



Budowa i badania elementów wykonawczych kierunkowych źródeł dźwięku

dr inż. Grzegorz Makarewicz^{a, b} (ORCID: 0000-0003-1405-8847)

dr inż. Leszek Morzyński^a (ORCID: 0000-0003-3534-3284)

inż. Marlena Podleśna^a (ORCID: 0000-0002-8401-8106)

Fot. Grzegorz Makarewicz



Kierunkowość jest ważną cechą źródeł dźwięku i należy ją uwzględniać np. podczas projektowania systemów nagłaśniających. Sterowanie kierunkowością źródeł dźwięku można realizować albo przez dobór liczby przetworników, czyli elementów przetwarzających sygnały elektryczne na akustyczne, wbudowanych w kierunkowe źródło dźwięku, albo odpowiednie sterowanie parametrami sygnałów podawanych na wejścia tych przetworników. W każdym przypadku należy uwzględnić parametry samych przetworników. W artykule opisano trzy modele kierunkowych źródeł dźwięku zrealizowanych za pomocą najpopularniejszych i najczęściej wykorzystywanych przetworników, czyli głośników dynamicznych. Pierwszym modelem jest źródło liniowe, a pozostałe dwa to tzw. matryce głośnikowe. Przedstawiono szczegóły konstrukcyjne źródeł oraz wyniki pomiarów wpływu liczby pobudzanych sygnałem testowym przetworników wbudowanych w źródła na kształt ich charakterystyk kierunkowych.

Słowa kluczowe: kierunkowość, źródło liniowe, matryca głośników

Construction and testing of actuators of directional sound sources

Directivity is an important feature of sound sources and should be taken into account, for example, when designing sound systems. Control of the directivity of sound sources can be achieved by selecting the number of transducers, i.e. elements that convert electrical signals into acoustic signals built into the directional sound source and/or appropriate control of the parameters of signals fed to the inputs of these transducers. In each case, the parameters of the transducers themselves should be taken into account. The article describes three models of directional sound sources implemented using the most popular and most frequently used transducers, which are dynamic loudspeakers. The first model is a linear source, and the other two models are so-called loudspeaker matrices. The construction details of the sources and the results of measurements of the effect of the number of transducers built into the sources, stimulated by a test signal, on the shape of their directional characteristics are presented.

Keywords: directivity, line source, loudspeaker matrix

^a Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

^b Kontakt: grmak@ciop.pl.

Wstęp

Kierunkowe źródła dźwięku wykorzystywane są do kształtowania rozkładu pola akustycznego w określonych miejscach [1, 2, 3], np. do tworzenia odrębnych stref odsłuchu w przestrzeni współdzielonej przez wiele osób. W przestrzeni tego rodzaju dźwięk, który dla jednej osoby niesie konkretną informację, dla drugiej może być uciążliwy, irytujący lub rozpraszający. Dzięki odpowiednio ukształtowanemu rozkładowi pola akustycznego słuchacz może korzystać z określonego, specjalnie dla niego przeznaczonego materiału dźwiękowego bez przeszkadzania postronnym osobom, a ponadto ma ułatwioną komunikację w przestrzeni publicznej, np. w biurowych pomieszczeniach typu otwartego.

Układy przetworników w powiązaniu z odpowiednimi algorytmami przetwarzania sygnałów, które nimi sterują, są nazywane układami formowania wiązki lub źródłami kierunkowymi [2, 3]. Ważnym elementem źródła kierunkowego jest element wykonawczy, czyli zestaw przetworników zamieniający sygnał elektryczny na akustyczny (rys. 1).

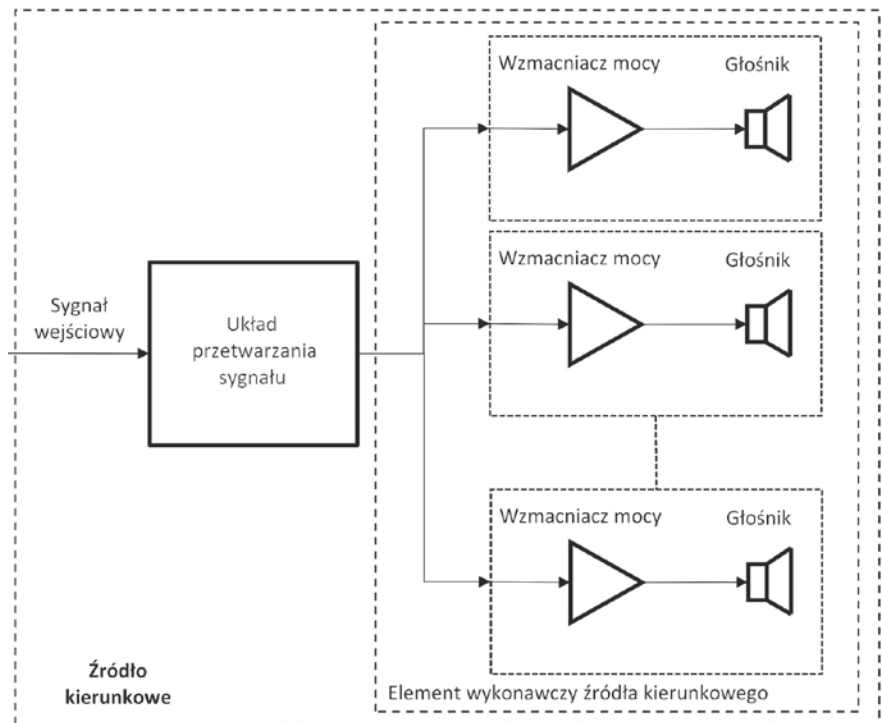
W artykule przedstawiono opis trzech kierunkowych źródeł dźwięku: źródła liniowego oraz dwóch wersji matryc głośnikowych. Opisano ich szczegóły konstrukcyjne oraz wyniki pomiarów wpływu liczby pobudzonych sygnałem testowym przetworników na ich charakterystykę kierunkowości.

Podstawowym elementem składowym źródła kierunkowego jest element wykonawczy. Zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 1 w tym artykule przez element wykonawczy źródła kierunkowego należy rozumieć nie tylko sam przetwornik (głośnik dynamiczny) [4, 5], ale także wzmacniacz mocy bezpośrednio sterujący jego działaniem [6].

Wszystkie zdjęcia i wykresy w artykule, z wyjątkiem rys. 3, 4 i 5, są opracowaniem własnym autorów.

Element wykonawczy źródła liniowego

Źródło liniowe jest zbudowane z zestawu przetworników zmontowanych w obudowie i połączonych ze sobą tak, że tworzą źródło dźwięku o kształcie geometrycznym zbliżonym do liniowego. Do badań wybrano głośniki dynamiczne o małych średnicach w celu zwiększenia częstotliwości sygnału, powyżej której występuje niekorzystne zjawisko tzw. aliasingu przestrzennego. Jest ono problemem pojawiającym się w każdym zastosowaniu



Rys. 1. Schemat blokowy kierunkowego źródła dźwięku z wydzielonym elementem wykonawczym
Fig 1. Block diagram of a directional sound source with a source actuator

źródeł kierunkowych zbudowanych z kilku przetworników – wiąże się z niemożnością prawidłowego próbkowania przestrzennego, gdy fala akustyczna jest krótsza od dwukrotnego odstepu między przetwornikami. Precyzując: ważnym parametrem jest długość fali widziana wzdłuż kierunku źródła liniowego, co zostało szczegółowo przedstawione na rys. 2.

Warunek aliasingu przestrzennego opisuje równanie:

$$\lambda_x = \frac{\lambda}{\sin(\varphi)} > 2\Delta x \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda} < \frac{c}{2\Delta x \sin(\varphi)} \quad (1)$$

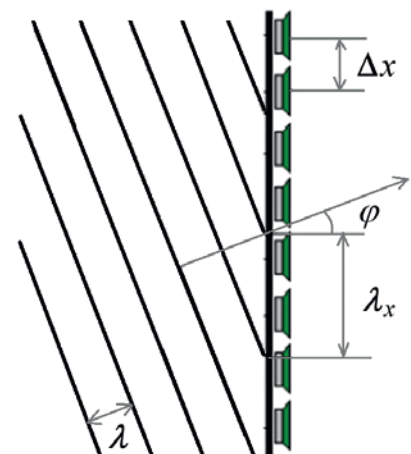
gdzie: λ – długość fali akustycznej, λ_x – długość fali widziana wzdłuż kierunku źródła liniowego, φ – kąt padania fali akustycznej na linię źródła, Δx – odległość pomiędzy głośnikami tworzącymi źródło.

Elementami generującymi bezpośrednio falę akustyczną, zastosowanymi w kierunkowym źródle liniowym, są głośniki dynamiczne o oznaczeniu fabrycznym FR 58-8. Na rys. 3 pokazano ich charakterystyki kierunkowe w odniesieniu do pięciu częstotliwości – od 500 Hz do 8 kHz. Jak widać, do częstotliwości 4 kHz włącznie charakterystyki te są zbliżone do charakterystyk dookólnych i dopiero przy częstotliwości 8 kHz stają się kierunkowe (głośnik promieniuje głównie wzdłuż osi geometrycznej przechodzącej przez środek jego membrany).

Parametry każdego głośnika dynamicznego (przetwornika elektrodynamicznego) zmieniają się w funkcji częstotliwości [4]. Widać to nie tylko na podstawie zestawu

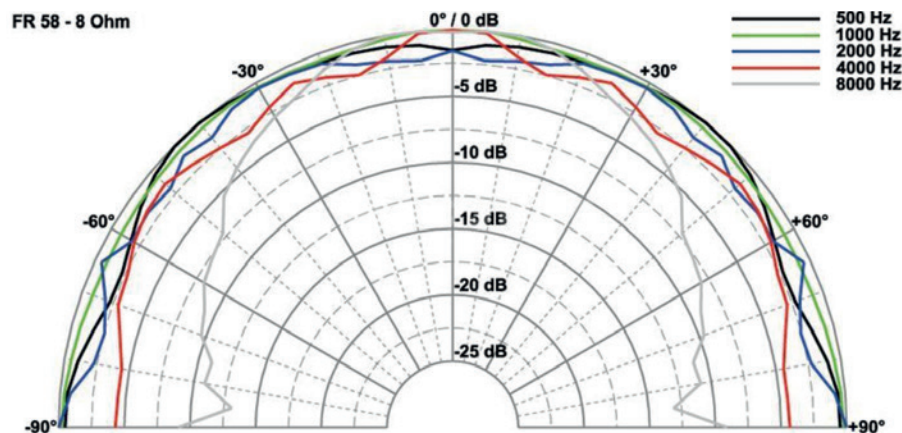
charakterystyk kierunkowości (rys. 3), ale także na podstawie charakterystyk przenoszenia i charakterystyk pokazujących wpływ częstotliwości na impedancję głośnika. Takie charakterystyki, pochodzące z karty katalogowej producenta głośnika, pokazane są na rys. 4.

Z uwagi na konstrukcję układu sterującego pracą kierunkowego źródła liniowego ważne jest zmniejszenie wyraźnego rezonansu występującego na charakterystyce przedstawionej impedancji. Pojawia się on przy częstotliwości 220 Hz, a więc w użytecznym zakresie częstotliwości pracy źródła. Tego typu rezonans ma wpływ na skuteczność promieniowania sygnału



Rys. 2. Powiązanie parametrów fali płaskiej z parametrami źródła liniowego – oznaczenia zgodne z symbolami zastosowanymi w równaniu (1)

Fig. 2. Connection of plane wave parameters with linear source – parameters notations consistent with those used in equation (1)



Rys. 3. Charakterystyki kierunkowe głośnika FR 58-8, źródło: karta katalogowa producenta
Fig. 3. Directional characteristics of the FR 58-8 loudspeaker, source: manufacturer's data sheet

w przypadku częstotliwości, przy której występuje, a także częstotliwości pobliskich, i – co się z tym wiąże – wpływa na przebieg charakterystyki promieniowania w funkcji częstotliwości.

Konstrukcja kierunkowego źródła liniowego wykorzystuje obudowę, w której każdy głośnik umieszczony jest w niezależnej komorze (fot. 1), co wynika z dążenia do zminimalizowania wzajemnego oddziaływania przetworników. Okrągłe komory zostały wyfrezowane w trójwarstwowej konstrukcji nośnej – odległości między nimi są minimalne i jednocześnie nie naruszają jej sztywności. Odległość pomiędzy środkami membran głośników wynosi 65 mm, co zgodnie z równaniem (1) odpowiada częstotliwości 2,61 kHz w odniesieniu do najniekorzystniejszego kąta

promieniowania 90°. W celu stłumienia rezonansu na charakterystyce impedancji głośnika, jego każda komora została niezależnie wytłumiona. Zmontowane w obudowie liniowe źródło dźwięku, składające się z pięciu głośników dynamicznych, pokazano na fot. 2. Oprócz obudowy na zdjęciu widać element umożliwiający przymocowanie liniowego źródła kierunkowego do statywu, dzięki czemu można było umieścić źródło tak, aby sygnały docierające do mikrofonu pomiarowego nie były zakłócone przez obijające dźwięk elementy znajdujące się w pomieszczeniu pomiarowym.

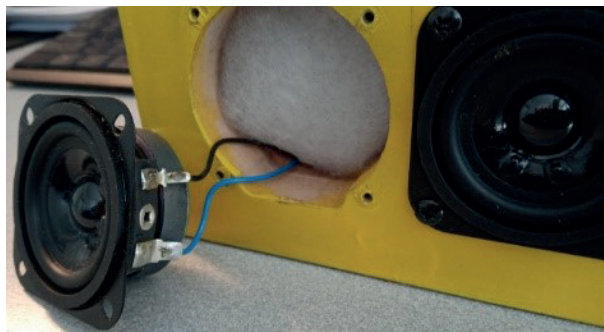
Obok przetworników (głośników dynamicznych) ważnym elementem kierunkowego źródła dźwięku jest wzmacniacz mocy nimi sterujący. Jest to urządzenie małej częstotliwości zapewniające niezniekształcony sygnał elektryczny o mocy niezbędnej do wysterowania głośników [6]. Razem tworzą one element wykonawczy źródła kierunkowego (rys. 1). W zależności od szczegółów konstrukcyjnych kierunkowego źródła dźwięku, a przede wszystkim od liczby niezależnie sterowanych przetworników, stosuje się różną

liczbę wzmacniaczy. W układzie źródła liniowego (i opisaną dalej matrycę – wersja 1) jako wzmacniacze mocy zastosowano układy scalone z serii LTK5128 o mocy wyjściowej 5 W. Działają one w dwóch klasach pracy: D lub AB, różniących się skutecznością i tym samym wymaganiami dotyczącymi energii pobieranej ze źródeł zasilających. Do przełączania klas pracy wzmacniacza przeznaczone jest specjalne wyprowadzenie układu – MODE. Zakres napięcia zasilającego wynosi od 2,5 V do 5,5 V. Sprawność wzmacniacza pracującego w klasie D przekracza 90%, ale podczas trybu AB jest mniejsza (w przypadku zasilania np. za pomocą baterii należy się więc liczyć z ich częstszą wymianą), za to wzmacniacz ma mniejsze zniekształcenia nieliniowe i generuje mniejsze zakłócenia elektromagnetyczne.

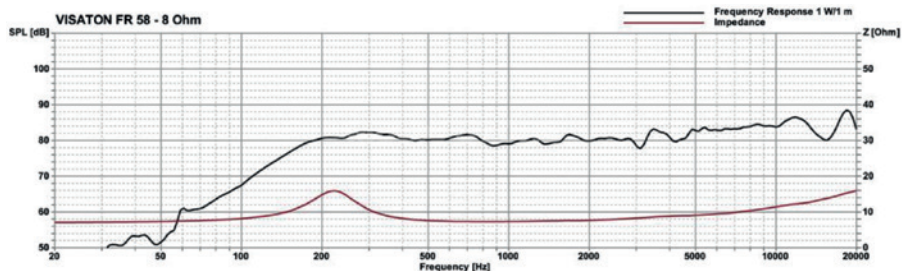
W opisanych źródłach kierunkowych układy scalone LTK5128 pracują w klasie pracy D, zapewniającej większą sprawność i wspomniany dłuższy czas pracy. Konfiguracja układowa wzmacniacza polega na tym, że na jego wyjściu nie ma filtra dolnoprzepustowego, obowiązującego standardowo w układach pracujących w klasie pracy D. Takie podejście zmniejsza koszty wykonania wzmacniacza oraz jego wymiary, co umożliwia zastosowanie go także w urządzeniach przenośnych. Jednym z istotnych źródeł powstawania zniekształceń nieliniowych jest zjawisko ograniczania amplitudy sygnału wyjściowego przy przekroczeniu jej dopuszczalnej wartości. We wzmacniaczu LTK5128 wykorzystano technologię dynamicznej kontroli zakresu, zmniejszającej zniekształcenia powodowane „obcinaniem” przebiegu sygnału przy zbyt dużej amplitudzie. W omawianych źródłach kierunkowych wzmacniacze pracują zgodnie ze schematem ideowym zalecanym przez producenta (rys. 5).

Wzmocnienie napięciowe A_v wzmacniacza zależy od wartości rezystancji (R_i , R_s i R_L) rezystorów R_p , R_s oraz R_L :

$$A_v = 20 \log \left(\frac{2 \times R_L}{R_i + R_s} \right) \quad (2)$$



Fot. 1. Widok wnętrza komory głośnika z materiałem tłumiącym
Photo 1. View of the inside of the loudspeaker chamber with damping material



Rys. 4. Charakterystyka przenoszenia i impedancji głośnika FR 58-8 (dane producenta dotyczące przetwornika w wersji 8 Ω), źródło: karta katalogowa producenta
Fig. 4. Transfer and impedance characteristics of the loudspeaker type FR 58-8 (manufacturer's data for the 8 Ω version), source: manufacturer's data sheet



Fot. 2. Widok kierunkowego źródła liniowego po zakończeniu prac montażowych
Photo 2. View of the linear source after the assembly work is completed

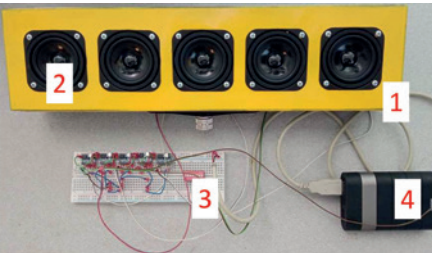
Rezystory o oznaczeniach R_f i R_s są umieszczone wewnątrz obudowy wzmacniacza i ich rezystancje, które wynoszą odpowiednio 195 k Ω i 6,5 k Ω , nie mogą być zmieniane. Tak więc o wzmacnieniu wzmacniacza decyduje rezystancja (wyrażona w Ω) rezystora R_i :

$$A_v = 20 \log \left(\frac{290\,000}{R_i + 65\,000} \right) \tag{3}$$

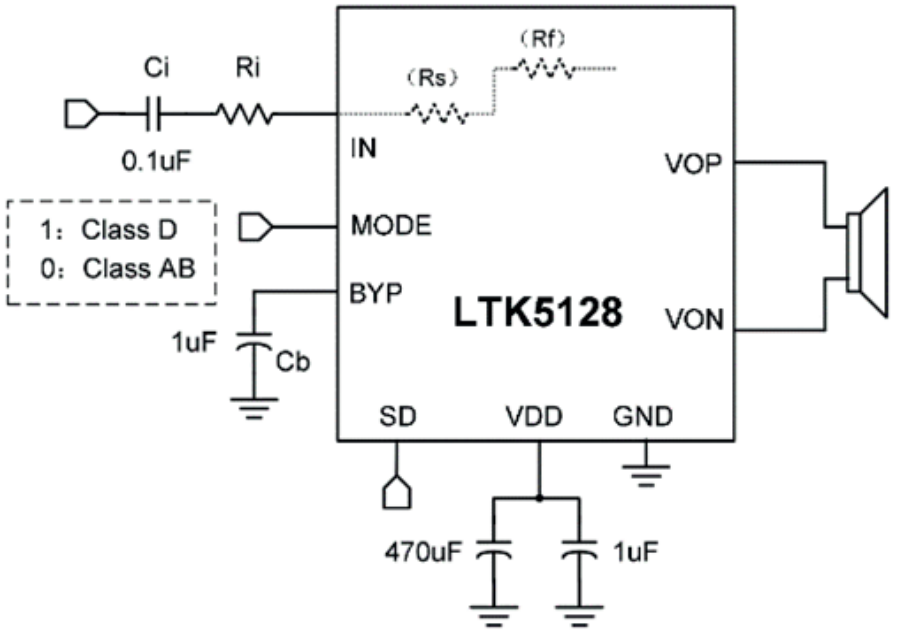
Widok kierunkowego źródła liniowego poddanego testom pokazano na fot. 3. Źródło kierunkowe (1) zawiera: zestaw pięciu głośników dynamicznych, które wraz z płytką wzmacniaczy (3) tworzą układ wykonawczy (2). Każdy głośnik jest sterowany przez niezależny wzmacniacz mocy na układzie scalonym LTK5128. Całość jest zasilana za pomocą akumulatora (4). Do testowania liniowego źródła kierunkowego zastosowano akumulator przeznaczony do ładowania urządzeń mobilnych. Ze względu na fakt, że wzmacniacze mocy pracujące w klasie D pobierają mały prąd, takie zasilanie było wystarczające do wykonywania eksperymentów.

Element wykonawczy matrycy głośnikowej – wersja 1

Matryca głośnikowa ma kształt kwadratu i jest zbudowana z 25 przetworników w konfiguracji 5 x 5 głośników – takich samych, jakie wykorzystano w źródle liniowym. Zastosowano również takie same wzmacniacze mocy sterujące tymi przetwornikami. Odległość pomiędzy środkami membran sąsiednich głośników wynosi 65 mm. Konstrukcja nośna matrycy wykorzystuje strukturę kilkuwarstwową z frezowanymi otworami (fot. 4). Gniazda głośnikowe zostały okablowane tak, by odpowiednie wyprowadzenia z głośników były dołączone do odpowiednich (wyróżnionych kolorem) wyprowadzeń tych gniazd. Ułatwiło to łączenie głośników ze wzmacniaczami mocy w sposób eliminujący przypadkowe odwrócenie fazy promieniowanej fali akustycznej.



Fot. 3. Źródło liniowe (1) z głośnikami dynamicznymi (2), płytką ze wzmacniaczami (3) oraz z zasilaczem (4)
Photo 3. Line source (1) with dynamic speakers (2), amplifier board (3) and power supply (4)



Rys. 5. Schemat ideowy wzmacniacza mocy, źródło: karta katalogowa producenta
Fig. 5. Power amplifier schematic diagram, source: manufacturer's data sheet

Element wykonawczy matrycy głośnikowej – wersja 2

Matryca w wersji 2 wykorzystuje stereofoniczne zestawy głośnikowe z wbudowanymi, specjalnie do tego przeznaczonymi wzmacniaczami mocy (fot. 5). Zestaw głośnikowy zawiera wzmacniacz stereofoniczny przystosowany do zasilania z portu USB komputera, a płytka wzmacniacza znajduje się tylko w jednej z jego obudów. Sygnał sterujący głośnikiem w drugiej obudowie jest doprowadzany za pomocą dodatkowego przewodu z obudowy, w której znajduje się płytka wzmacniacza. Obudowy nie są wytłumione żadnym materiałem dźwiękochłonnym.

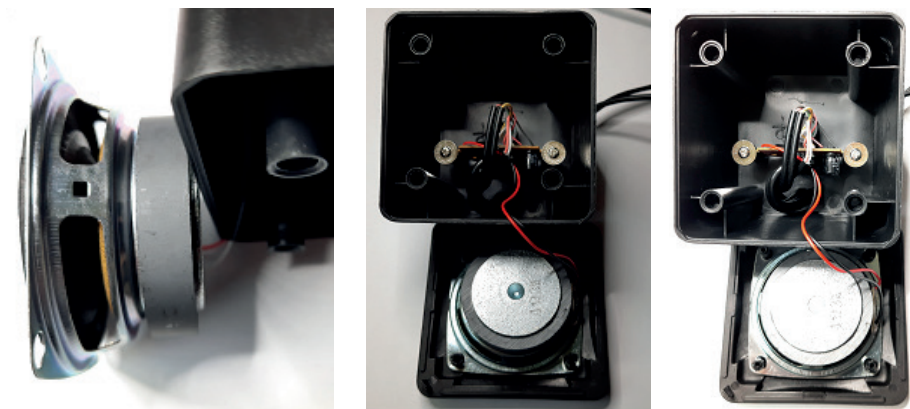
Z uwagi na fakt, że w matrycy są umieszczone zarówno głośniki w obudowach ze wzmacniaczem, jak i głośniki bez płytki wzmacniacza, wykonano pomiary sprawdzające, czy z punktu widzenia

parametrów matrycy takie połączenie będzie prawidłowe. Jednym z nich był pomiar impedancji w funkcji częstotliwości głośnika po jego wyjęciu z obudowy oraz po umieszczeniu go w obudowie z płytką wzmacniacza i w obudowie bez niej. W przypadku obudowy bez płytki z układem wzmacniacza przebieg modułu impedancji głośnika po jego umieszczeniu w obudowie nie zmienia się. Częstotliwość rezonansu wynosi ok. 190 Hz. W przypadku głośnika umieszczonego w obudowie z płytką wzmacniacza moduł impedancji zmienia się nieznacznie – częstotliwość rezonansu zmniejsza się do 180 Hz.

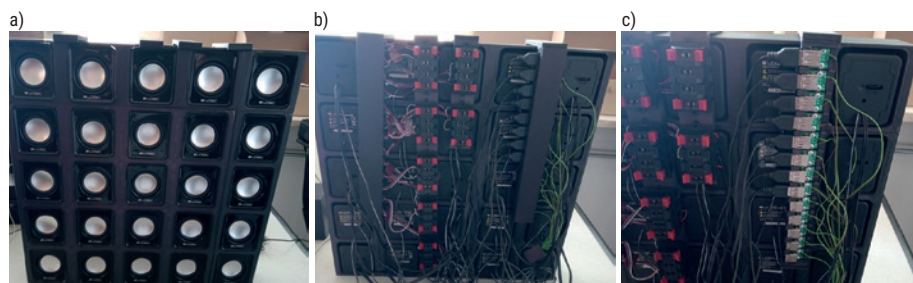
Podobnie jak w przypadku źródła liniowego i matrycy w wersji 1, w konstrukcji nośnej uwzględniono niekorzystne zjawisko aliasingu przestrzennego i głośniki w obudowach zostały umieszczone jak najbliżej siebie. Odległość pomiędzy



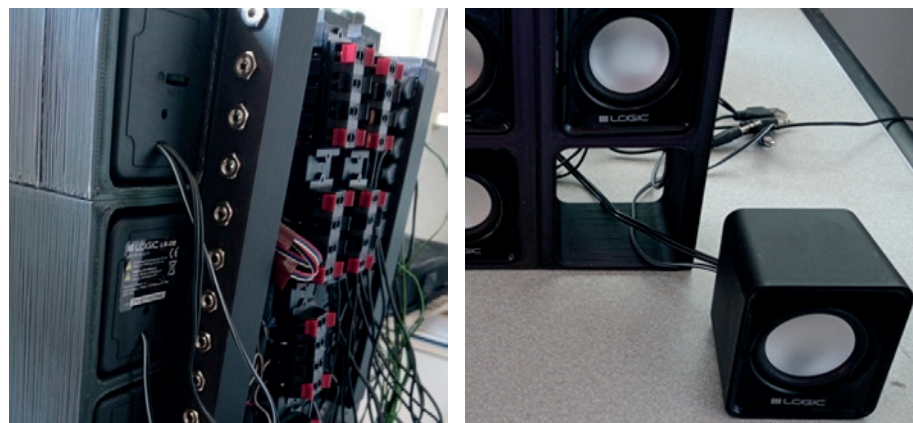
Fot. 4. Zmontowana kierunkowa matryca głośnikowa – widok z przodu
Photo 4. Front view of the assembled directional loudspeaker array



Fot. 5. Wnętrze obudowy głośnikowej zastosowanej w matrycy w wersji 2
Photo 5. The inside of the speaker enclosure used in the version 2 matrix



Fot. 6. Kierunkowa matryca głośnikowa w wersji 2: a) widok z przodu, b) widok z tyłu
Photo 6. Directional speaker array version 2: a) front view, b) rear view



Fot. 7. Widok gniazd sygnałowych oraz zdemontowanego jednego głośnika
Photo 7. View of the signal sockets and one loudspeaker dismantled

środkami membran głośników wynosi 80 mm, co – zgodnie z równaniem (1) – odpowiada częstotliwości 2,12 kHz w odniesieniu do najniekorzystniejszego kąta promieniowania 90°. Konstrukcję nośną wykonano jako wydruk z drukarki 3D. Gotową matrycę w wersji 2 (z głośnikami oraz umieszczonymi w ich obudowach wzmacniaczami mocy zamontowanymi w ramie nośnej) przedstawiono na fot. 6.

Niezależnie od przewodów zamontowanych w głośnikach wykonano tu dodatkowe niezależne wyprowadzenia, w tym wspólne zasilanie wszystkich głośników oraz pełen zestaw gniazd głośnikowych. Dużą zaletą konstrukcji nośnej jest możliwość demontażu dowolnie wybranego głośnika (fot. 7), co pozwala na modyfikację elementu składowego tworzącego matrycę

nie tylko przez odłączenie wyprowadzenia sterującego głośnikiem, lecz także przez jego usunięcie. Dzięki temu można badać różne struktury matrycy (w tym z różną liczbą głośników) w ramach jednej konstrukcji nośnej.

Wyniki pomiarów źródła liniowego

Pomiary objęły określenie charakterystyk kierunkowości źródła liniowego, pokazanego na fot. 3, przy pobudzeniu sygnałami testowymi o różnych częstotliwościach odpowiednio: pojedynczego głośnika umieszczonego w środkowej części źródła liniowego (rys. 6a), trzech głośników – tj. głośnika centralnego i dwóch głośników z nim sąsiadujących (rys. 6b)

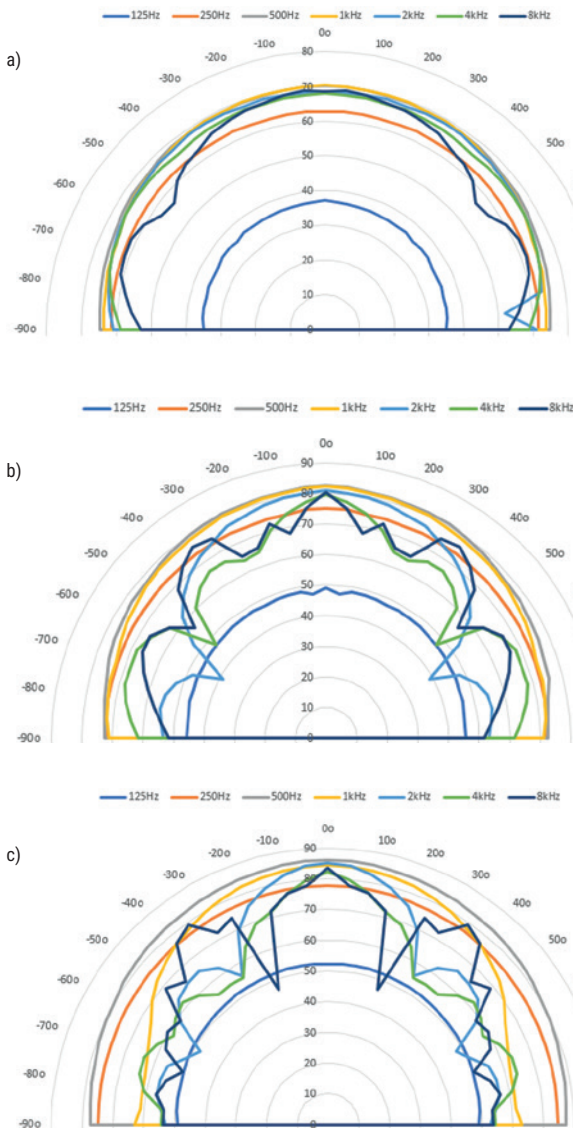
– oraz wszystkich pięciu głośników źródła liniowego (rys. 6c).

Zmierzone charakterystyki kierunkowości przy włączonym tylko jednym głośniku (rys. 6a) są podobne do charakterystyk podanych przez producenta głośnika i pokazanych na rys. 3, a także zbliżone do dookólnych w zakresie częstotliwości poniżej 8 kHz. Dopiero przy częstotliwości 8 kHz wykazują pewne cechy kierunkowe.

W przypadku gdy w kierunkowym źródle liniowym sterowane są trzy przetworniki, źródło ma charakterystykę dookólną w zakresie częstotliwości do 1 kHz. Powyżej tej częstotliwości – do częstotliwości 8 kHz – mamy już do czynienia z charakterystykami kierunkowymi z wyraźnie zarysowanymi listkami bocznymi, tym większymi, im większa jest częstotliwość sygnału sterującego. Jeśli natomiast w kierunkowym źródle liniowym wykorzystywane są wszystkie głośniki, wykazuje ono cechy źródła kierunkowego już przy częstotliwości 500 Hz. Podobnie jak w przypadku trzech głośników (rys. 6b) na charakterystykach można zaobserwować nierównomierności, przy czym jest ich więcej i są one mniejsze niż w przypadku sterowania tylko trzema głośnikami.

Na rys. 7 porównano charakterystyki kierunkowości kierunkowego źródła liniowego o różnej liczbie sterowanych głośników w przypadku, gdy sygnałem pobudzającym jest sygnał sinusoidalny o częstotliwości 2 kHz (te charakterystyki są również widoczne na rys. 6). W przypadku aktywnego jednego głośnika charakterystyka kierunkowości jest dookólna, a wraz ze wzrostem liczby głośników źródło liniowe staje się coraz bardziej kierunkowe. Widoczne na wykresach różnice wartości poziomu ciśnienia akustycznego wynikają z faktu, że pobudzana jest różna liczba głośników (od jednego do pięciu) i w każdym przypadku sygnał sterujący wzmacniaczem mocy ma taką samą amplitudę.

Wyniki pomiarów potwierdziły, że zmianę kierunkowości źródła liniowego można uzyskać bez konieczności regulowania parametrów sygnałów sterujących, a jedynie poprzez zmianę liczby pobudzanych głośników. Takie podejście jest stosowane np. w systemach nagłaśniających wykorzystywanych podczas koncertów. Pożądany rozkład pola akustycznego w obszarze odsłuchowym uzyskuje się dzięki zastosowaniu źródeł liniowych o odpowiedniej liczbie przetworników i dodatkowo dzięki odpowiedniemu ukierunkowaniu tych źródeł w stosunku do słuchaczy.



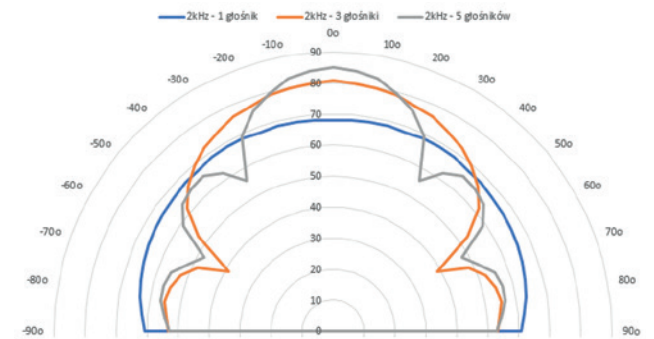
Rys. 6. Charakterystyki kierunkowe źródła liniowego dla różnych częstotliwości sygnału wejściowego: a) przy pracującym jednym (środkowym) głośniku, b) przy pracujących trzech głośnikach, c) przy pracujących pięciu głośnikach

Fig. 6. Directional characteristics of the line source for different frequencies of the input signal: a) with one (middle) loudspeaker operating, b) with three loudspeakers working, c) with five loudspeakers working

Wyniki pomiarów matrycy głośnikowej – wersja 1

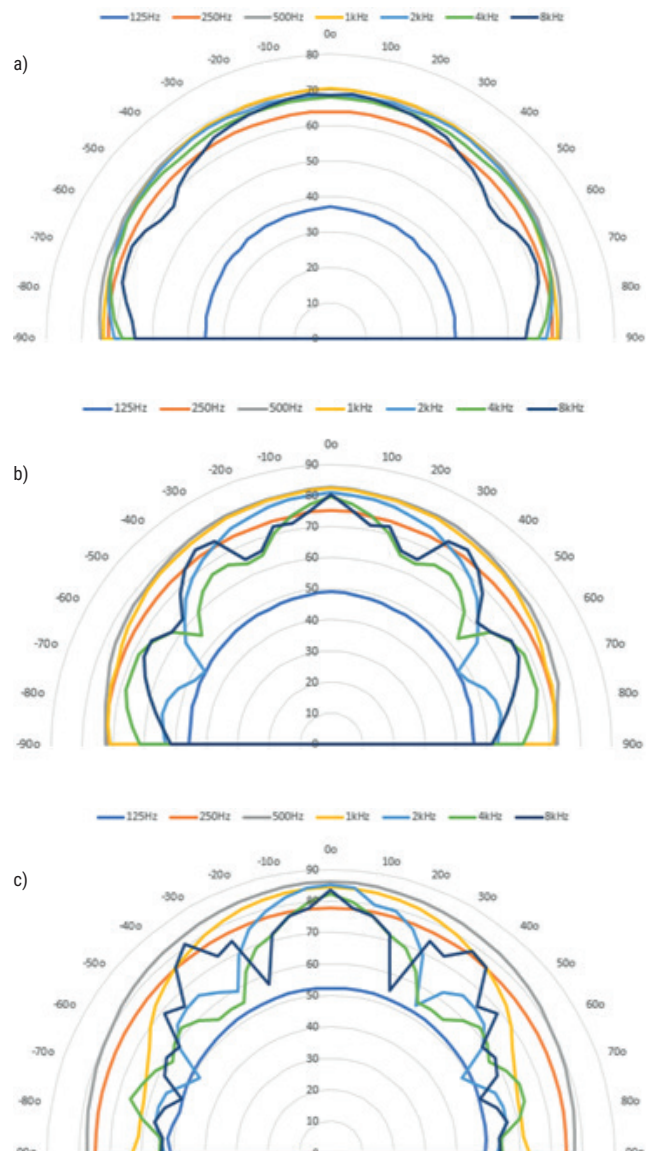
Pomiary objęły określenie charakterystyk kierunkowości źródła pokazanego na fot. 4. Sposób ich przeprowadzenia był analogiczny do źródła liniowego, z tą różnicą, że każdemu głośnikowi tego źródła odpowiadało pięć głośników umieszczonych pionowo w matrycy. Podczas pomiarów sygnał sinusoidalny o zmiennej częstotliwości był zatem doprowadzany odpowiednio do: pięciu głośników umieszczonych pionowo w środkowej części źródła (rys. 8a), piętnastu głośników – tj. głośników w linii centralnej i dwóch linii głośników z nią sąsiadujących (rys. 8b) – oraz wszystkich dwudziestu pięciu głośników matrycy (rys. 8c). W celu ułatwienia

bezpośredniego porównania charakterystyk kierunkowości matrycy (fot. 4) i źródła liniowego (fot. 3) podczas pomiarów amplitudy sygnału sterującego były zmniejszane w stosunku do każdej częstotliwości w taki sposób, aby na osi głównej (0 stopni) charakterystyk poziomy ciśnienia akustycznego wytwarzane przez matrycę i źródło liniowe były takie same. Dzięki temu można bezpośrednio porównać



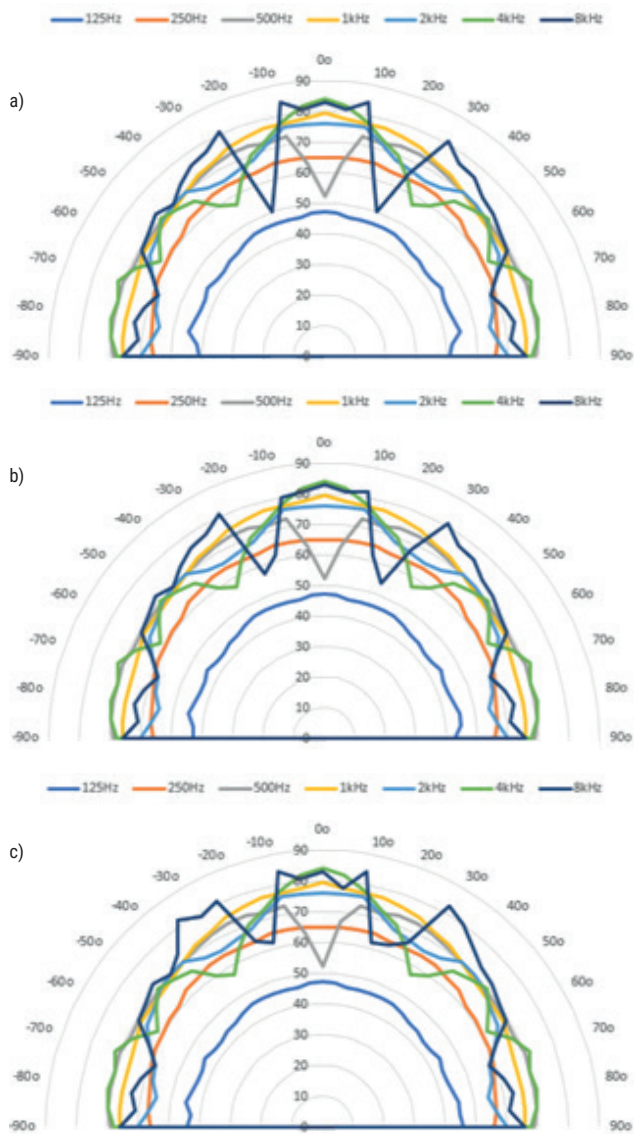
Rys. 7. Porównanie charakterystyk kierunkowych źródła liniowego dla różnej liczby głośników przy sygnale sterującym o częstotliwości 2 kHz

Fig. 7. Comparison of the directional characteristics of a line source for a different number of transducers for an input signal with a frequency of 2 kHz



Rys. 8. Charakterystyki kierunkowe matrycy głośnikowej (wersja 1) dla różnych częstotliwości sygnału wejściowego: a) przy pracujących pięciu głośnikach umieszczonych pionowo w środkowej części źródła, b) przy pracujących piętnastu głośnikach umieszczonych w pionowej linii centralnej i bocznych liniach z nią sąsiadujących, c) przy pracujących dwudziestu pięciu głośnikach

Fig. 8. Directional characteristics of the loudspeaker array (version 1) for different input signal frequencies: a) with five loudspeakers placed vertically in the center of the source, b) with fifteen loudspeakers working in the vertical center line and the side lines adjacent to it, c) with twenty-five loudspeakers working



Rys. 9. Charakterystyki kierunkowe matrycy głośnikowej (wersja 2) dla różnych częstotliwości sygnału wejściowego: a) przy pracujących pięciu głośnikach umieszczonych pionowo w środkowej części źródła, b) przy pracujących piętnastu głośnikach pracujących w pionowej linii centralnej i bocznych liniach z nią sąsiadujących, c) przy pracujących dwudziestu pięciu głośnikach
Fig. 9. Directional characteristics of the loudspeaker array (version 2) for different input signal frequencies: a) with five loudspeakers placed vertically in the center of the source, b) with fifteen loudspeakers working in the vertical center line and the side lines adjacent to it, c) with twenty-five loudspeakers working

charakterystyki pokazane na rys 8 z charakterystykami pokazanymi na rys. 6.

Wyniki pomiarów potwierdziły, że kierunkowość matrycy zwiększa się wraz z liczbą pobudzanych sygnałem testowym głośników umieszczonych w pionowych szeregach matrycy. Charakterystyki kierunkowe matrycy (rys. 8) i źródła liniowego (rys. 6) są więc podobne. Wynika to z faktu, że matryca zbudowana jest z głośników o takich samych parametrach i umieszczonych w identycznych indywidualnych komorach, a jej konstrukcja stanowi w istocie geometryczne zestawienie pięciu źródeł liniowych. Na przedstawionych wykresach widoczna jest pewna różnica między charakterystykami źródła liniowego. Dotyczy ona mniej wyraźnych listków

bocznych przy wyższych częstotliwościach. Różnica pogłębia się wraz ze wzrostem liczby aktywnych głośników matrycy.

Wyniki pomiarów matrycy głośnikowej – wersja 2

Pomiary objęły określenie charakterystyk kierunkowości matrycy pokazanej na fot. 6. Sposób przeprowadzenia pomiarów był analogiczny jak dla matrycy głośnikowej – wersja 1. Sygnał pomiarowy był doprowadzany do: pięciu głośników umieszczonych pionowo w środkowej części źródła (rys. 9a), piętnastu głośników umieszczonych pionowo w linii centralnej i dwóch liniach z nią sąsiadujących (rys. 9b) – oraz wszystkich dwudziestu pięciu głośników matrycy (rys. 9c). Ponieważ w matrycy zastosowano inne przetworniki niż w źródle liniowym, na wykresach nie wykonano wspomnianej wcześniej operacji regulacji wartości amplitudy sygnału sterującego matrycą. Wykonano natomiast analogiczną operację w odniesieniu do trzech konfiguracji matrycy. Podobnie jak

listków bocznych w przypadku większej liczby aktywnych głośników.

Podsumowanie

Wyniki pomiarów potwierdziły, że kierunkowością źródeł można sterować, dobierając odpowiednio liczbę sterowanych głośników. W przypadku źródła liniowego im większa jest liczba sterowanych głośników wbudowanych w źródło, tym ma ono większą kierunkowość. W analogiczny sposób zachowują się dwa modele matrycy. Wyniki pomiarów wykazały też, że w przypadku matrycy głośnikowej przy zastosowanej strategii sterowania liczba pobudzanych głośników nie wpływa silnie na kształt charakterystyk kierunkowych, niż ma to miejsce w przypadku źródła liniowego. Z praktycznego punktu widzenia oznacza to, że bardziej ekonomicznie uzasadnione jest stosowanie w pomieszczeniu źródeł liniowych, a nie matrycy. Przy mniejszej liczbie głośników i zastosowaniu takich samych przetworników umieszczonych w tych samych odległościach od siebie źródła liniowe są tańsze i łatwiejsze w manipulowaniu ich ustawieniem w przestrzeni. Oczywiście przy zastosowaniu niezależnego sterowania każdego głośnika za pomocą matrycy możliwa jest bardziej uniwersalna synteza parametrów pola akustycznego, ale tematem badań była analiza wpływu liczby aktywnych przetworników przy ich sterowaniu pojedynczym sygnałem.

Opracowano i wydano na podstawie wyników zadania badawczego nr II-41 pt. „Badanie sterowania polem akustycznym na przykładzie matrycowego źródła dźwięku o sterowanej charakterystyce kierunkowej”, realizowanego w latach 2021–2023 i finansowanego przez Ministerstwo Edukacji i Nauki z subwencji ze środków finansowych na utrzymanie i rozwój potencjału dydaktycznego i badawczego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Coleman P., *Loudspeaker array processing for personal sound zone reproduction*, Doctoral Thesis, University of Surrey, 2014.
- [2] Makarewicz G., Morzyński L., Pleban D., *Akustyczne przetworniki o regulowanej kierunkowości w kontekście zmniejszenia narażenia na hałas*, XVII Międzynarodowa Konferencja Noise Control 2022.
- [3] Śląderek Ch. i in., *High-directional beamforming with a miniature loudspeaker array*, DAGA Anchen, 2016, s. 1147–1150.
- [4] Dobrucki A., *Przetworniki elektroakustyczne*, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2007.
- [5] Makarewicz G., *Kierunkowe źródła dźwięku i mikrofony w środowisku pracy*, „Promotor”, 2023, 3: 48–53.
- [6] Kim J.Y. i in., *Design of high-efficiency power amplifier system for high-directional speaker*, IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016.