomu mocy koherentnej będzie jednak użyteczny przy badaniu pola zastosowań danego przetwornika, na przykład przez jego producenta.



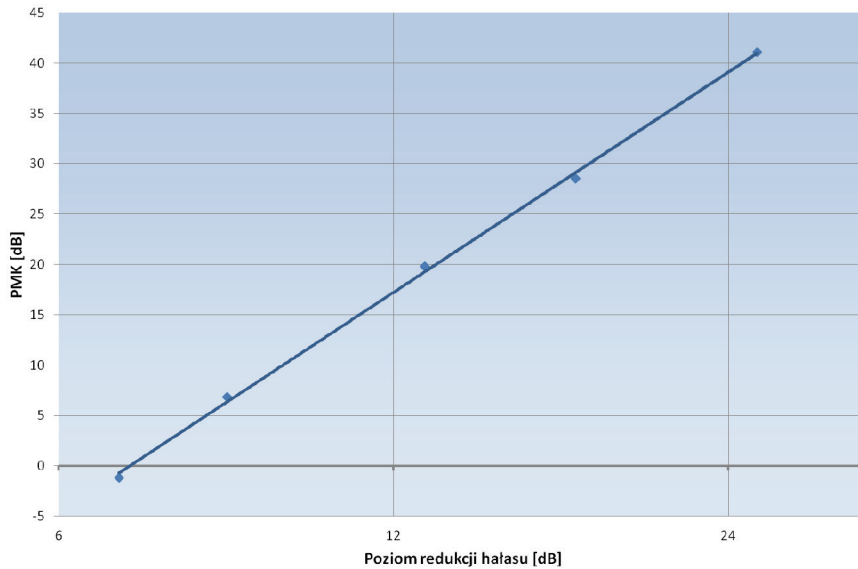
Rys. 8.9. Poziom mocy koherentnej przy wymuszeniu hałasem zarejestrowanym w kabinie samochodu (różne czujniki odniesienia)

Użyteczność zaproponowanej miary, potwierdzają badania przeprowadzone w komorze bezechovej. Dla różnych postaci hałasu i różnych konfiguracji w komorze mierzono wartości PMK i skuteczność uruchamianego układu aktywnej redukcji hałasu. Zestawienie wartości wskaźnika z poziomami uzyskanej redukcji hałasu daje informacje na temat jego użyteczności. W pierwszej serii badań przeanalizowano zależność zaproponowanej miary od użytego czujnika sygnału odniesienia. W komorze generowany był dźwięk silnika pracującego na postoju, zarejestrowany w kabinie Nissana Micry. Badania prowadzono wykorzystując jako źródło odniesienia kolejno mikrofon (dwie charakterystyki przenoszenia), akcelerometr umieszczony na obudowie głośnika i próbnik pobierający sygnał elektryczny bezpośrednio z generatora. Zarejestrowaną zależność między PMK a poziomami skuteczności, uzyskanymi pod kontrolą algorytmu FxLMS, przedstawiono na rys. 8.9. Relacja między obydwoma parametrami jest jednoznaczna – różnowartościowa. Wyraźnie widać trend wzrostowy wskaźnika PMK, dla zwiększającej się skuteczności układu ARH.



Rys. 8.10. Modyfikacja (pogorszenie) charakterystyki mikrofonu kierunkowego

Kolejny przykład (rys. 8.11) pokazuje relację między PMK a osiąganymi uruchomionego układu ARH, w przypadku gdy pierwotne źródło hałasu emituje ton prosty o częstotliwości 260 Hz. Źródłem odniesienia był mikrofon ustawiony w pobliżu źródła pierwotnego, a źródłem wtórnym głośnik. Wnętrze komory bezechovej w trakcie badań przedstawiono na rys. 8.12. Za powstanie krzywej odpowiedzialna jest zmiana charakterystyki mikrofonu, a dokładniej udziału szumu w sygnale użytecznym (SNR), rejestrowanym przez czujnik. Tak samo, jak w poprzednim przykładzie, dopiero zmiana skali rzędnych na logarytmiczną powoduje zlinearyzowanie wykresu.



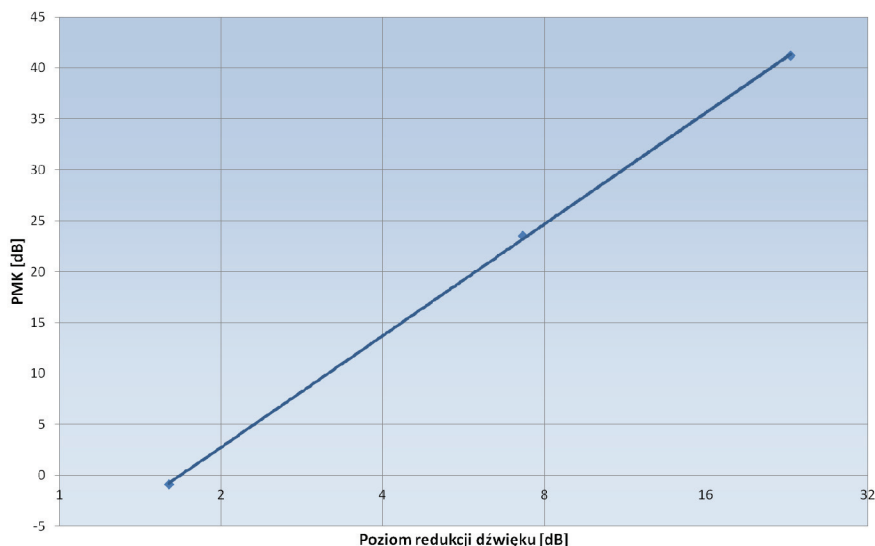
Rys. 8.11. Zmiana PMK i skuteczności układu ARH przy zmiennej sprawności czujnika odniesienia



Rys. 8.12. Ustawienie elementów układu ARH w komorze bezechowej

Podobna zależność wystąpiła, gdy czujnikiem odniesienia był akcelerometr (rys. 8.13). Przedstawione na wykresie różnice w funkcjonowaniu układu ARH, a przede wszystkim w poziomach uzyskiwanych redukcji, wynikają ze zmieniającej się postaci kompensowanego hałasu. Wartość wskaźnika PMK mierzonego przed

uruchomieniem układu ARH umożliwia oszacowanie skuteczności jego działania po włączeniu (a także wybrać najlepszą konfigurację układu ARH). W szczególności pozwala na porównanie źródeł odniesienia związanych z różnymi procesami fizycznymi generacji sygnału (pod warunkiem niezmienności sprzężenia zwrotnego).



Rys. 8.13. Poziom mocy koherentnej – ten sam czujnik, różne typy hałasu

Pozytywna weryfikacja w komorze bezechowej metody pośredniej wykorzystującej Poziomą Moc Koherentną kwalifikuje ją do wykorzystania przy wyborze źródła odniesienia w samochodzie. Tym razem badanym samochodem był docelowy obiekt wyciszany Ford Fusion (rys. 8.14). Najważniejsze parametry techniczne badanego pojazdu:

- Model: – Ford Fusion,
- Rok produkcji: – 2008,
- Typ nadwozia: – hatchback 5-drzwiowe,
- Silnik: – wolnossący benzyna, pojemność 1,388 l, rzędowy, 4-cylindrowy, 16-zaworowy, rozrząd napędzany łańcuchem,
- Moc silnika: – 80 KM (58 kW)/5800 obr/min,
- Skrzynia biegów: – manualna, 5-biegowa, napęd na koła przednie,
- Prędkość maksymalna: – 163 km/h,
- Maksymalna ilość pasażerów: 5,
- Przednie zawieszenie: – wahacz trójkątny, kolumna McPhersona,
- Tylnie zawieszenie: – belka skrętna,
- Opony: – letnie, 195/60R15, producent Continental,
- Inne: – nadwozie samochodu wykonane z blachy stalowej zgrzewanej punktowo, samonośne; zainstalowany system audio klasy high-end.



Rys. 8.14. Samochód Ford Fusion, poligon dla układu ARH

W celu przeprowadzenia zaplanowanych badań, w systemie LabVIEW SignalExpress został zaimplementowany algorytm, pozwalający na bieżąco w trakcie pomiarów wyznaczać PMK. Czujnik sygnału kompensowanego (mikrofon) umieszczono w miejscu wyciszonym – w okolicach głowy pasażera na tylnym siedzeniu, a czujnik odniesienia mocowano w różnych miejscach pojazdu. Po ustaleniu tych samych warunków pomiarów odczytywano wyniki.

W pierwszej kolejności przeanalizowano, jaki rodzaj czujnika sygnału odniesienia będzie najwłaściwszy. Ich wybór został zawężony do czujnika przyspieszeń drgań i ciśnienia akustycznego, czyli akcelerometru i mikrofonu. Pomiary wykonano w trakcie postoju, z uruchomionym silnikiem (przy prędkości obrotowej około 2000 obr./min). Akcelerometr umieszczany był na różnych elementach pojazdu (również w komorze silnika), natomiast mikrofon wyłącznie w kabinie pasażerskiej. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono w tab. 8.2.

Uzyskane rezultaty pokazują, że czujnik drgań jest równie skutecznym czujnikiem odniesienia jak mikrofon. Jeżeli ponadto uwzględnimy fakt, że czujnik akustyczny jest zawsze obciążony problemem sprzężenia zwrotnego, to może się okazać, że układ ARH z akcelerometrem będzie nawet skuteczniejszy od układu wykorzystującego mikrofon. Zupełnie nie sprawdził się mikrofon z kierunkową charakterystyką kątową – poziom mocy koherentnej był znacznie niższy w stosunku do pozostałych typów źródeł odniesienia. W związku należy uznać, że jako czujnik odniesienia w układzie aktywnej redukcji hałasu w kabinie samochodu osobowego powinien być używany akcelerometr. Z tego powodu kolejne analizy zostały zawężone wyłącznie do tego typu przetworników.

Tab. 8.2. Porównanie wybranych źródeł sygnału odniesienia: akustycznych i drganiowych

				
akcelerometr, boczna ściana komory silnika	akcelerometr, pas przedni samochodu	mikrofon, nad fotelem przednim	mikrofon kierunkowy, między przednimi fotelami	
PMK [dB]	20,5	22	19,8	-5,4

Pozostała kwestia wyboru położenia czujnika w samochodzie. Sprawdzono wiele konfiguracji i modeli czujników, a wykorzystanie PMK bardzo przyspieszyło pracę.

Tab. 8.3. Średni poziom mocy koherentnej w czasie jazdy w zależności od położenia akceleratoru

	Położenie czujnika	PMK [dB]
	szyba boczna prawa, przy lusterku	10
	maska silnika, od wewnątrz	9
	boczna ściana komory silnika	12
	prawy wspornik mocowania silnika	6
	pas przedni samochodu	12

Dane punktów, dla których otrzymano najwyższe wartości wskaźnika PMK (Poziomu Mocy Koherentnej) w czasie jazdy, zawarto w tab. 8.3. Okazało się, że wyniki uzyskane w Fordzie Fusion z wykorzystaniem PMK tylko nieznacznie różnią się od rezultatów osiągniętych z wykorzystaniem metody symulacyjnej w Toyocie Hiace, co dodatkowo uwiarygodnia przedstawione wnioski. Spośród wszystkich przebadanych miejsc najwyższy wskaźnik PMK uzyskał akcelerator, umieszczony

na ścianie bocznej komory silnika lub na wzmocnieniu pasa przedniego samochodu. Spośród tych dwóch miejsc preferowane jest pierwsze ze względu na nieznacznie lepsze wyniki przy większych prędkościach obrotowych silnika. Pod uwagę należy również brać akcelerometr umieszczony na szybie bocznej. Ten punkt wyraźnie wyróżniał się wśród źródeł wyselekcjonowanych według obydwu metodyk: bezpośredniej i pośredniej. Wybrane położenia czujnika posłużyły do dalszych badań układu aktywnej redukcji hałasu w kabinie Forda Fusion.

9. Badania układu aktywnej redukcji hałasu w samochodzie osobowym

Ostatecznym etapem wdrażania układu aktywnej redukcji hałasu są badania na obiekcie rzeczywistym. W celu ostatecznego potwierdzenia skuteczności układu wcześniej sprawdzonego w badaniach symulacyjnych i przebadanego w komorze bezechowej został on zainstalowany w samochodzie Ford Fusion. Badania przeprowadzono w dwóch wariantach. W pierwszym do wytworzenia strefy ciszy wokół głowy pasażera na jednym z miejsc, zastosowano specjalizowany głośnik basowy, wykorzystywany wcześniej w komorze bezechowej. W drugim wariancie fabryczne głośniki przednie samochodu zostały wymienione na wysokiej jakości system dwudrożny. Głośnik wysokotonowy został zamontowany pod przednią szybą w prawym narożniku, natomiast niskotonowy w miejscu fabrycznego głośnika, w drzwiach. W tylnych drzwiach znalazły się eliptyczne wielodrożne głośniki współosiowe. Do ich zasilania użyto wzmacniacza samochodowego klasy high-end firmy DLS.

Do badań wybrano samochód z już fabrycznie wyciszonym wnętrzem metodami pasywnymi. Aby sprawdzić stan wyjściowy środowiska akustycznego w kabinie testowego samochodu, zmierzono poziom hałasu, zgodnie z zaleceniami Polskiej Normy PN-92/S-04052 [100], która jest odpowiednikiem ISO 5128:1980 [93]. Okazało się, że w Fordzie Fusion poziom hałasu w czasie jazdy był mniejszy w porównaniu z najcichszym z przebadanych wcześniej pojazdów – Nissanem Micrą K12. Konstruktorzy tego modelu Forda położyli bowiem szczególny nacisk na zmniejszenie hałasu pracującego silnika, oddziałującego na pasażerów, co odzwierciedlały zarejestrowane widma.

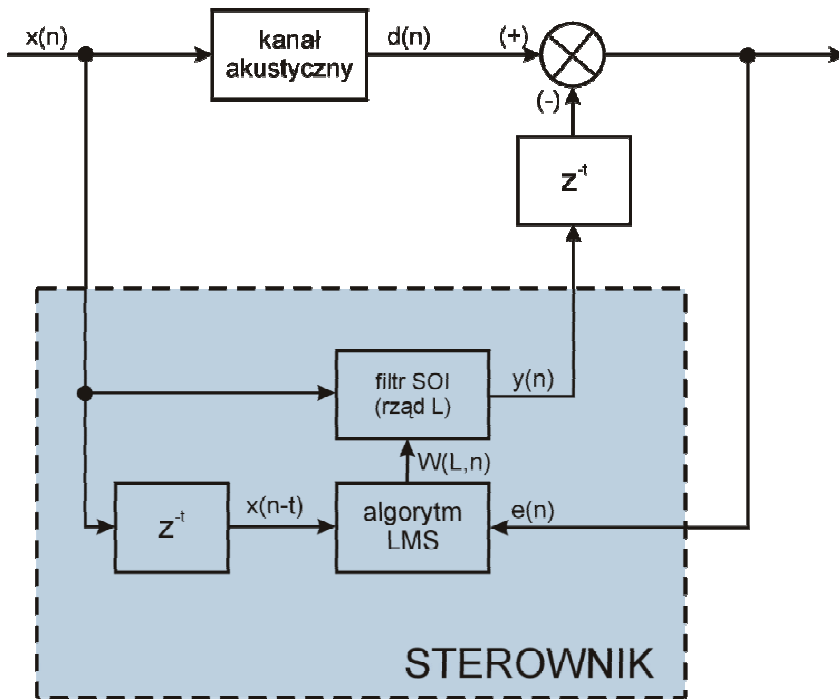
Testowany egzemplarz samochodu napędzany był rzędowym silnikiem benzynowym o pojemności 1,4 l. To sprawiało, że już przy stosunkowo niewielkich prędkościach dominował hałas generowany przez toczące się koła i opływ powietrza. Dopiero przy prędkościach autostradowych znowu było wyraźnie słychać pracę silnika. W kabinie Forda Fusion poziom dźwięku A, zmierzony zgodnie z zaleceniami normy, wynosił 67,6 dB. Tak niski poziom hałasu stawia ten model w czołowie najcichszych pojazdów w swojej klasie.

Na poligon badawczy wybrano dwupasmową, dwujezdniową trasę S8 (Warszawa-Białystok), na odcinku między Radzyminem i Wyszkowem. Mimo że szosa miała asfaltową nawierzchnię w dobrym stanie technicznym, a badania przeprowadzono w porach o małym natężeniu ruchu, uzyskanie powtarzalnych rejestracji hałasu w regularnym ruchu drogowym nie było łatwe.

W pierwszym wariancie badań źródłem wtórnym był specjalnie zbudowany głośnik o dużej objętości obudowy, wykorzystujący przetwornik basowy 12w0-4 firmy JL Audio. Głośnik ten umieszczono na prawym przednim siedzeniu i skierowano w stronę tyłu pojazdu. Ponieważ zadaniem układu ARH było wytworzenie strefy ciszy wokół głowy pasażera, mikrofon błędu zamocowano na zagłówku oparcia tylnego siedzenia. Równolegle do przetwornika sygnału błędu, w odległości kilku centymetrów, umieszczono drugi taki sam mikrofon, który mierzył poziom dźwięku A. Jest oczywiste, że głowa, a przede wszystkim uszy nie mogą być w tym

samym miejscu, co przetwornik błędu. Dlatego odbiorca nie może znajdować się dokładnie w centrum strefy ciszy. Z tego powodu, aby zmierzyć rzeczywisty poziom hałasu oddziałujący na pasażera, użyto dodatkowego mikrofonu, umieszczając go tam, gdzie głowa znajdowałaby się w rzeczywistości.

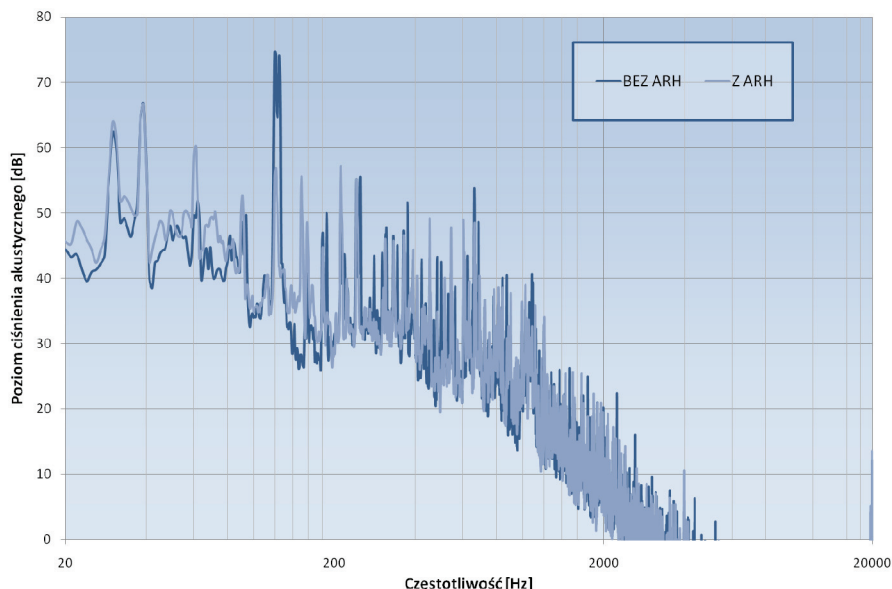
Struktura systemu aktywnej redukcji hałasu zastosowanego w samochodzie była identyczna jak struktura układu przebadanego wcześniej w komorze bezechowej (schemat na rys. 9.1). Sercem układu był sterownik oparty na układzie FPGA, wykorzystujący komponenty firmy National Instruments. Platforma ta została przetestowana w badaniach w komorze bezechowej (por. rozdział 5). Wszystkie sygnały wchodzące i wychodzące ze sterownika były kondycjonowane we wzmacniaczu pomiarowym NEXUS firmy Brüel&Kjær. Dzięki temu można było wykorzystać pełny zakres pomiarowy przetworników A/C i C/A sterownika.



Rys. 9.1. Schemat układu aktywnej redukcji hałasu zastosowanego w samochodzie

W pierwszym etapie badań uruchomiono układ ARH dla rzeczywistego hałasu silnika, ale jeszcze na postoju, a więc bez oddziaływania pozostałych składowych hałasu związanych z jazdą. Prędkość obrotową pracującego silnika ustalono na około 3600 obr./min. Jako przetwornika źródła sygnału odniesienia użyto akcelerometra, który umieszczono w jednym z najlepszych miejsc wyselekcjonowanych we wcześniejszych badaniach (por. rozdział 8). Natomiast specjalny głośnik basowy zamontowano na złożonym prawym przednim siedzeniu. Układ ARH miał wytworzyć strefę ciszy wokół głowy pasażera siedzącego z tyłu po lewej stronie. W tym

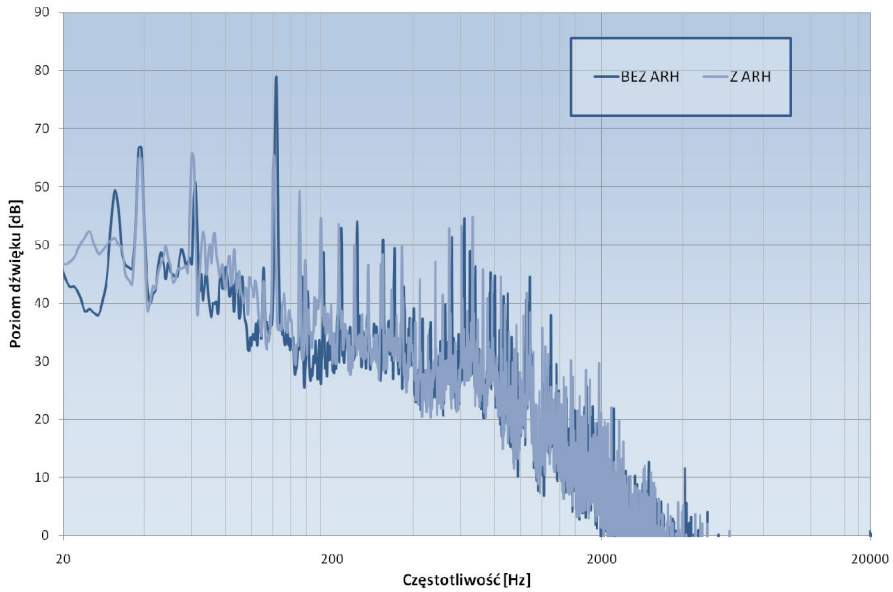
celu sterownik został skonfigurowany w ten sam sposób, co w badaniach w komorze. Przykładowe widmo zarejestrowanego poziomu dźwięku przedstawia rys. 9.2.



Rys. 9.2. Skuteczność układu ARH kompensującego hałas pracującego silnika samochodu na postoju z wykorzystaniem specjalnego głośnika basowego, odniesieniem jest sygnał drgań bocznej ściany komory silnika

Na rys. 9.3 przedstawiono kolejny przykład rezultatów działania zainstalowanego układu ARH. Od poprzedniego eksperymentu różni się on położeniem przetwornika odniesienia – akcelerometr był zamontowany na szybie obok lusterka wstecznego. W tym przypadku okazało się, że układ osiąga lepsze rezultaty, gdy we wzmacniaczu pomiarowym na wejściu sygnału błędu ustawiony jest filtr dolnoprzepustowy o łagodnym nachyleniu zbocza, z częstotliwością graniczną wynoszącą 100 Hz. Takie ustawienie wzmacniacza oznaczało zwiększenie opóźnienia, co zostało poprawnie wykryte przez algorytm detekcji długości ścieżki wtórnej – zmierzona wartość wyniosła 275 próbek dla częstotliwości zegara wynoszącej 50 kHz. Test ten udowodnił, że zaproponowany układ ARH jest skuteczny również przy włączonym wentylatorze systemu przewietrzania wnętrza. Poziom ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A obniżył się o 4,5 dB (8,5 dB dla skali liniowej), do wartości poniżej 60 dB.

Ostatnia testowana konfiguracja układu aktywnej redukcji hałasu skutecznie minimalizowała hałas pracującego silnika, ale nie jest optymalnym rozwiązaniem do stosowania w samochodzie ze względu na spore gabaryty i masę dodatkowego, specjalnego głośnika, zamontowanego w kabinie. Pomimo jego niewątpliwych zalet elektroakustycznych (ważnych z punktu widzenia wykorzystania w układzie ARH), lepszym rozwiązaniem byłyby ustroje zintegrowane z nadwoziem.

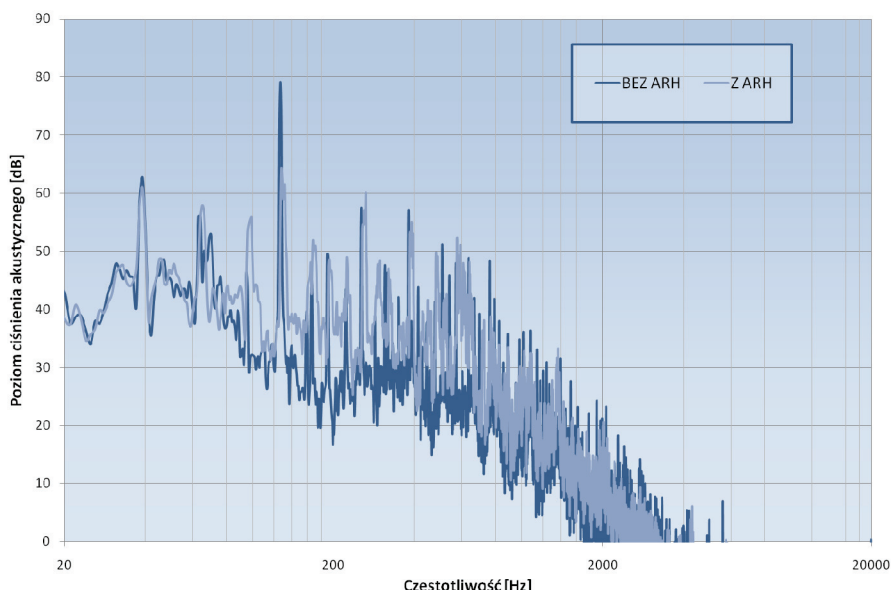


Rys. 9.3. Skuteczność układu ARH kompensującego hałas pracującego silnika samochodu na postoju i wykorzystującego specjalny głośnik basowy, odniesieniem jest sygnał drgań bocznej szyby



Rys. 9.4. Położenie czujnika drgań pełniącego funkcję źródła odniesienia w komorze silnika Forda Fusion

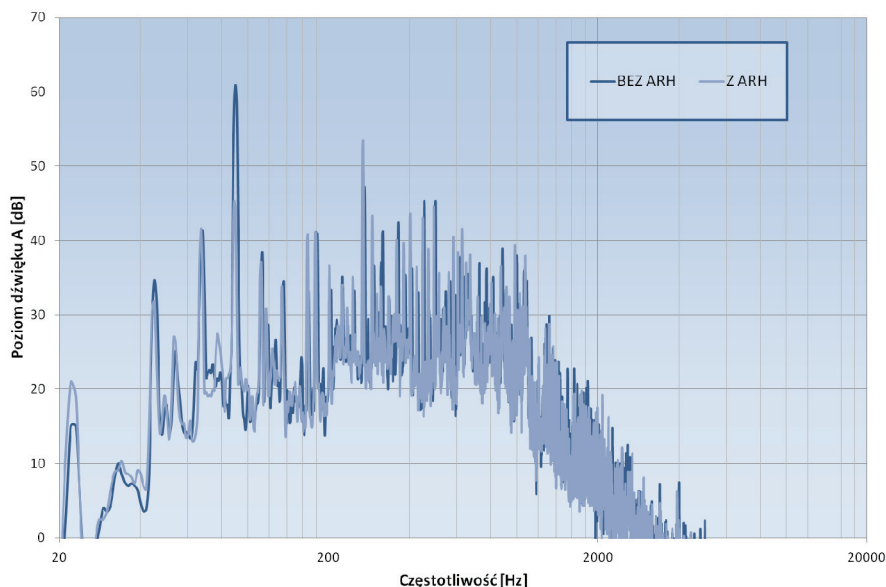
W drugim wariancie badań układ aktywnej redukcji hałasu wykorzystywał głośniki zamontowane w miejscach fabrycznie dla nich przeznaczonych. W pierwszej kolejności powtórzono serię badań działania układu ARH na postoju. Podobnie jak poprzednio, silnik samochodu pracował z prędkością 3800 obr./min. Źródło sygnału odniesienia stanowił akcelerometr, umieszczony na ścianie bocznej komory silnika (rys. 9.4). Natomiast strefa ciszy była tworzona wokół miejsca, gdzie znajduje się głowa pasażera. Jako źródła wtórne użyto głośnika zamontowanego w prawych przednich drzwiach. Ze względu na sporą odległość dzielącą ten głośnik od miejsca aktywnej kompensacji, w układzie ARH występowało spore opóźnienie. Mimo to poziom dźwięku w okolicy mikrofonu błędu obniżył się o 5,3 dB (2 dB dla poziomu skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A). Po przeanalizowaniu wyników w dziedzinie częstotliwości (rys. 9.5) i osiągniętej ogólnej skuteczności, okazało się, że głośniki zainstalowane w miejscach fabrycznych spełniają swe zadanie, jednak nie są tak skuteczne jak głośnik specjalny.



Rys. 9.5. Skuteczność układu ARH kompensującego hałas pracującego na postoju silnika samochodu przez układ ARH, z wykorzystaniem głośnika zainstalowanego w przednich drzwiach

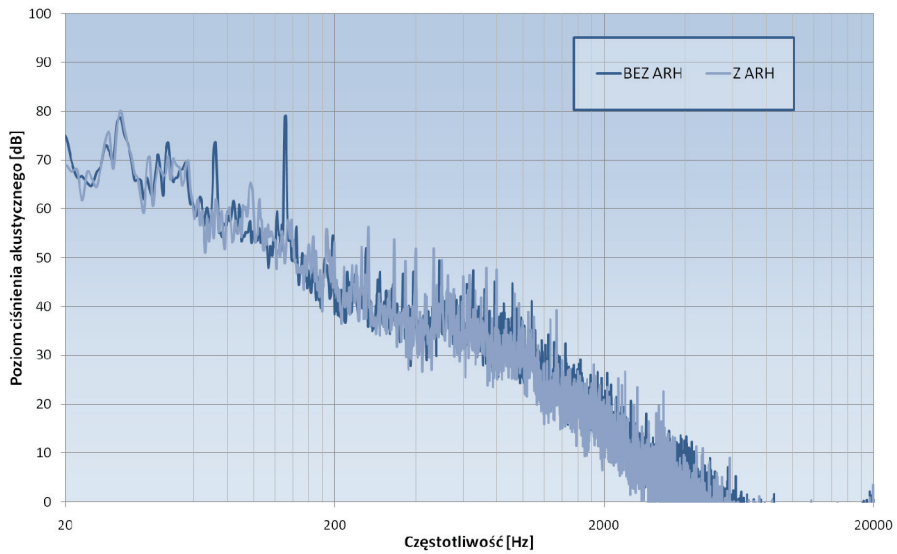
W kolejnych badaniach podjęto próbę minimalizacji opóźnienia w ścieżce wtórnej. W związku z tym zamiast głośnika przedniego używany był ten znajdujący się w tylnych prawych drzwiach. Uwzględniając ustawione filtry we wzmacniaczu, opóźnienie w ścieżce wtórnej i błędu udało się zminimalizować do 361 próbek. Rozkład osiągniętych poziomów ciśnienia akustycznego w dziedzinie częstotliwości, dla sygnału odniesienia rejestrowanego na szybie bocznej, prezentuje rys. 9.6. Przedstawione wartości są skorygowane skalą A, dzięki czemu można ocenić sku-

teczność układu z uwzględnieniem percepcji ucha ludzkiego. Wprowadzone zmiany przyniosły skutek zbieżny z wnioskami wyciągniętymi w badaniach komorowych – przede wszystkim poprawiła się redukcja (a właściwie brak wzmocnienia) podstawy szumowej.



Rys. 9.6. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego po minimalizacji hałasu pracującego na postoju silnika samochodu przez układ ARH, z wykorzystaniem głośnika zainstalowanego w tylnych drzwiach

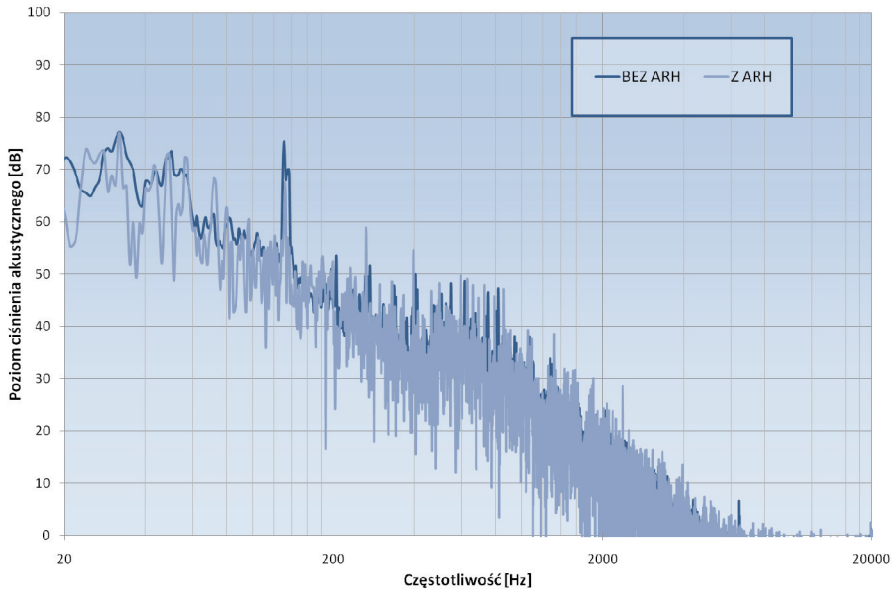
Po ustaleniu w trakcie pracy na postoju optymalnej kompozycji układu ARH, przeprowadzono najważniejszy test – weryfikację jego pracy w trakcie jazdy. Widmo poziomu ciśnienia akustycznego zarejestrowanego w czasie jazdy z prędkością 58 km/h przedstawiono na rys. 9.7. Źródłem wtórnym był głośnik znajdujący się w prawych tylnych drzwiach. Jako przetwornik odniesienia posłużył akcelerometr mierzący drgania bocznej ściany komory silnika – miejsca wyznaczonego we wcześniejszych analizach. Hałas rejestrowany był w okolicy miejsca, gdzie znajduje się głowa prawego pasażera z tyłu. Zmierzony w tym miejscu poziom dźwięku A przy wyłączonym układzie ARH wyniósł 67,3 dB. Włączenie układu spowodowało całkowitą redukcję dyskretnych składowych harmonicznych. Całkowity poziom dźwięku zmniejszył się o 3,3 dB. Subiektywnie dźwięk docierający do uszu pasażera wydawał się być „łżejszy” – bez dudnienia niskich tonów. Zauważalne jednak było nieznaczne zwiększenie szumu, za co odpowiedzialne jest, widoczne na wykresie, podniesienie podstawy szumowej. Sterownik działał pod kontrolą algorytmu Opóźniony NLMS (uwzględniono transmitancję ścieżki wtórnej), gdzie filtr SOI miał rząd $L = 512$, a krok adaptacji wynosił $\mu = 0,001$.



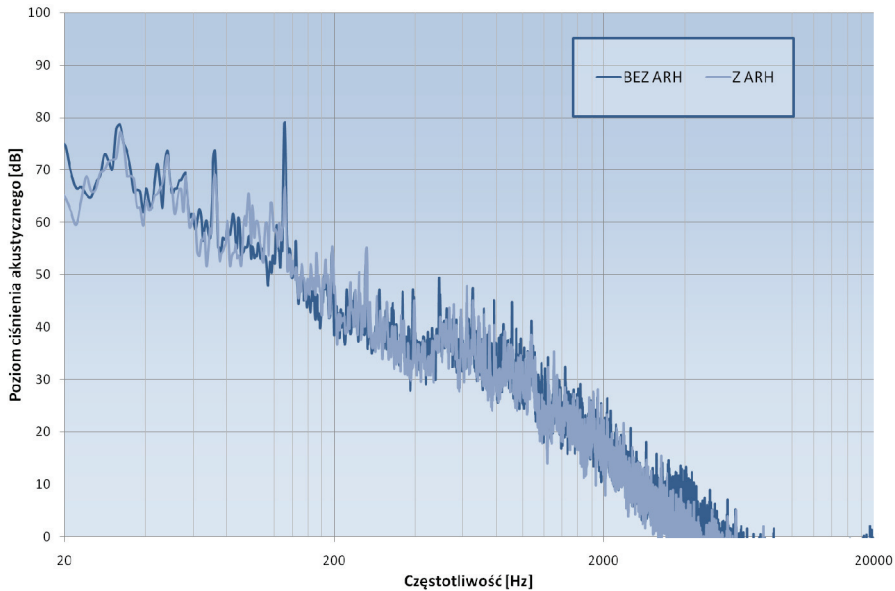
Rys. 9.7. Skuteczność systemu aktywnej redukcji hałasu w kabinie Forda Fusion w czasie jazdy (4000 obr./min, sygnał odniesienia: drgania ściany komora silnika)



Rys. 9.8. Akcelrometr zamontowany na szybie przy lusterku bocznym samochodu Ford Fusion – źródło sygnału odniesienia dla układu ARH



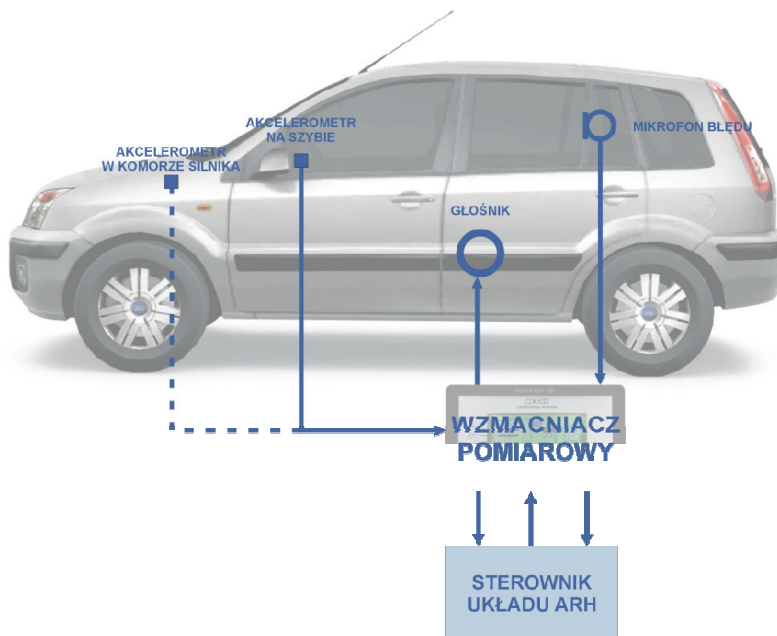
Rys. 9.9. Przykład skuteczności aktywnej redukcji hałasu w kabinie samochodu osobowego w czasie jazdy, sygnał odniesienia: drgania bocznej szyby pojazdu



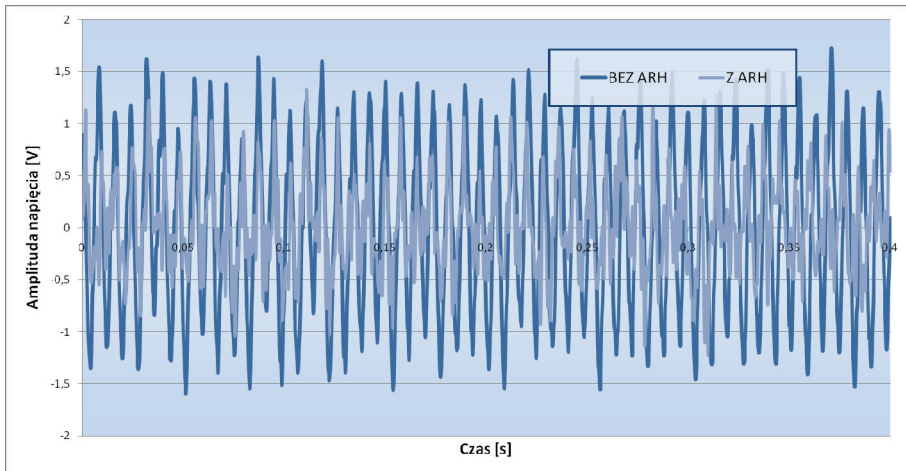
Rys. 9.10. Przykład skuteczności aktywnej redukcji hałasu w kabinie samochodu osobowego w czasie jazdy, sygnał odniesienia: drgania bocznej szyby pojazdu (inne warunki zewnętrznego hałasu niż na rys. 9.9)

Lepsze rezultaty układ ARH osiągnął, gdy przetwornik odniesienia był zainstalowany na bocznej szybie (rys. 9.8). Miało to odzwierciedlenie zarówno w rozkładzie widma (rys. 9.9 i 9.10), jak i w obniżonym ogólnym poziomie dźwięku. Obydwa rysunki przedstawiają działanie układu ARH, zarejestrowane w tych samych warunkach, co poprzedni test. W kabinie samochodu jadącego na drugim biegu z silnikiem pracującym z prędkością 4000 obrotów na minutę, przy włączonym układzie ARH poziom dźwięku A obniżał się do 64 dB, co przekładało się na redukcję hałasu o 6,7 dB. Działo się tak, gdy algorytm sterujący (Opóźniony NLMS) uaktualniał 512 współczynników filtra SOI z krokiem $\mu = 0,005$. Odległość źródła wtórnego od mikrofonu błędu i filtrację ustawione w torach pomiarowych (wliczając w to estymatę ścieżki wtórnej) spowodowały, że opóźnienie wynosiło aż 361 próbek dla częstotliwości próbkowania 50 kHz. Odpowiada to teoretycznej odległości około 2,4 m. Schemat układu ARH zastosowanego w samochodzie przedstawia rys. 9.11.

Przebieg czasowy sygnału błędu rejestrowanego przez sterownik układu ARH przedstawiono na rys. 9.12. Został on zarejestrowany w kabinie stojącego samochodu z włączonym silnikiem. Ciemniejszym kolorem zaznaczono przebieg sygnału niekompensowanego w żaden sposób. Fale dźwiękową zapisaną po włączeniu układu ARH przedstawia jaśniejsza linia. Jako źródło wtórne sterownik wykorzystywał głośnik zamontowany w fabrycznie przeznaczonym do tego miejscu – w prawych przednich drzwiach. Przetwornik błędu znajdował się nad tylnym siedzeniem, na wysokości, na jakiej znajduje się głowa pasażera. Sterownik działał pod kontrolą Opóźnionego NLMS (opóźnienie wynosiło 326 próbek) ze współczynnikiem korekcji wynoszącym $\mu = 1 \cdot 10^{-5}$.

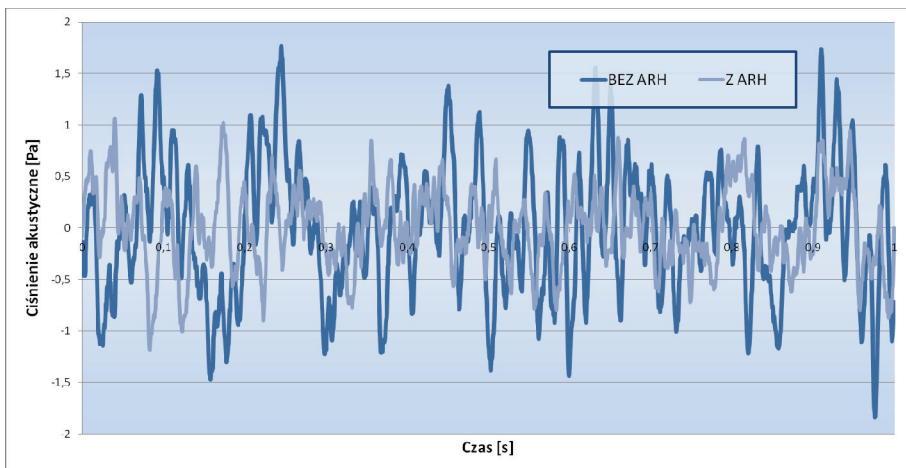


Rys. 9.11. Schemat blokowy układu aktywnej redukcji hałasu zastosowanego w Fordzie Fusion



Rys. 9.12. Przykład przebiegu sygnału błędów dla włączonego (kolor jasny) i wyłącznego (kolor ciemny) układu ARH, kompensującego hałas silnika

Ostatni wykres (rysunek 9.13) przedstawia hałas nad tylnym siedzeniem samochodu w czasie jazdy po drodze asfaltowej. Został on zarejestrowany przy prędkości ok. 60 km/h mikrofonem umieszczonym w pobliżu przetwornika błędów układu ARH. Włączony układ (przebieg o mniejszej amplitudzie na wykresie) pracował z częstotliwością 50 kHz, uaktualniając z krokiem $\mu = 0,005$, 512 wag filtra SOI zgodnie z Opóźnionym NLMS.



Rys. 9.13. Przykład przebiegu czasowego hałasu zarejestrowanego w miejscu, gdzie znajduje się głowa pasażera, w czasie jazdy przy włączonym i wyłącznym układzie ARH

W przeprowadzonym eksperymencie układ ARH miał postawione trudne zadanie – redukcję poziomu ciśnienia akustycznego w kabinie nowoczesnego, dobrze

wyciszonego samochodu, wyposażonego w silnik benzynowy. Dodatkowo ten model charakteryzuje się poziomem komfortu akustycznego zdecydowanie przekraczającym średnią dla tej klasy pojazdów. Uzyskana kompensacja hałasu oddziałującego na pasażera, w różnych wariantach układu ARH, przedstawiona została w tab. 9.1. Skoro testowany układ ARH zadziałał w takich warunkach, to można się spodziewać, że w prostszej sytuacji osiągnąłby jeszcze wyższą skuteczność, na przykład w samochodzie napędzanym silnikiem wysokoprężnym. Diesel pracuje znacznie głośniej, a składowa odpowiadająca częstotliwości spalania jeszcze bardziej dominuje nad podstawą szumową. Lepiej powinien się również spisać w samochodzie pozbawionym materiałów wygłuszających, na przykład w dostawczym vanie. Pomimo wyższego wyjściowego poziomu dźwięku, komfort akustyczny (mierzony w skali bezwzględnej) uzyskany po zastosowaniu układu aktywnej redukcji hałasu, powinien być podobny do uzyskanego w Fordzie Fusion.

Tab. 9.1. Wyniki kompensacji hałasu w samochodzie Ford Fusion dla różnych wariantów układu ARH

SKUTECZNOŚĆ UKŁADU ARH [dB]		GŁOŚNIK W SPECJALNEJ OBUDOWIE		GŁOŚNIK W DRZWIACH TYLNYCH	
		NA POSTOJU	W CZASIE JAZDY	NA POSTOJU	W CZASIE JAZDY
AKCELEROMETR W KOMORZE SILNIKA	BEZ KOREKCJI	6,4	4,8	5,3	4,5
	SKORYGOWANA CHARAKTE. CZĘSTOTLIWOŚCIOWĄ A	4,3	2,4	2,0	1,0
AKCELEROMETR NA BOCZNEJ SZYBIE	BEZ KOREKCJI	8,5	3,3	7,7	6,7
	SKORYGOWANA CHARAKTE. CZĘSTOTLIWOŚCIOWĄ A	4,5	-0,9	3,7	3,2

Testy przeprowadzone w kabinie samochodu Forda Fusion potwierdziły wyniki wcześniejszych badań laboratoryjnych i w komorze bezechowej. Zastosowany układ ARH poprawił komfort akustyczny pasażerów samochodu zarówno wtedy, gdy jest on w ruchu, jak i w czasie postoju. Osiągnięcie zaś podobnych wartości redukcji poziomu hałasu metodami pasywnymi wymagałoby dołożenia konwencjonalnych materiałów tłumiąco-absorbujących o masie około 30 kg.

10. Podsumowanie

W pracy opisano metodykę wdrażania układu ARH w samochodzie i przedstawiono narzędzia pozwalające na prowadzenie badań eksperymentalnych na każdym etapie jego uruchamiania. Należy podkreślić, że przedstawione rozwiązania (między innymi model symulacyjny układu ARH) mogą okazać się również pomocne przy rozwijaniu układów aktywnej redukcji hałasu dla innych systemów technicznych (nie tylko w samochodzie).

W zaprezentowanych badaniach konsekwentnie stosowano szerokopasmową analizę spadku oddziaływania hałasu na człowieka, opartą na pomiarze ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową A. Wyniki zaś eksperymentów przedstawiono dość obszernie, aby można było je porównywać z dotychczasowymi i przyszłymi dokonaniem innych badaczy. Uzyskane rezultaty działania układu ARH w samochodzie, wydają się być bardziej niż zadowalające, do czego w dużej mierze przyczynił się optymalny wybór czujnika odniesienia. W procesie wyboru wykorzystano zaproponowaną miarę nazwaną Poziomem Mocy Koherentnej. Dzięki jej prostocie obliczeniowej, można było szybko zaimplementować ją w stosowanych już narzędziach pomiarowych i wykorzystywać w trakcie badań. Przeprowadzone badania weryfikacyjne wykazały przydatność tej miary we wdrażaniu aktywnej redukcji hałasu w samochodzie.

Zaprezentowane w ostatnim rozdziale rezultaty eksperymentów dowodzą, że możliwe jest wykorzystanie układu ARH do kompensacji hałasu szerokopasmowego w aplikacjach wymagających umieszczenia źródła wtórnego w dużej odległości od miejsca wyciszanego. Ponadto, ustroje akustyczne, niezbędne do wytworzenia kompensującej fali dźwiękowej, można zmniejszyć i umieścić tak, że nie będą one uciążliwe dla pasażerów. Potwierdzają to efekty zastosowania specjalnych głośników zabudowanych w oryginalnych miejscach montażowych, dla których układ ARH uzyskiwał niewiele gorsze rezultaty w porównaniu z dużym głośnikiem.

Przed rozpoczęciem badań założono stosowanie najbardziej popularnych algorytmów sterujących, wykorzystujących do generowania sygnału kompensującego filtry nierekursywne. W przyszłości należałoby także rozważyć stosowanie innych metod uzyskiwania tego sygnału. Obserwując próby przedstawiane w publikacjach naukowych, najbardziej rokujące wydają się algorytmy, opierające się na nieliniowych sieciach neuronowych czy algorytmach genetycznych. Należy się jednak spodziewać, że dzięki stałemu wzrostowi prędkości przetwarzania procesorów i nowatorskim rozwiązaniom technologicznym w dziedzinie elektroniki (np. układy FPGA) [89], aplikacja nowych algorytmów w niedługim czasie wyjdzie poza obszar teoretyczny.

Obiecujące są również badania zmierzające do odsunięcia czujnika sygnału błędu od głowy człowieka. Do tej pory punkt największej skuteczności układu ARH znajdował się w miejscu umieszczenia czujnika. W związku z tym dążono do tego, aby był on umieszczony jak najbliżej uszu pasażera lub kierowcy, co z oczywistych względów było trudne. Problem ten rozwiązuje technika tzw. wir-

tualnego mikrofonu [62, 61]. Pozwala ona bowiem wyznaczać przebieg ciśnienia akustycznego w dowolnym miejscu przestrzeni na podstawie sygnału zarejestrowanego z jednego lub więcej mikrofonów, umieszczonych wokół tego punktu. W kabinie samochodu przetworniki mogłyby zostać zainstalowane w zagłówkach, dzięki czemu znajdowałyby się relatywnie blisko punktu obniżonego ciśnienia akustycznego.

Często podnoszoną wadą ograniczania wpływu hałasu na człowieka z wykorzystaniem aktywnych metod kompensacji dźwięku jest to, że przestrzeń obniżonego ciśnienia akustycznego jest relatywnie mała. Z tego powodu każde poruszenie się osoby znajdującej się w centrum tego obszaru prowadzi do zauważalnego spadku komfortu dźwiękowego. Paradoksalnie, im lepszy był układ ARH, tym problem stawał się poważniejszy, ponieważ im wyższa jest częstotliwość pracy układu, tym mniejszy jest obszar obniżonego hałasu. Jednakże obecnie, w wyniku postępu w technologiach śledzenia ruchu, problem ten wydaje się być rozwiązany. Zastosowanie bowiem najnowszych osiągnięć z tej dziedziny w systemie aktywnej redukcji hałasu pozwala śledzić ruchy głowy osoby siedzącej w samochodzie, dzięki czemu można zawsze lokować wokół niej sferę zmniejszonego oddziaływania. Na uwagę zasługują zwłaszcza dwie metody. Pierwsza używana jest w systemach bezpieczeństwa biernego w samochodzie do regulowania stopnia napełnienia poduszek powietrznych w razie wypadku. Chodzi o czujniki nacisku, zamontowane w siedzeniach samochodu, pozwalające na określenie ułożenia sylwetki kierowcy czy pasażera. Informacje przekazywane z tych czujników pozwalają wyznaczyć położenie głowy osoby w płaszczyźnie poziomej.

Znacznie ciekawsze jest dostępne już na zasadach komercyjnych rozwiązanie skanera przestrzeni 3D. Firma Microsoft stworzyła sensor o nazwie Kinect, którego głównym zadaniem jest zdalne śledzenie ruchów człowieka tak, aby mógł on sterować grami komputerowymi wyłącznie za pomocą gestykulacji. Jest to gotowe już narzędzie, którego oprogramowanie pozwala wyznaczać dokładne usytuowanie głowy więcej niż jednego człowieka. Połączenie tego narzędzia z technologią wirtualnego mikrofonu w kontekście aktywnej redukcji hałasu znosi ostatnie bariery blokujące szerokie ich wykorzystanie w naszych samochodach.

11. Bibliografia

1. Adamczewski P., *Słownik informatyczny*, HELION, Gliwice 2005.
2. Airaksinen T., Heikkola E., Toivanen J., *Active noise control in a stochastic domain based on a finite element model*, Reports of the Department of Mathematical Information Technology. Series B. Scientific Computing, University of Jyväskylä, 2009.
3. Bendat J.S., Piersol A.G., *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*, PWN, Warszawa 1976.
4. Bies D.A., Hansen C.H., *Engineering Noise Control: Theory and Practice*, Spon Press, London, New York 2003.
5. Bjarnson E., *Noise cancellation using a modified form of filtered-X LMS algorithm*, Proceedings of EUSIPCO Signal Processing V, Brussels 1992.
6. Boonen R., Sas P., *Development of an active exhaust silencer for internal combustion engines*, ISMA23 International Conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven: September 1998.
7. Boucher C.C., Elliott S.J., Nelson P.A., *Effect of errors in the plant model on the performance of algorithms for adaptive feedforward control*, IEE Proceedings, Vol. 138, No. 4, August 1991, 313–319.
8. Cappellino A., Cerrato G., *An experimental application of active control of exhaust noise on a passengers car*, 2nd International Conference VEHICLE COMFORT ergonomic, vibrational, noise and thermal aspects, Vol. 2, Bologna October 1992.
9. Dąbrowski Z., Stankiewicz B., *Active noise control system in passenger car*, Proceedings ICSV13, Wien 2006.
10. Elliott S.J., *A Review of Active Noise and Vibration Control in Road*, ISVR Technical Memorandum No. 981, Institute of Sound and Vibration Research, Southampton 2008.
11. Elliott S.J., *Down with noise: Practical control systems for combatting audible noise show up in aerospace, general aviation, and military roles*, “IEEE Spectrum”, 54–61, June 1999.
12. Elliott S.J., Cook J.G., *A Preconditioned LMS Algorithm for Rapid Adaptation of Feedforward Controllers*, Proceedings of ICASSP '00, Istanbul: 2000, 845–848.
13. Elliott S.J., Darlington P., *Adaptive Cancellation of Periodic, Synchronously Sampled Interference*, “IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing”, Vol. 33, No. 3, June 1985.
14. Elliott S.J., Darlington P., *Synchronous Adaptive Filters With Delayed Coefficient Adaption*, International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, New York 1988, 2586–2589.
15. Elliott S.J., Nelson P.A., *Active Noise Control: Low-frequency techniques for suppressing acoustic noise leap forward with signal processing*, “IEEE Signal Processing Magazine”, October 1993, 12–35.

16. Elliott S.J., Nelson P.A., *Multichannel Active Sound Control Using Adaptive Filtering*, International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, New York 1988, 2590–2593.
17. Elliott S.J., Nelson P.A., *The active control of sound*, “Electronics & Communication Engineering Journal”, Aug. 1990.
18. Elliott S.J., Nelson P.A., Stothers I.M., *A Multiple Error LMS Algorithm and Its Application to the Active Control of Sound and Vibration*, “IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing”, Vol. 35, No. 10, October 1987, 1423–1434.
19. Engel Z., *Aktywne metody redukcji drgań i hałasu (rys. historyczny, zadania, problemy)*. I Szkoła: Metody aktywne redukcji drgań i hałasu, Rabka 1993, 5–18, Materiały konferencyjne.
20. Engel Z., *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, PWN, Warszawa 2001.
21. Engel Z., Kowal J., *Sterowanie procesami wibroakustycznymi*, Wydawnictwo AGH, Kraków 1995.
22. Engel Z., Makarewicz G., Morzyński L., Zawieska W.M., *Metody aktywne redukcji hałasu*, CIOP-PIB, Warszawa 2001.
23. Ferraiuolo S., Rusciano N., Viscardi M., Ladevaia M., *Noise from traction Equipment and running gear*, Report on acoustic modeling analysis and reduction potentials, European Commission DG Research, Neapol 2007.
24. Fujii K., Yamaguchi K., Hashimoto S., Fujita Y., Muneyasu M., *Verification of simultaneous equations method by an experimental active noise control system*, “Acoustical Science and Technology”, No. 27, May 2006, 270–277.
25. George A.R., *Automobile aerodynamic noise*, SAE Paper, No. 900315, February 1990.
26. Górski P., Zawieska W.M., *System aktywnej redukcji hałasu o przebiegu okresowym*, „Bezpieczeństwo pracy”, No. 9(374), wrzesień 2002, 5–6.
27. Hashemian R., *Design of an Active Noise Control System Using Combinations of DSP and FPGAs*, PLD Conference Proceedings, Washington 1995.
28. Jalali A., Boroujeny Sh.G., Eshghi M., *Design and Implementation of a Fast Active Noise Control System on FPGA*, Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control & Automation, Athens 2007.
29. Kaczorek T., *Teoria sterowania i systemów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
30. Kataja J., Antila M., *Selection of Active Noise Control Strategy: Two Test Cases*, Proceedings of Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting, Mariehamn 2004.
31. Kaymak E., Atherton M., Rotter K., Millar B., *Active noise control at high frequencies*, Proceedings of ICSV13, Vienna 2–6 July 2006.
32. Kestell C.D., Hansen C.H., *An Overview of Active Noise Control*, “Safety Science Monitor”, Vol. 3, 1999.
33. Kim H.S., Na H.S., Kim K.J., Park Y., *Constraint filtered-X and filtered-U least-mean-square algorithm for the active control of noise in ducts*, “Journal of the Acoustical Society of America”, Vol. 95, 1994, 3379–3389.

34. Klekot G., Stankiewicz B., *Badanie wpływu modyfikacji konstrukcji zawieszenia zespołu napędowego na hałas w kabinie nietypowego pojazdu*, XXIII Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn, Rzeszów-Przemysł 2007.
35. Kowal J., *Adaptacyjne sterowanie procesów wibroakustycznych*, I Szkoła: Metody aktywne redukcji drgań i hałasu, Rabka 1993, 66–81, Materiały konferencyjne.
36. Kowal J., *Sterowanie drganiami*. Wydawnictwo Gutenberg, Kraków 1996.
37. Kuo S.M., Gan W.S., *Active Noise Control Systems with Optimized Secondary Path*, IEEE Conference on Control Applications, Taipei 2004.
38. Kuo S.M., Gan W.S., *Hybrid Adaptive Active Noise Control System*, Proceedings of 8th ICSV, Hong Kong: 2001.
39. Kuo S.M., Kong X., Gan W.S., *Applications of Adaptive Feedback Active Noise Control System*, "IEEE Transactions on Control Systems Technology", Vol. 11, No. 2, March 2003.
40. Kuo S.M., Morgan D.R., *Active Noise Control Systems: Algorithms And DSP Implementations*. Hoboken, United States: John Wiley and Sons Ltd, 1996.
41. Kuo S.M., Morgan D.R., *Active Noise Control: A Tutorial Review*, Proceedings of the IEEE, Vol. 87, No. 6, July 1999.
42. Kwon O.-S., Kim B.-K., Ih J.-G., *On the Positioning of Control Sources in Active Noise Control of Three-Dimensional Interior Space*, "Journal of Mechanical Science and Technology", Vol. 8, No. 3, September 1994, 283–292.
43. Lee H.W., Chou C.S., Chang C.O., *Mutually converging adaptive feedback active noise control with on-line secondary-path modeling*, Proceedings of ICSV13, Vienna 2–6 July 2006.
44. Lopes P.A.C., Piedade M.S., *Sensitivity to the secondary path modeling errors of the bandwidth limited modified Fx-LMS algorithm*, Proceedings of ICSV13, Vienna 2–6 July 2006.
45. Lyons R., *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*, WKŁ, Warszawa 2000.
46. Makarewicz G., *Wybrane cyfrowe systemy aktywnej redukcji hałasu*, CIOP-PIB, Warszawa 2002.
47. Marco J.P., Hany F.R., *Active Noise Cancellation Control By Filtered-X Least Mean Square Method Using DSP Starter Kit TMS320C50*, Proceeding Engineering Computer Modeling and Signal Processing Seminar, 1999.
48. McDonald A.M., Elliott S.J., Stokes M.A., *Active Noise and Vibration Control within the Automobile*, Proceedings of International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, Tokyo 9–11 April 1991.
49. Mohammad J.I., Elliott S.J., *The performance of active control of sound and vibration in a fully-coupled structural-acoustic system using different reference sensors*, Proceedings of ICSV13, Vienna 2–6 July 2006.
50. Money S.A., *Mikroprocesory. Poradnik*. WKŁ, Warszawa 1996.
51. Morais F., Sa da Costa J.M.G., *Active noise control in HVAC ducts*, Proceedings of ICSV12, Lisbon 11–14 July 2005.
52. Muller S., Massarani P., *Transfer-Function Measurement with Sweeps*, "Journal of the Audio Engineering Society", Vol. 49, No. 6, June 2001.

53. Nelson P.A., Elliott S.J., *Active Control of Sound*. Academic Press, London 1992.
54. Oh S.H., Kim H.S., Park Y., *Active control of road booming noise in automotive interiors*, "Journal of the Acoustical Society of America", Vol. 111, No. 1, Styczeń 2002, 180–188.
55. Ohta Y., Sano A., *Multi-channel Active Noise Control for All Uncertain Primary and Secondary Paths*, International Workshop on Acoustic Echo and Noise Control, Kyoto 2003, 159–162.
56. Osiński Z. (red.), *Thumienie drgań*. PWN, Warszawa 1997.
57. Papenfuss C., Saux W.T.-D., Fuller C.R., Remillieux M.C., *Characterization and active reduction of operating noise of a diesel generator*, Proceedings of NOISE-CON, Dearborn: 2008.
58. Paurobally R., Pan J., *Practical Active Noise Control – Results and Difficulties*, Proceedings of ICSV12, Lisbon 11–14 July 2005.
59. Pawełczyk M., *Active Noise Control for Compact Acoustic Plants*, Jacek Skalmierski Computer Studio, Gliwice 1999.
60. Pawełczyk M., *Design and analysis of a virtual-microphone active noise control system*, Proceedings of 12th International Congress on Sound and Vibration, Lisbon: 2005.
61. Pawełczyk M., *Filtered-reference LMS algorithm with estimated error signal for active noise control in earplugs*, Proc. of the 17th International Congress on Sound and Vibration, Cairo, Egypt: 2010, CD.
62. Pawełczyk M., *Multi-Channel Virtual-Microphone Feedback Minimum-Variance Active Noise Control System*, "Mechanics and control", Vol. 28, No. 1, 2009, 12–17.
63. Pawełczyk M., *Polynomial approach to design of feedback virtual-microphone active noise control system*, Proceedings of 13th International Congress on Sound and Vibration, Vienna 2006.
64. Piecha J., *Podstawy aerodynamiki pojazdów*. WKiŁ, Warszawa 2000.
65. Polisset C., Nouals C., Bordeneuve-Guibe J., *Insonorisation of a car air conditioning system: application of an active/passive absorber*, INTER-NOISE '95, Newport Beach: July 1995.
66. Rafaely B., Elliott S.J., *Active Control of Sound in a Headrest: Design and Implementation*, "IEEE Transactions on Control Systems Technology", Vol. 7, No. 1, 1999.
67. Rajora A., Gan W.S., Kuo S.M., Chong Y.K., *Noise Suppression Using Active Noise Control and Masking*, Proceedings of 14th International Congress on Sound and Vibration, Cairns 2007.
68. Ramos P., Salinas A., Lopez A., Masgrau E., *Practical implementation of a multiple-channel fxlms active noise control system with shaping of the residual noise inside a van*, ACTIVE 2002, Southampton 2002.
69. Randall R., *Frequency analysis*, Bruel&Kjaer, Copenhagen 1987.
70. Rutkowski L., *Filtry adaptacyjne i adaptacyjne przetwarzanie sygnałów*, WNT, Warszawa 1994.

71. Sano H. et al., *Development of active control system for low frequency road noise: Solutions for practical use and system configuration*, "Acoustical Science and Technology", No. 22, Maj 2001, 378–379.
72. Sawyer Ch.A., *Less weight, more quiet – On Materials – Rieter Automotive Systems – Brief Article*, Automotive Design & Production. (on-line), [http://findarticles.com/p/articles/mi_moKJI/is_7_114/ai_89157474].
73. Schirmacher R., Lippold R., Steinbach F., Walter F., *Practical aspects of implementing car interior active noise control systems*, Proceedings of Acoustics (Acta Acustica united with Acustica), Paris: 2008, 3785–3788.
74. Shaw J., *Design and Control of Active Muffler In Engine Exhaust Systems*, 3rd WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mathematics, Międzyzdroje: September 2002.
75. Sicuranza G.L., Carini A., *Nonlinear multichannel active noise control*, [w:] *Advances on nonlinear signal and image processing*, New York, United States: Hindawi Publishing Corporation, 2006, ch. 7, 169–203.
76. Smith W.S., *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Los Angeles, United States: California Technical Pub., 1997.
77. Stankiewicz B., *Aktywne tłumienie hałasu oddziałującego na pasażerów samochodu osobowego*, Warszawa 2010.
78. Stankiewicz B., *Aktywny układ tłumienia hałasu w samochodzie osobowym*, [praca niepublikowana], Warszawa 2004.
79. Stankiewicz B., *Aktywny układ tłumienia hałasu w samochodzie osobowym*, XIII Konferencja Naukowa Wibroakustyki i Wibrotechniki WIBROTECH, Jachranka 2007.
80. Stranneby D., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Metody, algorytmy, zastosowania*, BTC, Warszawa 2004.
81. Sutton T.J., Elliott S.J., McDonald A.M., Saunders T.J., *Active Control of Road Noise Inside Vehicles*, "Noise Control Engineering Journal", Vol. 42, No. 4, July 1994.
82. Szabatin J., *Podstawy teorii sygnałów*, WKŁ, Warszawa 2004.
83. Valentino T., *Speaker equalization using FIR filters*, Audio Design Line. (on-line), [www.audiodesignline.com/208402117].
84. Voigt M., Czarnecki S., *Analysis of sound source phase cancellation conditions*, Proceedings of Noise Control '76, Warszawa 1976, 409–413.
85. Wang L., Gan W.S., Kuo S.M., *Integration of Bass Enhancement and Active Noise Control System in Automobile Cabin*, Advances in Acoustics and Vibration, May 2008.
86. Wojciechowski J.M., *Sygnały i systemy*, WKŁ, Warszawa 2008.
87. Zawieska M.W., *Modelowanie transformatora energetycznego jako źródła hałasu*, „Przegląd Mechaniczny”, Nr 11, 2007, 40–42.
88. Zawieska W.M., *Wybrane zagadnienia aktywnej redukcji hałasu na przykładzie transformatorów*. Warszawa: CiOP PIB, 2007.
89. Zbysiński P., Pasierbiński J., *Układy programowalne. Pierwsze kroki*, BTC, Warszawa 2004.

90. Zhang Q.-Z., Gan W.-S., *A model predictive algorithm for active noise control with online secondary path modeling*, "Journal of Sound and Vibration", 2004, 1056–1066.
91. *2006 Acura RL – Interior*. Honda Motor Company, Torrance: September 2005, Materiały prasowe.
92. *Aachener Kolloquium Fahrzeug- Und Motorentechnik 2003*. Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen GmbH, Aachen: 2003, CD-ROM.
93. ISO 5128:1980, *Acoustics -- Measurement of noise inside motor vehicles*.
94. *Audi AG*. Ingolstadt: 2009, Materiały prasowe.
95. *Contitech AG*. Hannover: 2009, Materiały prasowe.
96. *Daimler AG*. Stuttgart: 2009, Materiały prasowe.
97. *Innovations - Bose Automotive Systems Division*, Bose Corporation, (on-line) [www.bose.com].
98. *M-TEC Co. Ltd.* Asaka: 2009, Materiały prasowe.
99. *Official Honda Legend Site*, Honda Motor Company, (on-line) [http://legend.honda.com.au].
100. PN-90/S-04052, *Samochody -- Dopuszczalny poziom hałasu wewnątrz pojazdu -- Wymagania i badania*. 1990.
101. *TENECO - Heinrich Gillet GmbH. Sound Engineering*. Edenkoben: 2005, Materiały prasowe.
102. *The all-new Infiniti M: the luxury sports sedan alternative*. Nissan Motor Co., Ltd., Roma: 2010, Materiały prasowe.
103. PN-ISO 9613-1:2002, *Thumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej -- Obliczanie pochłaniania dźwięku przez atmosferę*.