

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10)

PL 247595 B1

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **442254**

(22) Data zgłoszenia: **2022.09.12**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2024.03.18 BUP 12/2024**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2025.08.04 WUP 31/2025**

(51) MKP:

G10K 11/16 (2006.01)

B32B 33/00 (2006.01)

G10K 11/162 (2006.01)

G10K 11/165 (2006.01)

B32B 3/12 (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:

**INSTYTUT PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW
TECHNIKI POLSKIEJ AKADEMII NAUK,
Warszawa, PL**

(72) Twórca(-y) wynalazku:

**ROBERT KONOWROCKI, Otwock, PL
TOMASZ ZIELIŃSKI, Warszawa, PL
KAMIL OPIELA, Warszawa, PL**

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Mariusz Kondrat, Warszawa, PL

(54) Tytuł:

**Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej poprzez modyfikację
mikrogeometrii warstwy porowatej**

PL 247595 B1

Opis wynalazku

DZIEDZINA TECHNIKI

Przedmiotem wynalazku jest sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku, który można zastosować zarówno w izolacji akustycznej, jak i bezpośrednio do wytłumiania oraz poprawiania akustyki wnętrz lub pomieszczeń wykładzinami akustycznymi. Proponowane rozwiązanie polega na wykorzystaniu unikalnego, hybrydowego materiału porowatego o adaptowalnej mikrostrukturze oraz systemu sterowania. Dzięki temu cechuje je bardzo wysoka skuteczność pochłaniania energii fal akustycznych, generowanych przez źródła o różnych zakresach częstotliwości dźwięku. W związku z powyższym przedmiot wynalazku kwalifikuje się do dziedziny Inżynierii Mechanicznej i Akustyki wg klasyfikacji OECD.

STAN TECHNIKI

Do tłumienia i izolacji fal akustycznych wykorzystywanych jest wiele materiałów, metod i urządzeń, które działają w trybie pasywnym lub – znacznie rzadziej – aktywnym. Znakomitym źródłem wiedzy na temat struktury i sposobu działania tego typu rozwiązań są artykuły naukowe oraz bazy patentowe. Tłumienie fal akustycznych w materiale dźwiękochłonnym związane jest ze zmniejszaniem amplitudy drgań cząstek ośrodka będącego nośnikiem fal dźwiękowych, poprzez rozpraszanie ich energii na mikrostrukturze materiału. Może się to odbywać zarówno w szerszym, jak i ograniczonym zakresie częstotliwości. W przypadku powszechnie stosowanych akustycznych materiałów porowatych pochłanianie dźwięku jest możliwe w dosyć szerokim paśmie, jednak wyłącznie w średnich i wyższych częstotliwościach słyszalnych, o ile przyjmuje się rozsądną (tj. maksymalnie do kilku centymetrów) grubość materiału. Ponadto pochłanianie jest zwykle ograniczone i wyraźnie słabsze w przypadku fal o niższych częstotliwościach. Inne rozwiązania umożliwiają bardzo dobrą, a „tonalnie” nawet całkowitą dźwiękochłonność, jednakże dotyczy to fal akustycznych z określonych, bardzo wąskich pasm częstotliwości. Proponowany, oryginalny materiał ma cechy ośrodka porowatego, przy czym charakteryzuje się znakomitą dźwiękochłonnością wokół projektowanych częstotliwości i dobrym tłumieniem fal o częstotliwościach pomiędzy pikami pochłaniania. Istotą rozwiązania jest jednak możliwość kontrolowanej zmiany mikrostruktury materiału porowatego, prowadząca do przesunięcia częstotliwości, w których efektywna tłumienność jest największa, a w konsekwencji pozwalająca na dostosowanie (adaptowanie) materiału do przewidywanych warunków hałasu. Znane ze stanu techniki materiały i rozwiązania inżynierskie dotyczące tłumienia hałasu bądź izolacji akustycznej nie pozwalają na aktywne adaptowanie mikrostruktury ośrodka dźwiękochłonnego w celu kształtowania efektywnych charakterystyk tłumienia dostosowanych do aktualnie panujących warunków akustycznych.

W publikacji „Acoustic absorption of foams coated with MR fluid under the influence of magnetic field”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, ISSN: 1045-389X, DOI:10.1177-/1045389X09355017, Vol. 21, pp. 125–131, 2010, przedstawiono sposób tłumienia fal akustycznych poprzez użycie porowatych pianek o otwartych komórkach pokrytych płynem magnetoreologicznym (MR). W pracy tej badano dźwiękochłonność pianek poliuretanowych o różnej, pojedynczej i podwójnej porowatości. Pomiary prowadzono na czystych porowatych próbkach oraz tych samych próbkach zwilżonych płynem MR umieszczonym w stałym polu magnetycznym.

W pracy „Active control of acoustic reflection, absorption, and transmission using thin panel speakers”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113, 852, 2003, DOI:10.1121/1.1534834, opisano cienkie panele akustyczne oraz sposób ich sterowania, zapewniający pożądany współczynnik odbicia lub pochłaniania fali akustycznej, co pozwala skutecznie blokować transmisję hałasu w szerokim paśmie częstotliwości. Układ paneli zbudowany jest z tablicy małych aktywatorów z metali ziem rzadkich, do którego podłączony jest sterownik korzystający z mikrofonu.

Znane z opisu patentu PL185933 urządzenie do pochłaniania i tłumienia fal dźwiękowych wyposażone jest w układ, który od strony źródła fal dźwiękowych wykonany jest z cienkiej powłoki aluminium lub jego stopu. Ta podatna na drgania struktura ma układ komór rezonansowych wykonanych z głęboko tłoczonej folii aluminiowej. Jedna strona folii pokryta jest warstwą tworzywa termoplastycznego (polipropylen lub poliestr, lub polietylen oraz podobne materiały). Grubość warstw folii aluminiowej oraz tworzywa jest tego samego rzędu, co warstwa aluminium.

W publikacji PL237210 zaproponowano urządzenie akustyczne o regulowanych parametrach, stosowany w celu akustycznej adaptacji wnętrz poprzez strefową zmianę odbicia, rozproszenia i pochłaniania fal dźwiękowych. Istotą rozwiązania są panele akustyczne wykonane ze sztywnego materiału, których jedna strona ukształtowana jest w powierzchnię rozpraszającą dzięki zastosowaniu „studzienek”,

a przeciwnie, druga strona jest płaska i stanowi powierzchnię odbijającą fale dźwiękowe. Do ściany tylnej ramy zamocowana jest warstwa materiału pochłaniającego fale dźwiękowe. Regulacja obrotowa orientacji paneli umożliwia zmiany właściwości akustycznych ustroju w zakresie rozpraszania, odbijania i pochłaniania dźwięku. Zastosowanie tego ustroju w pomieszczeniach pozwala na dostosowanie jego parametrów do różnych funkcji akustycznych, które mogą się znacząco różnić od siebie.

Opisany w publikacji WO2016083971A1 aktywny izolator/pochłaniacz akustyczny niskiej częstotliwości oparty jest na kontroli przepływu powietrza przez porowate warstwy oporowe. Proponowane urządzenie elektroakustyczne do szerokopasmowego pochłaniania niskich częstotliwości zawiera: (a) co najmniej jeden przetwornik elektroakustyczny, zamontowany na przegrodzie akustycznej, oddzielającej zamkniętą komorę powietrzną tylną od przedniej, która z kolei jest zamknięta warstwą materiału akustycznego o określonej oporności przepływu powietrza; (b) elektroniczny wzmacniacz mocy z kontrolą sprzężenia zwrotnego, skonfigurowany do uzyskiwania prędkości drgań membrany przetwornika proporcjonalnej do napięcia wejściowego, pochodzącego z mikrofonu umieszczonego z przodu warstwy materiału akustycznego po stronie przeciwnej do przedniej przestrzeni powietrznej; oraz (c) sterowanie ze sprzężeniem wyprzedzającym, z regulowanym wzmocnieniem i filtrem pasmowo-przepustowym, pobierające sygnał ciśnienia pochodzący z mikrofonu.

Opis patentowy CN100358005C ujawnia system aktywnej kontroli hałasu dla pomp hydraulicznych, który składa się z osłony dźwiękochłonnej, tłumika, źródła sterowania, mikrofonu, obrotomierza i wielokanałowego samoadaptacyjnego aktywnego sterownika. Rozwiązanie to może nie tylko sterować pompami hydraulicznymi przy składowych hałasach powyżej 600 Hz, ale także przy składowych poniżej 600 Hz. Rozwiązanie to ma zalety wysokiej automatyzacji i dobrej dźwiękoszczelności w zakresie niskich częstotliwości, wzoru użytkowego.

Z opisu wzoru użytkowego CN202334863U znany jest system złożonej struktury „inteligentnej” do izolacji drgań i redukcji szumów. Istotne elementy systemu stanowią: czujnik piezoelektryczny ze sprzężeniem zwrotnym, górna izolacyjna warstwa przejściowa, górna elektroda elastyczna, moduł wykonawczy, dolna elektroda elastyczna, dolna izolacyjna warstwa przejściowa oraz dolny czujnik piezoelektryczny. Czujnik piezoelektryczny ze sprzężeniem zwrotnym, jednostka wykonawcza i piezoelektryczny czujnik dolny są połączone ze sterownikiem za pomocą przewodów elektrycznych. Gdy jeden czujnik wykryje drgania, sterownik przykładą napięcie sterujące na elektrodę pokrytą powierzchnią polimeru aktywnego elektrycznie, zgodnie z różnymi strategiami i algorytmami sterowania tak, aby sterować przenoszeniem drgań w sposób odwrotny, a drugi czujnik piezoelektryczny pełni funkcję nadzorczą jako element sprzężenia zwrotnego.

Opis patentowy US5692053A prezentuje aktywną obudowę do redukcji hałasu. Źródło hałasu jest zamknięte w obudowie, na której ścianach znajdują się aktywatory drgań akustycznych. Alternatywnym dla nich rozwiązaniem mogą być głośniki umieszczone wewnątrz obudowy, przy czym w obu przypadkach, aktywatory lub głośniki służą do wzbudzenia kontrolowanych drgań obudowy. Szereg mikrofonów lub czujników w postaci pasków PVDF umieszczonych na ścianach obudowy znajduje się w polu akustycznym generowanym przez źródło hałasu zamknięte w aktywnej obudowie. Kontroler wykrywa poziomy hałas obserwowanego dzięki mikrofonom lub czujnikom wykonanym z folii PVDF i dostosowuje wejściowe sygnały oscylacyjne (pod względem zawartości częstotliwości, fazy i amplitudy) przesyłane do aktywatorów lub głośników generujących „kontrujące” wibracje obudowy mające na celu zminimalizowanie emitowanego dźwięku.

Znane ze stanu techniki sposoby i urządzenia tłumiące stosuje się do eliminacji fal akustycznych w określonym, ograniczonym zakresie częstotliwości. Metody te oraz urządzenia je realizujące cechują zwykle charakterystyki dopasowane do danego zastosowania. Podobne ograniczenie stosowalności dotyczy również znanych (konwencjonalnych) akustycznych materiałów porowatych i innych tego typu struktur i kompozytów, które nie pozwalają na wydajne kształtowanie charakterystyk tłumienia fali akustycznej, szczególnie w przypadku źródeł dźwięku o różnej, zmieniającej się częstotliwości, natężeniu oraz kierunku rozchodzenia.

UJAWNienie WYNAŁAZKU

Wynalazek dotyczy sposobu adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej poprzez modyfikację mikrogeometrii warstwy porowatej, który obejmuje etapy, w których pod wpływem działania pola elektromagnetycznego modyfikowana jest wewnętrzna mikrogeometria hybrydowej struktury porowatej umieszczonej w zasięgu działania tegoż pola elektromagnetycznego, które powoduje istotną projektowaną zmianę położenia kulistych elementów ferromagnetycznych wewnątrz dużych porów hybry-

dowej struktury porowatej, przy czym: **a)** hybrydowa struktura porowata wykonana jest z materiału dielektrycznego i ma charakter struktury regularnej, warstwowej, wytworzonej jako zestawienie ze sobą wielu celek periodycznych; **b)** każda celka periodyczna ma zewnętrznie kształt prostopadłościanu o wymiarach H , B , D i ma umiejscowiony centralnie duży sferyczny por, zaś w każdym z ośmiu rogów celki znajduje się po 1/8-mej małego pora; ponadto każda celka ma sześć szerokich kanałów wychodzących ze środka dużego pora wzdłuż osi X , Y , Z , oraz osiem wąskich, ukośnych kanałów łączących duży por centralny z małymi porami narożnymi; **c)** kulisty element ferromagnetyczny, umieszczony we wnętrzu dużego pora, ma średnicę większą niż przekrój szerokich kanałów tak, że może blokować jeden z nich, gdy zostanie odpowiednio przemieszczony ku jego wejściu, odblokowując tym samym wąskie kanały ukośne; **d)** pod wpływem kontrolowanego pola elektromagnetycznego, wytworzonego przez cewkę elektromagnesu i działającego na hybrydową strukturę porowatą, przemieszczeniu ulegają kuliste elementy ferromagnetyczne, które w efekcie blokują szerokie kanały poziome łączące duże pory na kierunku równoległym do kierunku propagacji fali akustycznej; **e)** sterując natężeniem prądu elektrycznego przepływającego przez cewkę elektromagnesu, reguluje się odpowiednio zmniejszając lub zwiększając zakres oddziaływania pola elektromagnetycznego na hybrydową strukturę porowatą, przez co modyfikacja mikrogeometrii tejże struktury porowatej następuje w kolejnych warstwach celek periodycznych dzięki czemu można zmieniać efektywną dźwiękochłonność struktury porowatej dostosowując tzw. piki współczynnika pochłaniania dźwięku do częstotliwości fal generujących największy poziom hałasu, o ile częstotliwości te znajdują się w zaprojektowanym zakresie.

W korzystnym sposobie adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej celka periodyczna ma zewnętrznie kształt prostopadłościanu o podstawie kwadratowej gdzie $B=D$, korzystniej sześciianu gdzie $H=B=D$.

W korzystnym sposobie pole magnetyczne oddziałuje od pierwszej do ostatniej warstwy celek periodycznych.

W korzystnym sposobie zarówno szersze kanały i węższe ukośne kanały celki periodycznej mają kształt prostych cylindrów.

W korzystnym sposobie ukośne kanały celki periodycznej mają kształt nieregularny, korzystnie w postaci spirali, w celu zmaksymalizowania krętości drogi przepływu przez te kanały (w kontraście do małej krętości przepływu przez szerokie, proste kanały poziome).

W korzystnym sposobie do sterowania zasięgiem oddziaływania pola elektromagnetycznego wytwarzanym przez elektromagnes stosuje się sterownik elektromagnesu połączony z elektromagnesem za pomocą przewodów elektrycznych, który to sterownik elektromagnesu zawiera zaimplementowany algorytm sterujący elektromagnesem jako źródłem pola magnetycznego oddziałującego na hybrydową strukturę porowatą w celu modyfikacji mikrogeometrii sieci porów, co prowadzi do korzystnej zmiany oscylacyjnego przepływu powietrza w porach, a tym samym maksymalnie zwiększa dyssypację energii fal akustycznych o częstotliwościach zgodnych z dominującymi częstotliwościami hałasu.

Sposób korzystnie realizowany jest za pośrednictwem sterownika elektromagnesu, który łączy się przez przedwzmacniacz z mikrofonem, przy czym za pomocą mikrofonu mierzone jest ciśnienie akustyczne w odpowiednio dobranych punktach otoczenia hybrydowej struktury porowatej, a sygnał zarejestrowany przez mikrofon wzmacniany jest przez przedwzmacniacz i poprzez połączenie elektryczne przekazywany jest do sterownika elektromagnesu, gdzie jako sygnał wejściowy jest przetwarzany i na podstawie m.in. analizy częstotliwościowej sygnału sterownik elektromagnesu generuje i przekazuje przez przewód elektryczny sygnał sterujący elektromagnesem na cewkę elektromagnesu, przez co, w zależności od wartości prądu dostarczonego do elektromagnesu, wytwarzane jest silniejsze bądź słabsze pole elektromagnetyczne o kontrolowanym w ten sposób zasięgu, który obejmować może całą warstwę hybrydowej struktury porowatej lub tylko jej część, dzięki czemu efektywna dźwiękochłonność rzeczony struktury porowatej może być dostrajana (maksymalizowana) do fal akustycznych o zidentyfikowanych częstotliwościach hałasu, przy czym adaptacji tej dokonuje się w sposób płynny w szerokim zakresie dostępnych częstotliwości.

Sposób korzystnie realizowany jest wykorzystując matrycę zawierającą co najmniej dwa, korzystniej wiele zestawionych ze sobą modułów hybrydowej struktury porowatej, zaopatrzonych w elektromagnesy połączone ze sobą systemem okablowania, którymi to elektromagnesami steruje się za pomocą sterownika elektromagnesu w celu optymalnej adaptacji własności akustycznych dla całej matrycy modułów hybrydowej struktury porowatej tworzącej okładzinę dźwiękochłonną bądź izolacyjną barierę akustyczną o zasadniczo dużej powierzchni.

W korzystnym sposobie sterownik elektromagnesu generuje sygnał sterujący podawany na wzmacniacz sygnału podłączony do wielomodułowej matrycy hybrydowej struktury porowatej, w zależności od trybu pracy danego urządzenia generującego hałas, dzięki czemu stosowany jest uproszczony, a zarazem bardzo stabilny system kontrolny wykorzystujący predefiniowane sygnały sterujące zoptymalizowane dla możliwych trybów lub stanów pracy urządzenia hałasującego.

Istotą wynalazku jest zatem sposób adaptacyjnego pochłaniania fal dźwiękowych, przeznaczony do zastosowania w zaawansowanych (tzw. „inteligentnych”) systemach izolacji akustycznej i okładzin lub paneli dźwiękochłonnych. Proponowany sposób bazuje na wykorzystaniu hybrydowej struktury porowatej wykonanej z materiału niemagnetycznego, np. polimeru lub innego dielektryka, oraz zawierającej we wnętrzach największych porów elementy ferromagnetyczne, np. w postaci małych metalowych kulek. Geometria struktury jest okresowa, tzn. ma postać sieci identycznych komórek, tzw. celek periodycznych, o kształcie sześciangu (ewentualnie innego prostopadłościanu), przy czym we wnętrzu każdej celki znajdują się kanały (w najprostszym przypadku cylindryczne, choć mogą one mieć bardziej skomplikowany kształt, np. spirali) o różnych rozmiarach (średnicach) i orientacji przestrzennej, które łączą ze sobą pory. Dzięki temu geometria struktury, choć okresowa, a więc zasadniczo regularna, ma jednak charakter dosyć zróżnicowany. Ma to na celu uzyskanie własności typowych dla dobrych akustycznych materiałów porowatych, które dzięki zróżnicowanym rozmiarom porów i łączących je okien lub kanałów zapewniają dobrą skuteczność dyssypacji energii fal dźwiękowych w szerokich pasmach częstotliwości.

Gdy kanały nie mają kształtu zasadniczo prostych cylindrów, a przybierają kształty nieregularne, np. spiralne lub o istotnie falistych ściankach, obserwuje się zwiększone spowolnienie i większe rozproszenie fali dźwiękowej propagującej w materiale o tak zaprojektowanej mikrostrukturze. Dzięki temu znacznie zwiększa się zdolność pochłaniania fal dźwiękowych przez hybrydową strukturę porowatą, co pozwala również uzyskać lepszą izolację akustyczną, gdy materiał ten zastosowany jest jako element obudowy lub przegrody akustycznej, w tym również w ramach proponowanego sposobu adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej.

Kanały łączą pory w ramach tej samej celki oraz pomiędzy sąsiadującymi celkami periodycznymi, tworząc w ten sposób otwartą sieć porów wypełnioną powietrzem, które jest nośnikiem dla fal akustycznych penetrujących materiał. Cechą wyróżniającą zaproponowanego materiału hybrydowego jest to, że w głównym, największym porze każdej celki umieszczony jest pojedynczy element ferromagnetyczny o rozmiarze nieco większym niż największa średnica kanałów lub okien łączących dany por z innymi porami. Element ten, pozostając we wnętrzu pora, może być jednak przemieszczany w jego przestrzeni za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego, a odpowiednie jego pozycjonowanie ma na celu blokowanie jednych kanałów łączących pory, a w konsekwencji otwieranie drogi przez inne kanały o zasadniczo różnej orientacji i średnicy, a nawet kształcie. W ten sposób można wpływać na własności dźwiękochłonne takiego ośrodka porowatego o modyfikowalnej strukturze. Wiąże się to z faktem, że fale akustyczne penetrujące materiał porowaty powodują oscylacyjny przepływ lepki cząstek powietrza wypełniającego otwartą sieć porów. Przepływ ten, a w zasadzie jego charakter związany z rozmiarami kanałów i porów oraz z krętością drogi, którą kierowany jest główny strumień przepływu, ma ogromny wpływ na dyssypację energii fal dźwiękowych. Wraz z innymi czynnikami, jak np. grubość materiału, wpływa on m.in. na częstotliwości fal, których energia podlega największemu rozpraszaniu w materiale. Zatem modyfikacja charakteru przepływu dokonana poprzez zmianę położenia elementów ferromagnetycznych w głównych porach materiału prowadzi do przesunięcia częstotliwości, wokół których pochłanianie dźwięku przez materiał jest największe. Aby to kontrolować, hybrydowa struktura porowata znajduje się w zasięgu strumienia pola magnetycznego, którego natężeniem i zasięgiem można sterować. Modyfikacja pola magnetycznego pozwala dostosowywać linie pola magnetycznego tak, że mogą one obejmować wszystkie elementy ferromagnetyczne hybrydowej struktury porowatej, bądź tylko te znajdujące się w warstwach materiału położonych najbliżej źródła strumienia magnetycznego, którym są elektromagnesy umieszczone bezpośrednio za strukturą. Gdy pole magnetyczne zostaje wyłączone, położenie elementów ferromagnetycznych wynika tylko z działania na nie pola grawitacyjnego, choć można również projektować specyficzne rozwiązania, w których na ich położenie wpływ mają również siły bezwładności, np. siła odśrodkowa w przypadku, gdy hybrydowa struktura porowata stanowi okładzinę elementów znajdujących się w ruchu obrotowym.

Polem magnetycznym należy sterować, zatem do elektromagnesów podłączony jest wzmacniacz sterowany przez elektroniczny układ kontrolny, który przetwarza sygnały z podłączonego do niego miernika hałasu tj. mikrofonu, ewentualnie kilku mikrofonów umieszczonych w odpowiednio dobranych lokalizacjach. Mikrofony mierzą poziom ciśnienia akustycznego przed adaptowalną hybrydową strukturą

porowatą. Pomierzone sygnały przesyłane są do systemu sterowania, który je analizuje (chodzi głównie o rozpoznanie częstotliwości największego natężenia hałasu) i na tej podstawie ustala natężenie prądu, który zostaje przesłany do elektromagnesów w celu zoptymalizowania dźwiękochłonności okładziny porowatej.

W wielu praktycznych przypadkach można zastosować o wiele prostszy system adaptacji hybrydowego materiału dźwiękochłonnego, który nie wymaga miernika dźwięku ani zaawansowanego systemu sterowania pracującego w trybie ciągłym. Jest to preferowane rozwiązanie, które powinno być implementowane np. wtedy, gdy materiał został zastosowany jako okładzina dźwiękochłonna w pomieszczeniu, w którym pracuje określone (tj. znane, zainstalowane na stałe) urządzenie hałasujące lub też jako element izolacji akustycznej tego urządzenia (**Fig. 8**). Przy założeniu, że charakterystyka generowanego hałasu została zbadana (co jest standardową procedurą inżynierską) i stwierdzono, że w sposób bezpośredni i stabilny zależy od trybu pracy maszyny (co jest typowe, np. urządzenia napędzane silnikiem generują zwykle hałas o wyższych częstotliwościach przy większych prędkościach obrotowych pracy silnika), pole magnetyczne może być automatycznie włączane/wyłączane lub przełączane na różne wartości w zależności od trybu pracy urządzenia. Nie wymaga to skomplikowanego systemu kontroli ciągłej, a jedynie sprzężenia np. biegu pracy maszyny lub miernika prędkości obrotowej ze wzmacniaczem sterującym elektromagnesem.

Podstawową geometrię proponowanego adaptowalnego materiału periodycznego oraz ideę adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej przedstawiają poniższe rysunki (**Fig. 1–5**). Przedstawiono na nich widoki elementarnych celek periodycznych (**Fig. 1**) oraz przekroje szkieletu **1** przykładowej mikrostruktury periodycznej o porowatości otwartej, którą wypełnia powietrze, wraz z elementami ferromagnetycznymi w postaci kulek **2** umieszczonymi pojedynczo wewnątrz największych sferycznych porów **5**. Pory te połączone są ze sobą bezpośrednio za pomocą głównych, szerokich, poziomych (oraz pionowych) kanałów cylindrycznych **3**. Ponadto, połączone są one również poprzez kanały ukośne (**4a** lub **4b**) prowadzące przez małe pory „narożne” **19**. Kanały ukośne mają zasadniczo mniejszą średnicę niż kanały główne. Mogą także mieć zaprojektowany specyficzny kształt zapewniający dużą krętość drogi przepływu, jak w przypadku proponowanych kanałów spiralnych **4b**, co jeszcze bardziej odróżnia je od poziomych kanałów cylindrycznych.

Zakładając poziomy kierunek propagacji dźwięku, zmiana lokalizacji elementów ferromagnetycznych (np. stalowych kulek) powoduje zmianę charakteru oscylacyjnego przepływu powietrza wewnątrz rozpatrywanej sieci porów. Przepływ ten związany jest z propagacją fal akustycznych oraz dyssypacją ich energii w tak adaptowalnym materiale porowatym. Lokalizacja elementów ferromagnetycznych, np. stalowych kulek **2**, w periodycznej mikrostrukturze na spodzie największych sferycznych porów **5**, ukierunkowuje oscylacyjny przepływ powietrza (zaznaczony strzałkami na **Fig. 4a** i **4b**) niemal wyłącznie poprzez szerokie i proste kanały poziome **3** o osiach zgodnych z kierunkiem propagacji. Zmiana pozycji elementów ferromagnetycznych, w rozpatrywanym przypadku stalowych kulek w porach (jak to pokazano na **Fig. 3c** oraz **Fig. 4c** i **4d**), inicjowana oddziaływaniem linii pola magnetycznego, wywołuje znaczne ograniczenie przepływu powietrza przez szerokie kanały poziome **3** i wymusza bardziej krętą drogę przepływu przez wąskie kanały ukośne **4a** lub (w przypadku realizacji bardziej zaawansowanego projektu) spiralne kanały ukośne **4b** prezentowane na **Fig. 2** i **3**. Dotyczy to oczywiście tylko tych warstw czy raczej periodycznych celek materiału, które znajdują się w zasięgu pola magnetycznego. W rezultacie modyfikacji ulegają właściwości struktury porowatej, tj. cechy charakterystyczne sieci porów takie jak krętość, długość charakterystyczna oraz przepuszczalność związane z efektami lepkości. Są to właściwości kluczowe dla propagacji i pochłaniania dźwięku w materiale porowatym. W zilustrowanym na **Fig. 2c** i **Fig. 3c** oraz **Fig. 4c** i **Fig. 4d** wariancie, gdy na stalowe kulki działa silne pole magnetyczne powodujące zablokowanie wszystkich kanałów poziomych o osiach zgodnych z kierunkiem propagacji, krętość głównego strumienia przepływu jest znacznie większa, natomiast przepuszczalność i długość charakterystyczna lepka są znacznie mniejsze niż w przypadku pokazanym na **Fig. 2a** i **Fig. 3a** oraz **Fig. 4a** i **Fig. 4b**, gdzie kulki nie ograniczają przepływu przez szerokie kanały poziome wskutek działania pola magnetycznego. Różnice w wartościach tych kluczowych parametrów przekładają się bezpośrednio na inny charakter pochłaniania dźwięku przez warstwę materiału porowatego o danej grubości, a w konsekwencji również na charakter izolacyjności akustycznej, gdy przykładowo rzeczona warstwa porowata stanowi rdzeń izolacyjnej przegrody warstwowej.

W proponowanej metodzie, sterowanie lokalizacją ferromagnetycznych kulek **2** we wnętrzu głównych sferycznych porów **5** realizowane jest za pomocą pola magnetycznego generowanego przez elektromagnes **6**, przez którego uzwojenie przepływa prąd o kontrolowanym natężeniu. Zasadniczo pozycja

kulek w porach może być modyfikowana w miarę płynnie poprzez zmianę natężenia prądu, a co za tym idzie – zmianę strumienia pola magnetycznego, którego zasięg może być w ten sposób kontrolowany (por. **Fig. 2b i 2c** oraz **Fig. 3b i 3c**). W efekcie możliwe jest uzyskanie porowatego materiału gradientowego o aktywnie modyfikowalnej mikrostrukturze, w której położenie kulki wewnątrz pora zależy od intensywności pola magnetycznego wywołanego przez elektromagnes **6** i zasięgu linii tego pola **8**. Odpowiednia modyfikacja mikrostruktury materiału porowatego ma na celu dostosowywanie poziomu pochłaniania dźwięku lub izolacyjności akustycznej do konkretnej częstotliwości w zaprojektowanym zakresie, co jest nieosiągalne w okładzinach i przegrodach akustycznych wykonanych z konwencjonalnych materiałów.

Badania eksperymentalne wykonane na wytworzonej przyrostowo prototypowej próbce rozpatrywanej hybrydowej struktury porowatej z ukośnymi kanałami prostymi potwierdziły przewidywania analiz teoretycznych przeprowadzonych przy użyciu modelu numerycznego zaprojektowanej struktury porowatej. Otrzymane wyniki obliczeń numerycznych (**Fig. 6**) udowodniły, że zaproponowany sposób pozwala na kształtowanie charakterystyk pochłaniania dźwięku w czasie rzeczywistym przy zachowaniu stałej grubości okładziny porowatej, a co za tym idzie, jest szczególnie wydajny do pochłaniania i izolacji dźwięków generowanych w sytuacjach, gdy źródła hałasu mogą ulegać zasadniczej zmianie polegającej na istotnym przesunięciu zakresów dominujących częstotliwości.

Wyżej wymienione cechy i zalety rozpatrywanego sposobu adaptacyjnego pochłaniania i izolacji fal akustycznych pozwalają efektywnie tłumić lub izolować hałas o różnym charakterze częstotliwościowym, który może podlegać istotnym zmianom. Umożliwia to realizację skutecznej okładziny dźwiękochłonnej bądź bariery akustycznej, której wydajność można aktywnie dostosowywać do zmian otoczenia.

W korzystnym sposobie adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej zarówno szerokie jak i wąskie kanały wewnątrz celki periodycznej mają kształt prostych cylindrów.

W korzystnym sposobie adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej co najmniej wąskie kanały ukośne wewnątrz celki periodycznej mają kształt nieregularny, korzystnie wybrany ze spiralnego lub falowanego.

W korzystnym sposobie adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej zarówno szerokie jak i wąskie kanały wewnątrz celki periodycznej mają kształt nieregularny, korzystnie wybrany ze spiralnego lub falowanego.

W korzystnym sposobie adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej do sterowania zakresem oddziaływania pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez elektromagnes na hybrydową strukturę porowatą stosuje się sterownik elektromagnesu połączony z elektromagnesem za pomocą przewodów elektrycznych, który to sterownik elektromagnesu zawiera zaimplementowany w swoim wnętrzu algorytm sterujący elektromagnesem.

W korzystnym sposobie adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej sposób ten realizuje się za pośrednictwem sterownika elektromagnesu połączonego przez przedwzmacniacz z mikrofonem, przy czym za pomocą mikrofonu mierzy się poziom ciśnienia akustycznego w otoczeniu hybrydowej struktury porowatej, a zarejestrowany przez mikrofon sygnał wzmacnia się przez przedwzmacniacz i poprzez połączenie elektryczne przekazuje się do sterownika elektromagnesu, gdzie przetwarza się sygnał wejściowy z mikrofonu, na którego podstawie sterownik elektromagnesu przekazuje przez przewód elektryczny sygnał sterujący elektromagnesem na cewkę elektromagnesu, przez co w zależności od wartości prądu dostarczonego do elektromagnesu generuje się większe bądź mniejsze pole elektromagnetyczne, przez co zmienia się zakres i zasięg linii pola elektromagnetycznego obejmującego hybrydową strukturę porowatą.

W korzystnym sposobie adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej sposób realizuje się wykorzystując co najmniej dwa zestawione ze sobą moduły hybrydowej struktury porowatej oraz co najmniej dwa elektromagnesy zestawione ze sobą i połączone systemem okablowania, którymi to elektromagnesami steruje się wspólnie za pomocą sterownika elektromagnesu, a sygnał wychodzący ze sterownika korzystnie wzmacnia się przez wzmacniacz sygnału.

W korzystnym sposobie adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej reguluje się natężenie pola elektromagnetycznego za pomocą natężenia prądu przepływającego przez cewkę elektromagnesu i eliminuje bądź ogranicza się dźwięk w różnych zakresach (o wysokiej częstotliwości, średniej częstotliwości i niskiej częstotliwości) poprzez odpowiednie ukierunkowanie oscylacyjnego przepływu powietrza w hybrydowej strukturze porowatej wskutek regulacji zasięgu linii pola elektromagnetycznego obejmującego hybrydową strukturę porowatą.

SZCZEGÓŁOWE PRZEDSTAWIENIE WYNAŁAZKU

KRÓTKI OPIS FIGUR RYSUNKU

Kilka przykładów realizacji wynalazku zostało opisane poniżej i zilustrowane na schematach przedstawionych na **Fig. 1**, **Fig. 5**, **Fig. 7** i **8**. Ponadto, kilka etapów modyfikacji mikrogeometrii hybrydowej struktury porowatej, realizowalnych zaproponowaną metodą, pokazano na **Fig. 2 (a, b, c)**, **Fig. 3 (a, b, c)** oraz **Fig. 4**. Dodatkowo przedstawiono wyniki uzyskane z analiz numerycznych potwierdzające skuteczność opisywanego sposobu adaptacyjnego pochłaniania dźwięku (**Fig. 6**). Na poszczególnych rysunkach przedstawiono, co następuje:

Fig. 1 – przedstawia: **a)** wewnętrzną strukturę elementarnej celki periodycznej z prostymi cylindrycznymi kanałami wzdłuż osi X, Y, Z oraz wąskimi, cylindrycznymi kanałami skierowanymi ukośnie do tych osi; **b)** wewnętrzną strukturę celki periodycznej z prostymi cylindrycznymi kanałami wzdłuż osi X, Y, Z i spiralnie skręconymi wąskimi kanałami głównych osiach skierowanymi ukośnie do tych osi; **c)** oraz **d)** wygląd zewnętrzny elementarnych celek periodycznych, pokazanych na a) i b), z oznaczeniami wymiarów ich boków (celki mają kształt prostopadłościanów, przy czym w badanym przypadku są sześciścianami, zatem $H=B=D$).

Fig. 2 – przedstawia: **a)** przekrój przykładowej hybrydowej struktury porowatej z prostymi, wąskimi kanałami umiejscowionymi ukośnie do kierunku szerokich kanałów poziomych, niepoddanej działaniu pola magnetycznego (zatem kulki stalowe znajdują się na spodzie głównych porów i nie blokują szerokich kanałów poziomych) oraz schemat potencjalnego źródła pola magnetycznego; **b)** przekrój tej samej hybrydowej struktury porowatej poddanej działaniu pola magnetycznego o ograniczonej intensywności i zasięgu obejmującym tylko fragment materiału, w którym następuje przemieszczenie kulek stalowych prowadzące do zablokowania kanałów poziomych, przez co oscylacyjny przepływ powietrza w tym obszarze materiału skierowany jest przez wąskie kanały ukośnie; **c)** przekrój hybrydowej struktury porowatej poddanej działaniu pola magnetycznego o większej intensywności i zasięgu oddziaływania niż w przypadku pokazanym na schemacie b).

Fig. 3 – przedstawia: **a)** przekrój przykładowej hybrydowej struktury porowatej ze spiralnymi kanałami skierowanymi ukośnie do kierunku szerokich cylindrycznych kanałów poziomych, niepoddanej działaniu pola magnetycznego (zatem kulki stalowe znajdują się na spodzie głównych porów i nie blokują szerokich kanałów poziomych) oraz schemat potencjalnego źródła pola magnetycznego; **b)** przekrój hybrydowej struktury porowatej ze spiralnymi kanałami ukośnymi, poddanej działaniu pola magnetycznego o ograniczonej intensywności zasięgu obejmującym tylko fragment materiału, w którym następuje przemieszczenie kulek stalowych prowadzące do zablokowania kanałów poziomych, przez co oscylacyjny przepływ powietrza w tym obszarze materiału skierowany jest przez spiralne kanały ukośne charakteryzujące się dużą krętością drogi przepływu; **c)** przekrój hybrydowej struktury porowatej ze spiralnymi kanałami ukośnymi, poddanej działaniu pola magnetycznego o większej intensywności i zasięgu oddziaływania niż w przypadku pokazanym na schemacie b).

Fig. 4 – przedstawia linie oscylacyjnego przepływu powietrza związanego z propagacją fali dźwiękowej w powiększonych fragmentach hybrydowych struktur porowatych: **a)** z prostymi kanałami ukośnymi bez pola magnetycznego, **b)** ze spiralnymi kanałami ukośnymi bez pola magnetycznego, **c)** z prostymi kanałami ukośnymi w polu magnetycznym o maksymalnym zasięgu, **d)** ze spiralnymi wąskimi kanałami w polu magnetycznym o maksymalnym zasięgu.

Fig. 5 – przedstawia schematycznie elementy składowe systemu (a także stanowiska badawczego do testowania prototypowych próbek materiałów adaptowalnych) pozwalającego zrealizować sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej poprzez modyfikację mikrogeometrii hybrydowej struktury porowatej.

Fig. 6 – przedstawia wyniki analiz numerycznych wskazujące efekty adaptacyjnego pochłaniania dźwięku poprzez modyfikację polem magnetycznym mikrogeometrii dwóch hybrydowych struktur porowatych: z prostymi wąskimi kanałami ukośnymi oraz ze spiralnymi kanałami ukośnymi.

Fig. 7a i 7b – przedstawiają widoki układu elementów składowych wykorzystywanych dla realizacji sposobu adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej poprzez modyfikację mikrogeometrii wielomodułowej macierzy hybrydowej struktury porowatej.

Fig. 8a i 8b – przedstawiają widoki układu realizacji adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej, w którym sterowanie mikrogeometrią wielomodułowej macierzy hybrydowej struktury porowatej zależy bezpośrednio od trybu pracy maszyny (urządzenia będącego źródłem hałasu) i przez to nie wymaga zaawansowanego systemu kontroli ani mierników dźwięku.

PRZYKŁADY:

Przykład 1. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej poprzez modyfikację mikrogeometrii pojedynczego modułu hybrydowej struktury porowatej o prostych, wąskich kanałach ukośnych

Z materiałów przedstawionych w Tabelach 1 i 2 wytworzono kilka wariantów pojedynczej hybrydowej struktury porowatej.

Tabela 1. Stosowane materiały nieferromagnetyczne i ich parametry

Materiał	Parametry		
	Przenikalność magnetyczna	Gęstość	Indukcja nasycenia
	$\mu_r = [A/m]$	$\rho = [kg/m^3]$	$B_s = [T]$
Metale niemagnesowalne			
Aluminium	1,000020	2 700	-
Miedź	0,99999	8 960	-
Terpolimer ABS	~1	1 070	-
Polilaktyd	~1	1 300	-
Fotopolimer	~1	1 090	-

Tabela 2. Stosowane materiały ferromagnetyczne elementów kulistych hybrydowej struktury porowatej i ich parametry

Materiał	Parametry		
	Przenikalność magnetyczna	Gęstość	Indukcja nasycenia
	$\mu_r = [A/m]$	$\rho = [kg/m^3]$	$B_s = [T]$
Metale magnesowalne			
Permaloj	25 000	8 600	0,8
Supermaloj	45 000	8 650	0,9
Hyperm	120 000	9 450	0,8

Celka periodyczna stanowi element podstawowy budujący strukturę porowatą **1**, którą tworzy wiele celek zestawionych/połączonych w jednym module hybrydowej struktury porowatej, tak, że szerokie kanały **3** sąsiadujących celek łączą się ze sobą oraz odpowiednie części tworzące mniejsze pory **19** zestawione są ze sobą. Moduły są zestawiane, tworząc adaptowalne warstwy dźwiękochłonne lub bariery akustyczne. Geometria modułu hybrydowej struktury porowatej o wymiarach 6 na 3 na 3 cm (element **1** na Fig. 5) składa się z 6 x 6 x 10 celek periodycznych o porach połączonych szerokimi kanałami cylindrycznymi **3** wzdłuż osi X, Y, Z oraz ukośnymi, wąskimi kanałami cylindrycznymi **4a** (Fig. 1a). Każda celka ma wysokość H, szerokość B i grubość D równą 5 mm (por. celka sześcienna na Fig. 1c). Projektowana średnica dużego pora **5** wynosi 4,36 mm, a średnica małego pora **19** ma 1,76 mm, natomiast średnica szerokiego kanału **3** jest równa 1,36 mm, a średnica wąskiego kanału **4a** wynosi 0,76 mm. Prototypowy moduł hybrydowej struktury porowatej wykonano z polimeru termoplastycznego ABS, wykorzystując technologię druku 3D, przy czym w trakcie wydruku w dużym porze każdej celki umieszczono ferromagnetyczny element kulisty (kulkę stalową). Schemat stanowiska badawczego pokazany na Fig. 5 przedstawia układ elementów, składający się z modułu hybrydowej struktury porowatej **1**, do którego zamocowany jest elektromagnes **6** podłączony kablem elektrycznym **11** do sterownika **7**, do którego z kolei podłączony jest mikrofon **13** za pośrednictwem kabli elektrycznych **10** i przedwzmacniacza **9**. Jak już wspomniano, szkielet hybrydowej struktury porowatej **1** wykonany jest z materiałów nieferromagnetycznych (Tab. 1), w którego wnętrzu znajdują się (regularnie rozmieszczone w każdym z dużych porów) kuliste elementy z materiału ferromagnetycznego (Tab. 2).

Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej realizowany jest wykorzystując mikrofon **13** mierzący fale akustyczne (hałas) z otoczenia, w którym znajduje się hybrydowa struktura porowata **1** (Fig. 5). Zarejestrowany przez mikrofon **13** sygnał jest wzmacniany przez przedwzmacniacz **9** i przekazywany do sterownika **7** poprzez połączenie elektryczne **10**. W sterowniku **7** sygnał z mikrofonu **13** jest przetwarzany, dokonywana jest analiza FFT (tj. analiza widma częstotliwościowego sygnału, mająca na celu znalezienie częstotliwości fal o największej amplitudzie, czyli odpowiedzialnych

za największy poziom hałasu), a następnie algorytm sterujący w zależności od przekazanego wyniku generuje sygnał przekazywany do wzmacniacza sygnału będącego integralną częścią sterownika 7. Odpowiednio wysterowany sygnał prądowy ze zintegrowanego ze sterownikiem 7 wzmacniacza poprzez przewód elektryczny 11 podawany jest na cewkę 12 elektromagnesu 6, który generuje pole magnetyczne. Sterując wartością prądu dostarczonego do cewki 12 elektromagnesu 6 można zmieniać moc oraz zasięg pola magnetycznego 8 penetrującego hybrydowy materiał porowaty (jak to pokazano na Fig. 3).

Zastosowany do realizacji sposobu adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej moduł hybrydowej struktury porowatej 1 (Fig. 1) jest wypełniony powietrzem oraz posiada kuliste elementy ferromagnetyczne 2 umieszczone pojedynczo wewnątrz jego największych sferycznych porów 5. Oddziaływanie pola magnetycznego 8 generowanego przez elektromagnes 6 wpływa na zmianę lokalizacji kulistych elementów ferromagnetycznych 2, co z kolei zamyka/otwiera kanały danego typu powodując zmianę charakteru oscylacyjnego przepływu powietrza w rozpatrywanej sieci porów. Przepływ ten (zaznaczony strzałkami na Fig. 4) zasadniczo wiąże się z propagacją fal akustycznych oraz dyssypacją ich energii w hybrydowej strukturze porowatej. Zmieniając jego charakter (poprzez drobną modyfikację mikrostruktury) można dostosowywać efektywną dźwiękochłonność porowatego materiału adaptowalnego do wybranych częstotliwości fal akustycznych. I tak w przypadku braku oddziaływania pola magnetycznego (Fig. 2a, 3a, 4a, 4b) na kuliste elementy ferromagnetyczne 2, oscylacyjny przepływ powietrza skierowany jest niemal wyłącznie poprzez szerokie kanały poziome 3. Zmiana pozycji kulistych elementów ferromagnetycznych 2 w dużych porach 5, inicjowana oddziaływaniem pola magnetycznego, blokuje przepływ powietrza przez szerokie kanały poziome 3 i wymusza bardziej krętą drogę przepływu przez wąskie kanały ukośne 4. Dotyczy to oczywiście tylko tych warstw, czy raczej periodycznych celek materiału o hybrydowej strukturze porowatej 1, które znajdują się w zasięgu pola magnetycznego (Fig. 2b i 2c oraz Fig. 3b i 3c). W przypadku maksymalnego zasięgu pola magnetycznego krętość mikrostruktury jest jednorodnie zwiększona w całej warstwie materiału hybrydowego, co prowadzi do przesunięcia pików współczynnika pochłaniania dźwięku na (ustalone) niższe częstotliwości fal akustycznych. Zmniejszając zasięg pola magnetycznego można otrzymać efekt materiału gradientowego lub ośrodka wielowarstwowego charakteryzujący się odpowiednim przesunięciem pików pochłaniania na pożądane częstotliwości usytuowane zasadniczo pomiędzy niskimi wartościami otrzymanymi dla przypadku maksymalnego zasięgu pola oraz wyższymi wartościami typowymi dla przypadku, gdy pole magnetyczne jest wyłączone.

Przykład 2. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej poprzez modyfikację mikrogeometrii modułu hybrydowej struktury porowatej o spiralnych kanałach ukośnych

Podobnie jak w **Przykładzie nr 1** tutaj także celka periodyczna stanowi element podstawowy budujący moduł hybrydowej struktury porowatej 1. Bardzo istotna różnica polega na tym, że kanały ukośne mają postać spirali (por. Fig. 1b), a nie prostych cylindrów (por. Fig. 1a). Dzięki temu, w przypadku, gdy oscylacyjny przepływ powietrza skierowany jest przez spiralne kanały ukośne (w wyniku zablokowania kulkami ferromagnetycznymi szerokich kanałów poziomych), efektywna krętość przepływu jest znacząco większa niż przy zastosowaniu wąskich, ale prostych kanałów ukośnych, co pozwala na uzyskanie istotnej dźwiękochłonności (tzw. pików pochłaniania dźwięku) w przypadku fal akustycznych o znacznie niższych częstotliwościach. W konsekwencji zwiększa się również zakres częstotliwości akustycznych, do których można dostosowywać dźwiękochłonną efektywność hybrydowego materiału adaptowalnego. Pozostałe etapy realizacji sposobu w tym przykładzie wykonania są tożsame z opisem zawartym w **Przykładzie nr 1**.

Skuteczność działania sposobu adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej poprzez modyfikację mikrogeometrii pojedynczego modułu hybrydowej struktury porowatej potwierdzono przy użyciu symulacji komputerowych oraz rzeczywistego eksperymentu, gdzie odpowiednio wykorzystano: modele matematyczne odpowiadające pojedynczemu elementowi periodycznemu struktury porowatej oraz moduł hybrydowej struktury porowatej o prostych kanałach ukośnych wykonany w technologii druku 3D z polimeru (materiału dielektrycznego) i zawierający we wnętrzu każdego dużego pora kulisty element ferromagnetyczny (w eksperymencie zastosowano małe stalowe kulki używane do produkcji łożysk).

Wyniki przeprowadzonych symulacji numerycznych dla geometrii z **Przykładu nr 1** oraz dla tożsamej geometrii zawierającej spiralne kanały ukośne o średnicy 0,76 mm, średnicy podziałowej 1,28 mm oraz skoku równym średnicy podziałowej, przedstawione w formie krzywych akustycznego

współczynnika pochłaniania na wykresie z Fig. 6, ilustrują zmianę zakresu pochłaniania dźwięku w szerokim zakresie częstotliwości uzyskanego poprzez zastosowanie zastrzeganego sposobu adaptowania mikrostruktury hybrydowego materiału porowatego do pochłaniania dźwięku (hałasu) o zmiennych częstotliwościach dominujących. Prezentowane wyniki pokazują zmianę zakresu pochłaniania dźwięku (w tym przesunięcie tzw. pików akustycznego współczynnika pochłaniania) w wyniku działania polem magnetycznym na pojedynczy moduł hybrydowej struktury porowatej oraz bez tego oddziaływania, tj. przy wyłączonym polu magnetycznym. Porównanie krzywych pochłaniania potwierdza, że hybrydowa struktura porowata zawierająca spiralne kanały ukośne pozwala uzyskać skuteczną dyssypację energii fal akustycznych o znacznie niższych częstotliwościach niż analogiczna struktura z prostymi wąskimi kanałami ukośnymi, a w konsekwencji zapewnia również adaptowalność skutecznego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej w odpowiednio szerszym zakresie częstotliwości.

Przykład 3. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej poprzez modyfikację mikrogeometrii matrycy wielu modułów hybrydowej struktury porowatej

Schemat kolejnego przykładu realizacji adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej został przedstawiony na Fig. 7. Hybrydowa struktura porowata **1** wytworzona jest w postaci modułów składających z celek periodycznych opisanych w **Przykładach nr 1** lub **2**, przy czym zastosowano wiele modułów, które zestawiono w matrycę tworząc dźwiękochłonną warstwę okładzinową lub barierę akustyczną. Jest to praktyczna realizacja sposobu mająca zastosowanie do adaptowalnej okładziny lub bariery dźwiękochłonnej (w przeciwieństwie do realizacji przedstawionych w poprzednich przykładach, które mają raczej charakter laboratoryjny, przystosowany do testowania modułu adaptowalnego materiału hybrydowego).

Ten przykład realizacji sposobu adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej różni się od opisanych w **Przykładach nr 1** i **2** tym, że sterownik **7** nie zawiera wewnątrz zintegrowanego wzmacniacza sygnału, lecz wzmacniacz sygnału **14** jest odrębnym urządzeniem i podłączony jest do systemu okablowania **15**, który łączy cewki każdego z elektromagnesów **6** poszczególnych modułów hybrydowej struktury porowatej **1**. Moduły te są wzajemnie połączone tworząc wielomodułową matrycę o konfigurowalnej makrogeometrii (rozmiarze powierzchni), która może być wykorzystana jako adaptowalna okładzina dźwiękochłonna, rdzeń bariery akustycznej lub istotny fragment obudowy dużego urządzenia będącego źródłem hałasu. Zasada realizacji sposobu adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej poprzez modyfikację mikrogeometrii w wielomodułowej, hybrydowej strukturze porowatej jest identyczna jak w **Przykładach nr 1** i **2**.

Przykład 4. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej poprzez modyfikację mikrogeometrii wielomodułowej matrycy hybrydowej struktury porowatej w zależności od trybu pracy urządzenia będącego źródłem hałasu

Schemat realizacji sposobu adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej został przedstawiony na Fig. 8a i 8b. Hybrydową strukturę porowatą **1** wytworzono z celek periodycznych opisanych w **Przykładach nr 1** lub **2**, przy czym podobnie jak w **Przykładzie nr 3** zastosowano wiele modułów (tworzących wielomodułową matrycę) hybrydowej struktury porowatej **1**.

Ten przykład realizacji sposobu adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej różni się od realizacji według **Przykładów nr 1, 2** i **3** tym, że sterownik **7** generuje sygnał sterujący podawany na wzmacniacz sygnału **14** podłączony do wielomodułowej matrycy hybrydowej struktury porowatej **1** w zależności od trybu pracy maszyny **18** generującej hałas. Tryby pracy maszyny są znane (np. związane z prędkością obrotową, biegiem pracy silnika), a wynikające z nich cechy generowanego hałasu jednoznacznie powtarzalne, dzięki czemu nie jest konieczne korzystanie z uniwersalnego czujnika (drgań) lub miernika hałasu (np. mikrofonu) oraz skomplikowanego systemu (algorytmu) kontroli, gdyż wystarczy zastosować zdefiniowany sygnał kontrolny optymalnie dobrany dla danego trybu pracy urządzenia hałasującego. Ponadto w tym przypadku zarówno adaptowalna mikrogeometria hybrydowej struktury porowatej, jak i ogólna konfiguracja panelu akustycznego względem urządzenia hałasującego mogą zostać zoptymalizowane na etapie projektowania.

Uszczegóławiając, gdy maszyna **18** pracuje z danymi typowymi parametrami, np. nominalną prędkością obrotową, wówczas widmo emitowanego przez nią hałasu ma określoną postać. W przypadku, gdy parametry pracy się zmieniają (np. obroty się zwiększają lub zmniejszają), postać widma także się zmienia. W prezentowanym przykładzie sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej realizowany jest poprzez bezpośrednie przekazanie informacji o parametrach pracy maszyny **18** przewodem elektrycznym **17** łączącym sterownik maszyny **16** ze sterownikiem **7** do tego ste-

rownika. Sterownik 7 ma wewnątrz zaimplementowany algorytm, który w zależności od wartości podanych parametrów wejściowych opisujących tryb pracy maszyny lub stan jej działania (np. bieg, prędkość obrotową itp.) generuje sygnał sterujący podawany do wzmacniacza zasilającego 14. Wzmacniacz ten wysyła proporcjonalną do wejściowego sygnału sterującego wartość prądu przez system okablowania 15 do cewek 12 elektromagnesów 6, które z kolei generują odpowiednie pole magnetyczne zmieniające mikrogeometrię w poszczególnych modułach całej matrycy hybrydowej struktury porowatej 1. Zasada realizacji sposobu adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej poprzez modyfikację mikrogeometrii w hybrydowej strukturze porowatej jest tutaj identyczna jak to opisano w **Przykładach nr 1 i 2**.

WYKAZ OZNACZEŃ:

1. hybrydowa struktura porowata,
2. kulisty element ferromagnetyczny,
3. szeroki kanał hybrydowej struktury porowatej,
- 4a. wąski, prosty kanał ukośny hybrydowej struktury porowatej,
- 4b. wąski, spiralny kanał ukośny hybrydowej struktury porowatej,
5. duży sferyczny por hybrydowej struktury porowatej,
6. elektromagnes,
7. sterownik elektromagnesu,
8. linie pola elektromagnetycznego,
9. przedwzmacniacz,
10. przewody elektryczne łączące mikrofon i przedwzmacniacz ze sterownikiem elektromagnesu,
11. przewody elektryczne łączące elektromagnes ze sterownikiem elektromagnesu,
12. cewka elektromagnesu,
13. mikrofon,
14. sterowany wzmacniacz sygnału,
15. system okablowania,
16. sterownik maszyny,
17. przewód sygnałowy łączący sterownik maszyny ze sterownikiem elektromagnesu,
18. maszyna generująca hałas,
19. mały sferyczny por hybrydowej struktury porowatej.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej poprzez modyfikację mikrogeometrii warstwy porowatej, **znamienny tym**, że obejmuje etapy, w których pod wpływem działania pola elektromagnetycznego (8) modyfikowana jest wewnętrzna mikrogeometria hybrydowej struktury porowatej (1) umieszczonej w zasięgu działania tegoż pola elektromagnetycznego (8), które powoduje istotną projektowaną zmianę położenia kulistych elementów ferromagnetycznych (2) wewnątrz dużych porów (5) hybrydowej struktury porowatej (1), przy czym:
 - a) hybrydowa struktura porowata (1) wykonana jest z materiału dielektrycznego i ma charakter struktury regularnej, warstwowej, wytworzonej jako zestawienie ze sobą wielu celek periodycznych;
 - b) każda celka periodyczna ma zewnętrznie kształt prostopadłościanu o wymiarach H, B, D i ma umiejscowiony centralnie duży sferyczny por (5), zaś w każdym z ośmiu rogów celki znajduje się po 1/8-mej małego pora (19); ponadto każda celka ma sześć szerokich kanałów (3) wychodzących ze środka dużego pora (5) wzdłuż osi X, Y, Z, oraz osiem wąskich, ukośnych kanałów (4) łączących duży por centralny (5) z małymi porami narożnymi (19);
 - c) kulisty element ferromagnetyczny (2), umieszczony we wnętrzu dużego pora (5), ma średnicę większą niż przekrój szerokich kanałów (3) tak, że może blokować jeden z nich, gdy zostanie odpowiednio przemieszczony ku jego wejściu, odblokowując tym samym wąskie kanały ukośne (4);

- d) pod wpływem kontrolowanego pola elektromagnetycznego (8), wytworzonego przez cewkę elektromagnesu (6) i działającego na hybrydową strukturę porowatą (1), przemieszczeniu ulegają kuliste elementy ferromagnetyczne (2), które w efekcie blokują szerokie kanały poziome (3) łączące duże pory (5) na kierunku równoległym do kierunku propagacji fali akustycznej;
- e) sterując natężeniem prądu elektrycznego przepływającego przez cewkę (12) elektromagnesu (6), reguluje się odpowiednio zmniejszając lub zwiększając zakres oddziaływania pola elektromagnetycznego (8) na hybrydową strukturę porowatą (1), przez co modyfikacja mikrogeometrii tejże struktury porowatej następuje w kolejnych warstwach celek periodycznych dzięki czemu można zmieniać efektywną dźwiękochłonność struktury porowatej (1) dostosowując piki współczynnika pochłaniania dźwięku do częstotliwości fal generujących największy poziom hałasu, dla częstotliwości znajdujących się w zaprojektowanym zakresie.
2. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej według zastrz. 1, **znamienny tym**, że celka periodyczna ma zewnętrznie kształt prostopadłościanu o podstawie kwadratowej gdzie $B=D$, korzystniej sześciianu gdzie $H=B=D$.
 3. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej według zastrz. 1–2, **znamienny tym**, że pole magnetyczne oddziałuje od pierwszej do ostatniej warstwy celek periodycznych.
 4. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej według zastrz. 1–3, **znamienny tym**, że zarówno szersze kanały (3) i węższe ukośne kanały (4) celki periodycznej mają kształt prostych cylindrów.
 5. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej według zastrz. 1–4, **znamienny tym**, że ukośne kanały (4) celki periodycznej mają kształt nieregularny, korzystnie w postaci spirali, w celu zmaksymalizowania krętości drogi przepływu przez te kanały.
 6. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej według zastrz. 1–5, **znamienny tym**, że do sterowania zasięgiem oddziaływania pola elektromagnetycznego (8) wytwarzanym przez elektromagnes (6) stosuje się sterownik elektromagnesu (7) połączony z elektromagnesem (6) za pomocą przewodów elektrycznych (11), który to sterownik elektromagnesu (7) zawiera zaimplementowany algorytm sterujący elektromagnesem (6) jako źródłem pola magnetycznego (8) oddziałującego na hybrydową strukturę porowatą (1) w celu modyfikacji mikrogeometrii sieci porów, co prowadzi do korzystnej zmiany oscylacyjnego przepływu powietrza w porach, a tym samym maksymalnie zwiększa dyssypację energii fal akustycznych o częstotliwościach zgodnych z dominującymi częstotliwościami hałasu.
 7. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej według zastrz. 1–6, **znamienny tym**, że realizowany jest za pośrednictwem sterownika elektromagnesu (7), który łączy się przez przedwzmacniacz (9) z mikrofonem (13), przy czym za pomocą mikrofonu (13) mierzone jest ciśnienie akustyczne w odpowiednio dobranych punktach otoczenia hybrydowej struktury porowatej (1), a sygnał zarejestrowany przez mikrofon (13) wzmacniany jest przez przedwzmacniacz (9) i poprzez połączenie elektryczne (10) przekazywany jest do sterownika elektromagnesu (7), gdzie jako sygnał wejściowy jest przetwarzany i na podstawie m.in. analizy częstotliwościowej sygnału sterownik elektromagnesu (7) generuje i przekazuje przez przewód elektryczny (11) sygnał sterujący elektromagnesem (6) na cewkę (12) elektromagnesu (6), przez co, w zależności od wartości prądu dostarczonego do elektromagnesu (6), wytwarzane jest silniejsze bądź słabsze pole elektromagnetyczne (8) o kontrolowanym w ten sposób zasięgu, który obejmować może całą warstwę hybrydowej struktury porowatej (1) lub tylko jej część, dzięki czemu efektywna dźwiękochłonność rzeczony struktury porowatej może być dostrajana do fal akustycznych o zidentyfikowanych częstotliwościach hałasu, przy czym adaptacji tej dokonuje się w sposób płynny w szerokim zakresie dostępnych częstotliwości.
 8. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej według zastrz. 1–7, **znamienny tym**, że realizuje się go wykorzystując matrycę zawierającą co najmniej dwa, korzystnie wiele zestawionych ze sobą modułów hybrydowej struktury porowatej (1), zaopatrzonych w elektromagnesy (6) połączone ze sobą systemem okablowania, którymi to elektromagnesami (6) steruje się za pomocą sterownika elektromagnesu (7) w celu optymalnej adaptacji własności akustycznych dla całej matrycy modułów hybrydowej struktury porowatej tworzącej okładzinę dźwiękochłonną bądź izolacyjną barierę akustyczną o zasadniczo dużej powierzchni.

9. Sposób adaptacyjnego pochłaniania dźwięku i izolacji akustycznej według zastrz. 1–8, **znamienny tym**, że sterownik elektromagnesu (7) generuje sygnał sterujący podawany na wzmacniacz sygnału (14) podłączony do wielomodułowej matrycy hybrydowej struktury porowatej (1), w zależności od trybu pracy danego urządzenia (18) generującego hałas, dzięki czemu stosowany jest uproszczony, a zarazem bardzo stabilny system kontrolny wykorzystujący predefiniowane sygnały sterujące zoptymalizowane dla możliwych trybów lub stanów pracy urządzenia hałasującego.

Rysunki

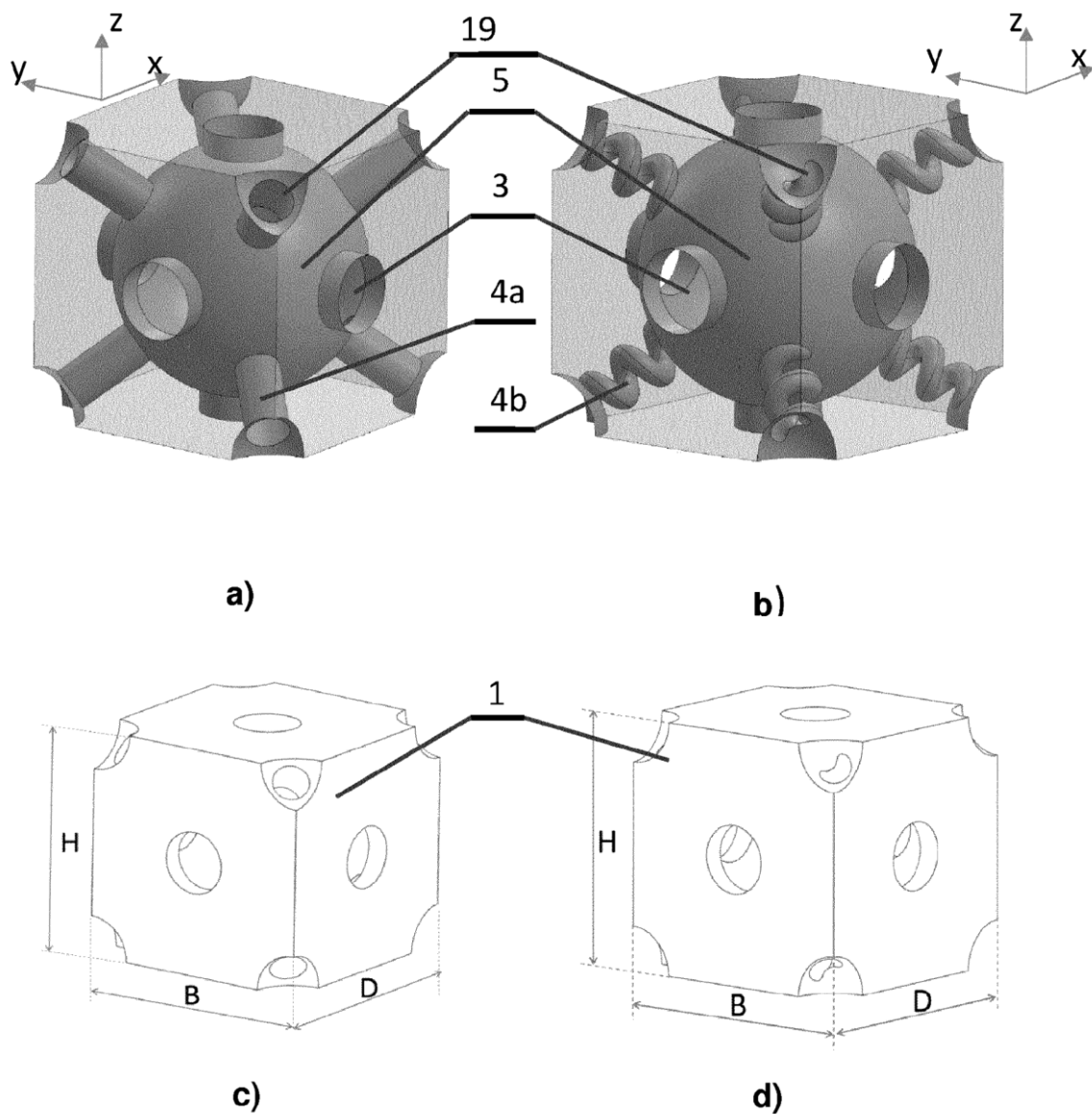
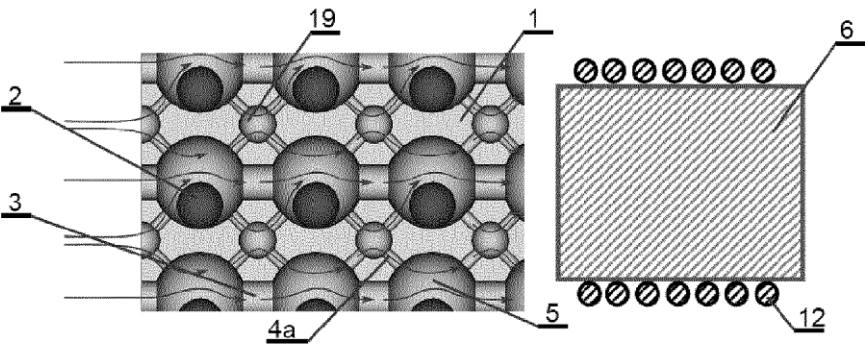
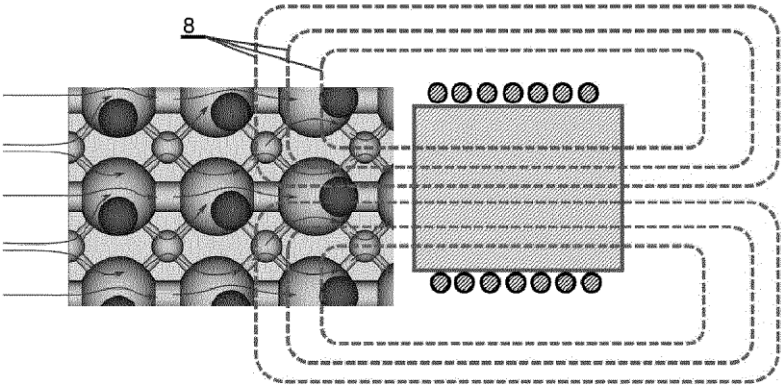


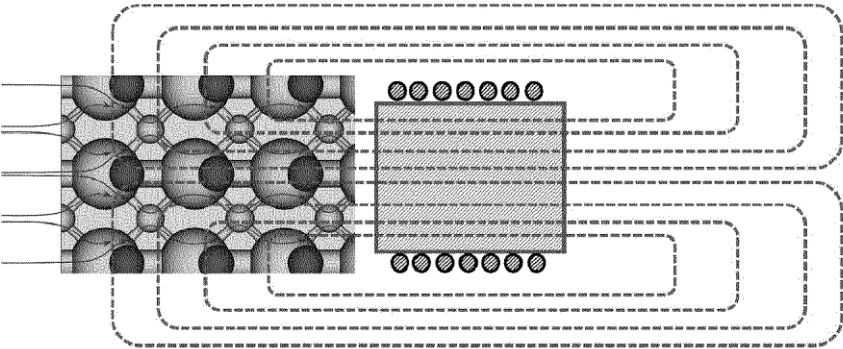
Fig. 1



a)

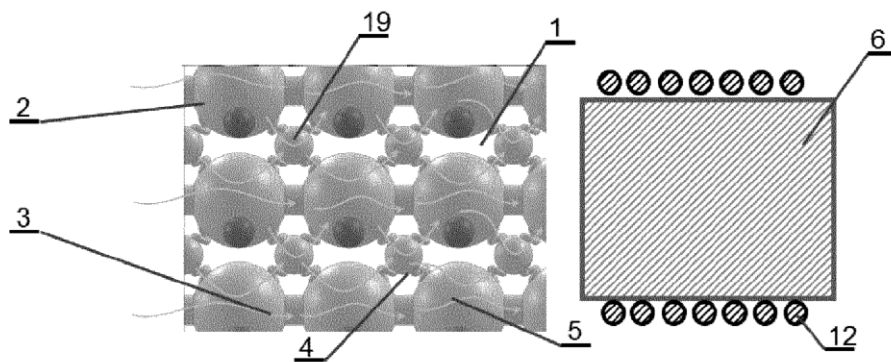


b)

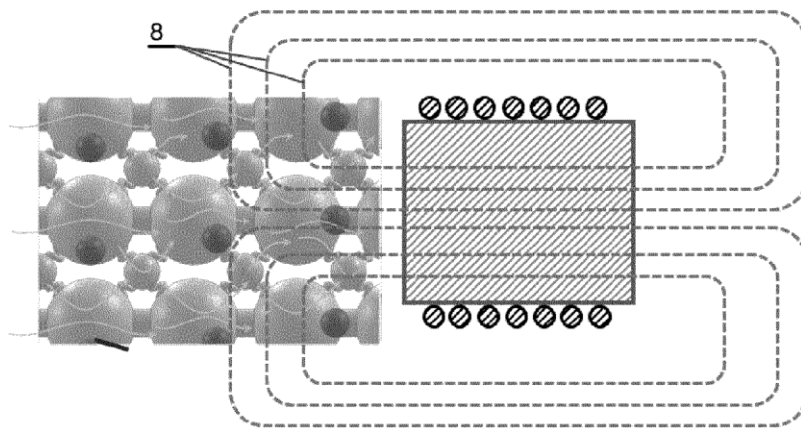


c)

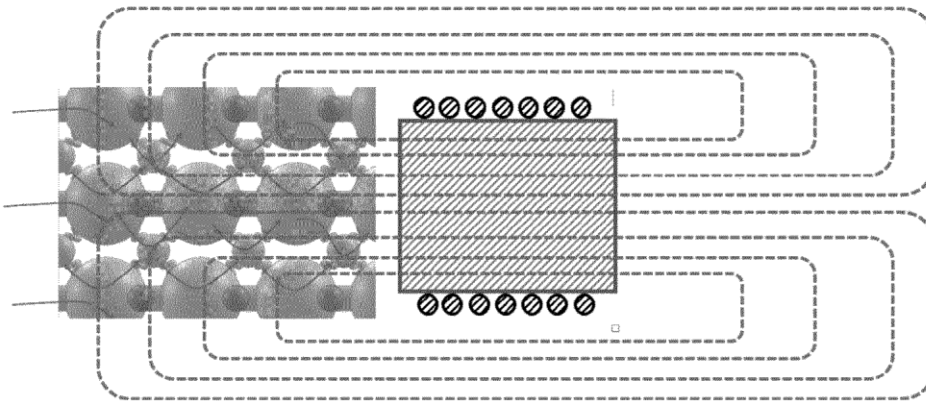
Fig. 2



a)



b)



c)

Fig. 3

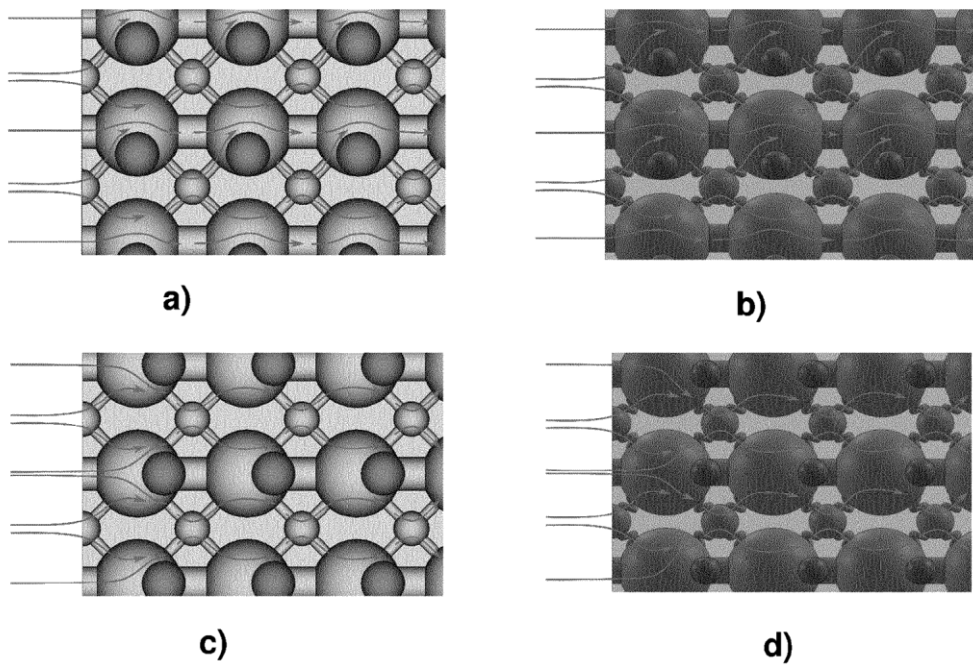


Fig. 4

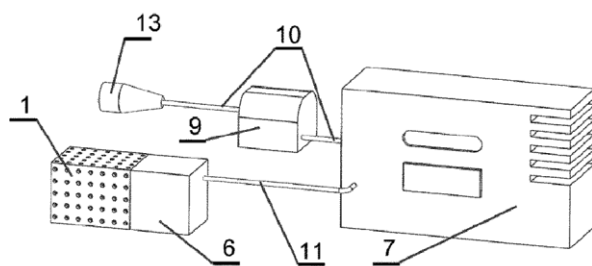


Fig. 5

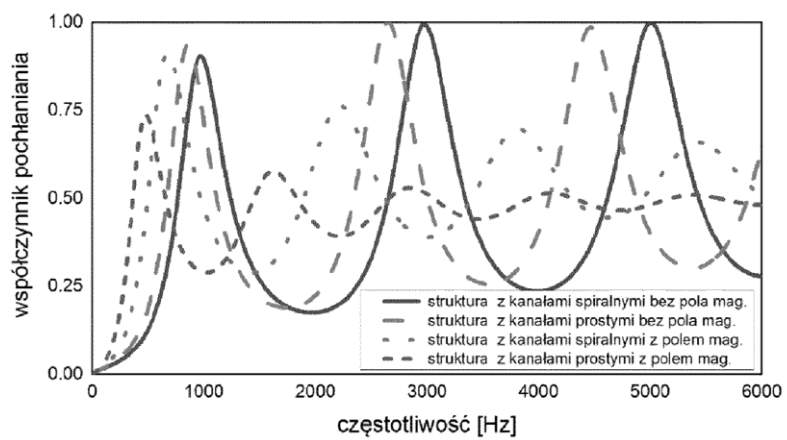
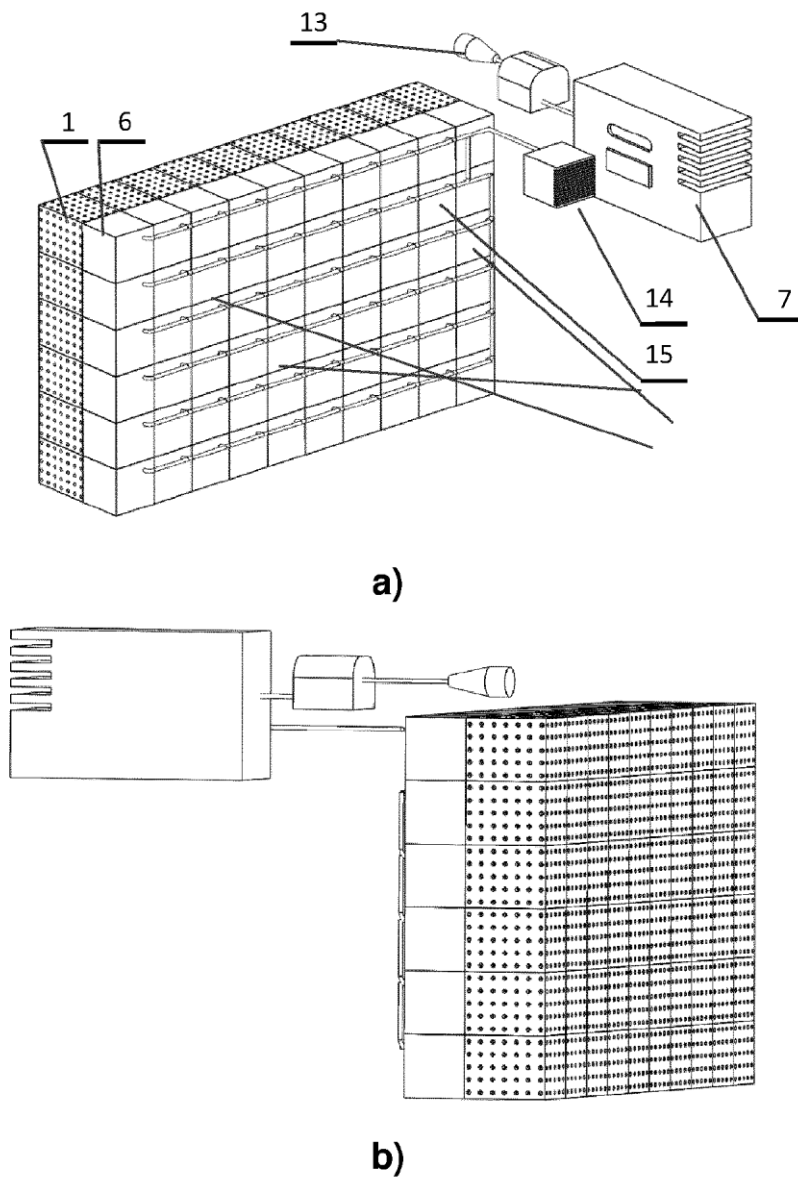
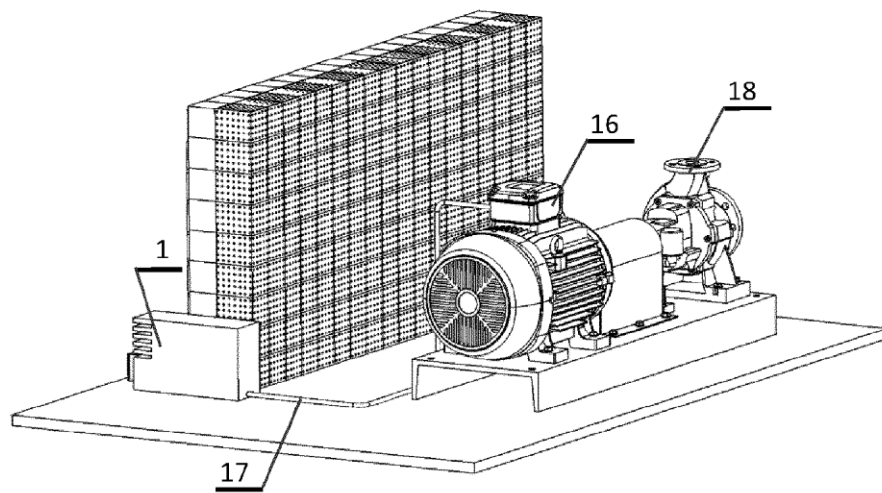
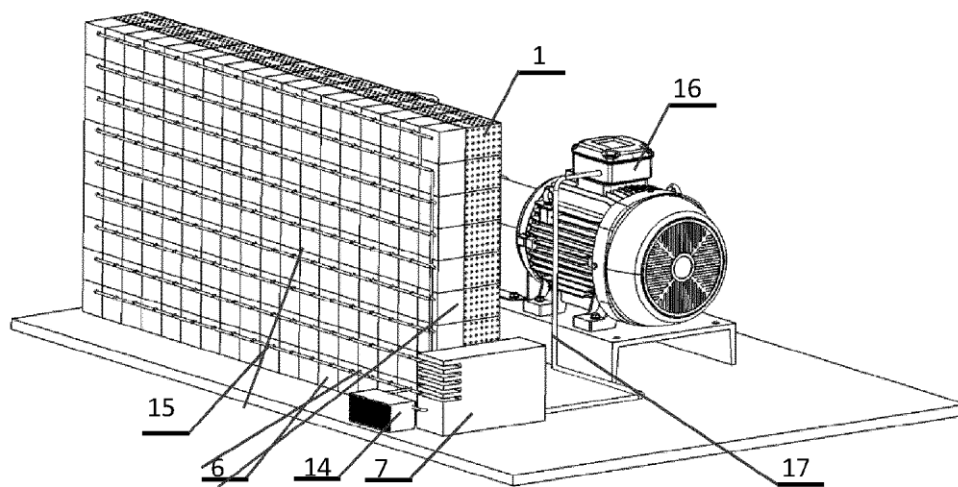


Fig. 6

**Fig. 7**



a)



b)

Fig. 8