

dr hab. inż. Jacek Nurzyński, prof. ITB¹⁾
 ORCID: 0000-0001-7889-4997

Właściwości akustyczne drewnianych budynków szkieletowych

The acoustic properties of wooden frame buildings

DOI: 10.15199/33.2023.09.06

Streszczenie. Artykuł dotyczy właściwości akustycznych wielorodzinnych drewnianych budynków szkieletowych. Pełnowymiarowe modele stropu, ściany wewnętrznej oraz pełnej części fasady były badane w warunkach laboratoryjnych. W celu ustalenia wpływu poszczególnych elementów konstrukcyjnych badanych próbek na ich izolacyjność akustyczną pomiary wykonywano w różnych fazach montażowych. W przypadku stropu analizowano efekt zastosowania podłogi pływającej i sufitu podwieszonego. Rozpatrywano różne metody montażu sufitu – giętkie metalowe profile były znacznie bardziej efektywne niż sztywne drewniane listwy. Poprawa izolacyjności akustycznej od dźwięków uderzeniowych podłogi pływającej na badanej lekkiej konstrukcji była mniejsza w porównaniu z tradycyjnym stropem masywnym. W celu spełnienia wymagań podłoga powinna być stosowana łącznie z sufitem. W przypadku ściany wewnętrznej badano różne rodzaje szkieletu drewnianego. Ściana pojedyncza z dodatkową warstwą izolacyjną oraz całkowicie rozdzielona ściana podwójna uzyskały właściwości na poziomie odpowiednim dla budownictwa mieszkaniowego. Zastosowanie elastycznych przekładek miało decydujący wpływ na skuteczność dodatkowych warstw izolacyjnych. Wyniki badań są przydatne dla inżynierów i projektantów pracujących nad budynkami mieszkalnymi o bardzo dobrej jakości i dobrych właściwościach akustycznych.

Słowa kluczowe: drewniane budynki szkieletowe; izolacyjność akustyczna; pomiary laboratoryjne; jakość akustyczna mieszkań.

Jednym z istotnych kierunków dalszego rozwoju budownictwa mieszkaniowego jest lekka konstrukcja prefabrykowana, efektywna pod względem energetycznym i spełniająca kryteria zrównoważonego rozwoju. Lekkie budynki mieszkalne, złożone z płaskich paneli lub przestrzennych modułów, są już obecnie w dużym stopniu realizowane w warunkach przemysłowych. Zazwyczaj mają konstrukcję szkieletową, drewnianą lub metalową, wyposażoną w okładziny z cienkich płyt gipsowo-kartonowych, gipsowo-włóknowych, cementowo-włóknowych lub płyt OSB. W każdym przypadku, ze względu na małą masę przegród, konieczne jest stosowanie specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych lub dodatkowych warstw izolacyjnych ograniczających transmisję dźwięków powietrznych i uderzeniowych [1, 2]. Rozwiązania akustyczne, które dobrze sprawdzają się w przypadku tradycyjnych budynków masywnych, nie zawsze są jednak skuteczne w budynkach lekkich. Ponadto, typowe warstwy izolacyjne stosowane ze względów termicznych często powodują niekorzystny efekt akustyczny, dlatego też konieczne jest wypracowanie wyważonych kompromisów [3].

¹⁾ Instytut Techniki Budowlanej; j.nurzynski@itb.pl

Abstract. The acoustic properties of multi-family wooden frame buildings were considered. Full-scale models of a floor, a dividing wall and an opaque part of a façade were examined in the laboratory. The measurements were taken at different phases of the sample's construction to determine the contribution of their particular elements to the total sound insulation of the final structure. The acoustic effect of a floating screed and a suspended ceiling was analysed for the floor. Different assembly methods of the ceiling were investigated, and the flexible channels were significantly more effective than rigid wooden battens. The impact sound insulation improvement of the floating screed seemed lower when it was used on a lightweight floor in comparison to a traditional massive slab. The ceiling and the screed should be used together to satisfy the requirements. In the case of a dividing wall, various types of timber frames were examined, the single wall with additional insulating cladding and the totally separated double wall achieved a performance level adequate for residential use. The application of elastic dividers and resilient spacers was of critical importance for the effectiveness of the additional insulation. The results are useful for engineers and designers when working on high-quality residential buildings with good acoustic performance.

Keywords: wooden frame buildings; sound insulation; laboratory measurements; acoustic quality of dwellings.

W artykule przedstawiono analizę wpływu wybranych szczegółów konstrukcyjnych i dodatkowych warstw izolacyjnych na parametry akustyczne ścian i stropów o drewnianej konstrukcji szkieletowej. Parametry te są znacznie słabiej rozpoznane niż w masywnych budynkach tradycyjnych [4]. W przypadku układów stropowych analizowano warstwy sufitowe i podłogowe, natomiast w przypadku ścian – zewnętrzne okładziny termiczne i wewnętrzne okładziny technologiczne. Przedstawione wyniki i wnioski mogą być przydatne przy projektowaniu lekkich budynków szkieletowych oraz opracowywaniu szczegółów konstrukcyjnych, zapewniających większą skuteczność akustyczną nowych rozwiązań.

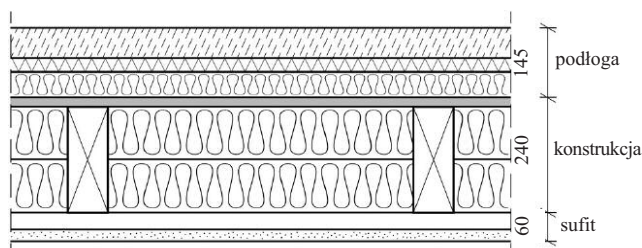
Materiały i metody badań

Analizę właściwości akustycznych rozpatrywanych przegród szkieletowych wykonano na podstawie badań laboratoryjnych. Badano modele prefabrykowanych stropów, ściany wewnętrznej i fragmentu pełnej części ściany elewacyjnej. Podstawowym elementem konstrukcyjnym był w każdym przypadku drewniany szkielet z okładzinami wykonanymi z cienkich płyt, a wypełnienie stanowiła wełna mineralna.

Rozpatrywano różne warianty konstrukcyjne i różne rozwiązania szczegółów, opis próbek przedstawiono w rozdziałach omawiających wyniki kolejnych badań. Stanowisko badawcze składało się z dwóch komór pogłosowych rozdzielonych przerwą dylatacyjną. Próbkę badawczą miały powierzchnię ok. 11,5 m² i były wykonane w sposób odzwierciedlający warunki rzeczywiste. Stanowisko badawcze, aparatura pomiarowa, warunki prowadzenia badań oraz sposób montażu próbek były zgodne z normą EN ISO 10140 [5].

Wyniki

Prefabrykowany strop drewniany. Jego konstrukcja nośna składała się z obwodowej ramy oraz smukłych drewnianych belek o wysokości 220 mm rozmieszczonych w rozstawie 600 mm. Górne poszycie, wykonane z płyt OSB, nadawało całej konstrukcji przestrzenną sztywność. Przestrzeń pomiędzy belkami stropu została wypełniona wełną mineralną. Rozpatrywano cztery warianty konstrukcyjne. W pierwszym, do konstrukcji nośnej podwieszono sufit złożony z podwójnej płyty gipsowo-kartonowej 2 x 12,5 mm, zamocowanej na drewnianych łąkach utwierdzonych w sposób sztywny do głównych belek stropowych (rysunek 1). W wariantcie tym nie wykonano żadnych warstw podłogowych.



Rys. 1. Schemat konstrukcji badanego stropu drewnianego
Fig. 1. Construction scheme of the examined wooden floor

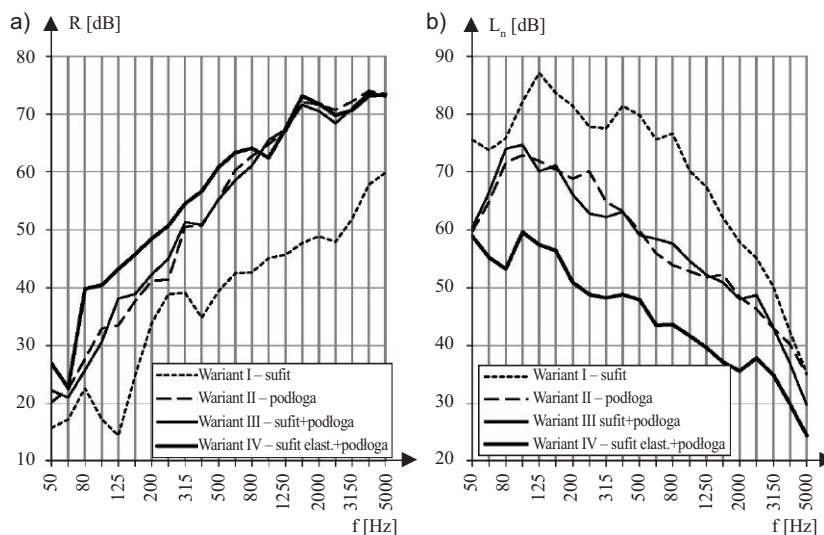
Układ charakteryzował się bardzo słabymi właściwościami akustycznymi, znacznie odbiegającymi od wymagań obowiązujących w budynkach mieszkalnych (rysunki 2a, 2b). Wartości wskaźników izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych i uderzeniowych wynosiły odpowiednio: $R_{A1} = R_w + C = 38$ dB; $L_{n,w} = 77$ dB (R_w – wskaźnik ważony izolacyjności akustycznej właściwej; C – widmowy wskaźnik adaptacyjny wg normy PN-EN ISO 717-1; $L_{n,w}$ – wskaźnik ważony poziomu uderzeniowego znormalizowanego). Na rysunku 2 widoczne jest wyraźne zmniejszenie izolacyjności w pasmach 125 i 400 Hz, a także w paśmie 2500 Hz odpowiadającym częstotliwości koincydencji płyty gipsowo-kartonowej sufitu. Występuje ono zarówno w odniesieniu do dźwięków powietrznych, jak i uderzeniowych (rysunki 2a, 2b).

W przypadku lekkich stropów szkieletowych, przeznaczonych do stosowania w budynkach mieszkalnych, wierzchnie warstwy podłogowe mogą być wykonane w postaci tradycyjnej podłogi pływającej lub prefabrykowanego

suchego jastrychu. Podłoga pływająca wymaga większego nakładu pracy w procesie wykonawczym, ale zapewnia bardziej trwałą ochronę elastycznej warstwy izolacyjnej, dzięki czemu zmniejsza ryzyko pogorszenia właściwości akustycznych stropu na skutek działań podejmowanych przez użytkownika w trakcie eksploatacji.

W analizowanym przypadku zastosowano podłogę złożoną z jastrychu cementowego o grubości 65 mm oraz podwójnej warstwy tłumiącej ze styropianu 30 mm i wełny mineralnej 50 mm ułożonych jedna na drugiej. Wyniki pomiarów akustycznych uzyskane w przypadku stropu z samą podłogą pływającą (bez sufitu) zamieszczono na rysunkach 2a i 2b odpowiednio dla dźwięków powietrznych i uderzeniowych (wariant II). W całym zakresie częstotliwości nastąpiło wyraźne zwiększenie izolacyjności akustycznej w porównaniu z wcześniej badanym układem z samym sufitem (rysunki 2a, 2b) – wartości jednoliczbowe R_{A1} i $L_{n,w}$ były o ok. 15 dB korzystniejsze niż w poprzednim przypadku. Wartość wskaźnika R_{A1} stropu z samą podłogą osiągnęła poziom wymagań obowiązujących w budynkach mieszkalnych, natomiast znormalizowany poziom uderzeniowy odbiegał w dalszym ciągu wyraźnie od tych wymagań. Oznacza to, że w ocenie akustycznej badanego stropu krytyczną rolę odgrywały parametry uzyskiwane w zakresie dźwięków uderzeniowych. Wniosek ten można uogólnić, ponieważ badany strop miał konstrukcję typową, stosowaną we współczesnych rozwiązaniach. Taką tendencję potwierdzają również inne publikacje [6, 7]. Należy zwrócić uwagę, że zastosowanie tej samej podłogi na tradycyjnym stropie masywnym pozwoliłoby w większości przypadków spełnić wymagania również w odniesieniu do dźwięków uderzeniowych. Uwidacznia się istotna różnica w zachowaniu tych samych warstw tłumiących na stropach lekkich i masywnych.

Wyniki badań trzeciego wariantu stropu, w którym zastosowano jednocześnie sufit i podłogę, były pewnym zaskoczeniem, ponieważ izolacyjność akustyczna była praktycznie taka sama, jak w przypadku układu z samą podłogą, bez sufitu



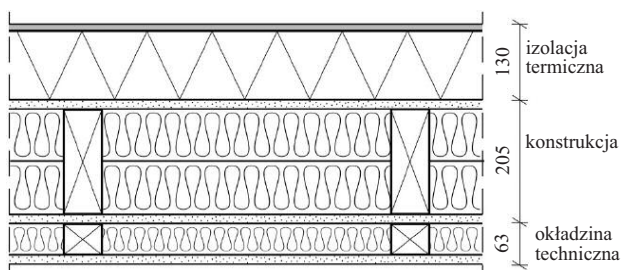
Rys. 2. Izolacyjność akustyczna badanego stropu drewnianego od dźwięków: a) powietrznych; b) uderzeniowych

Fig. 2. Airborne (a) and impact (b) sound insulation of the investigated wooden floor

(rysunki 2a, 2b). Oznacza to, że sufit zamocowany w sposób sztywny na drewnianych łątach, bezpośrednio do głównej konstrukcji stropu, nie spowodował poprawy jego właściwości akustycznych, a nawet doprowadził do ich nieznacznego pogorszenia w pasmach niskich oraz w rejonie 800 Hz. W efekcie wskaźniki jednoliczbowe były o 1 dB mniej korzystne niż w przypadku układu z samą podłogą. Świadczy to o dominującej roli strukturalnych dróg transmisji dźwięku związanych ze sposobem zamocowania sufitu.

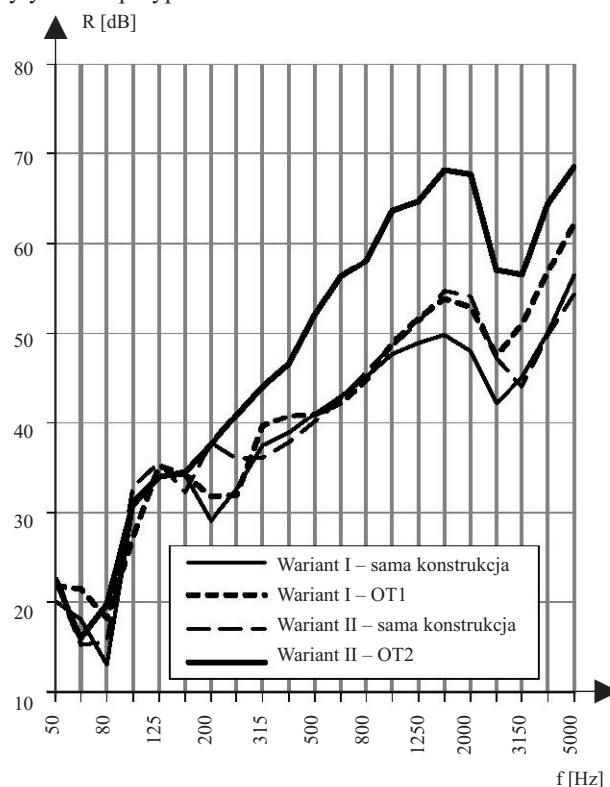
W czwartym wariantcie ten sam sufit został zamocowany za pośrednictwem wiotkich, metalowych profili, zastępujących sztywne drewniane łąty. Pozostałe elementy stropu oraz podłoga pływająca pozostały bez zmian. Ograniczenie strukturalnej drogi transmisji przez konstrukcję wsporczą sufitu spowodowało radykalny wzrost izolacyjności akustycznej, szczególnie w odniesieniu do dźwięków uderzeniowych, gdzie nastąpiła jej poprawa o ok. 10 dB niemal w całym rozpatrywanym zakresie częstotliwości (rysunki 2a, 2b). W przypadku dźwięków powietrznych wzrost ten można zaobserwować głównie w pasmach niskich. Wartości wskaźników izolacyjności akustycznej wynosiły odpowiednio: $R_{A1} = 60$ dB oraz $L_{n,w} = 49$ dB. Dodatkowo przeprowadzono badania z zastosowaniem innych zamocowań tego samego sufitu wykonanych w postaci elastycznych zawiesi tłumiących dźwięki materiałowe. Przyniosło to jeszcze korzystniejszy efekt i pozwoliło zmniejszyć wartość wskaźnika $L_{n,w}$ o kolejne 3 dB. Uzyskane parametry akustyczne stwarzały już możliwość zastosowania stropu w budownictwie mieszkaniowym.

Ściana zewnętrzna. Prefabrykowana ściana elewacyjna składa się z nośnego elementu konstrukcyjnego, wewnętrznej okładziny technicznej i zewnętrznego ocieplenia. Wszystkie te elementy mają duży wpływ na jej właściwości akustyczne [8]. W rozpatrywanym przypadku element nośny był zbudowany z drewnianych słupków osadzonych w poziomych oczepach, obustronnego opłytkowania i wypełnienia z wełny mineralnej (rysunek 3). Wewnętrzna okładzina techniczna, która stanowi dodatkową warstwę przeznaczoną do prowadzenia instalacji, aby nie osłabiać nimi elementu nośnego, była badana na dwóch konstrukcjach nośnych nieznacznie różniących się opłytkowaniem. W obu przypadkach zastosowano taką samą okładzinę techniczną z płyt gipsowo-kartonowych grubości 12,5 mm, zamocowanych do drewnianych łąt, a wypełnienie stanowiła wełna mineralna grubości 50 mm.



Rys. 3. Schemat konstrukcyjny badanej ściany zewnętrznej
Fig. 3. Construction scheme of the investigated external wall

W pierwszym wariantcie (OT1) łąty zostały przytwierdzone w sposób sztywny bezpośrednio do głównej konstrukcji nośnej ściany. Sztywne zamocowanie tworzyło bardzo efektywną strukturalną drogę transmisji dźwięku, co spowodowało, że izolacyjność akustyczna całego układu była prawie taka sama, jak izolacyjność samego elementu konstrukcyjnego bez dodatkowej okładziny (rysunek 4). Pewna poprawa izolacyjności wystąpiła jedynie w zakresie wysokich częstotliwości, ale ze względu na bardzo podobny przebieg obu wykresów w pasmach niskich i średnich wartości wskaźnika $R_{A2} = R_w + C_{tr}$ były w obu przypadkach takie same.



Rys. 4. Drewniana ściana zewnętrzna, efekt zastosowania okładziny technicznej: OT1 (wariant I); OT2 (wariant II)

Fig. 4. External wooden wall, the acoustic effect of technical cladding: OT1 (variant I); OT2 (variant II)

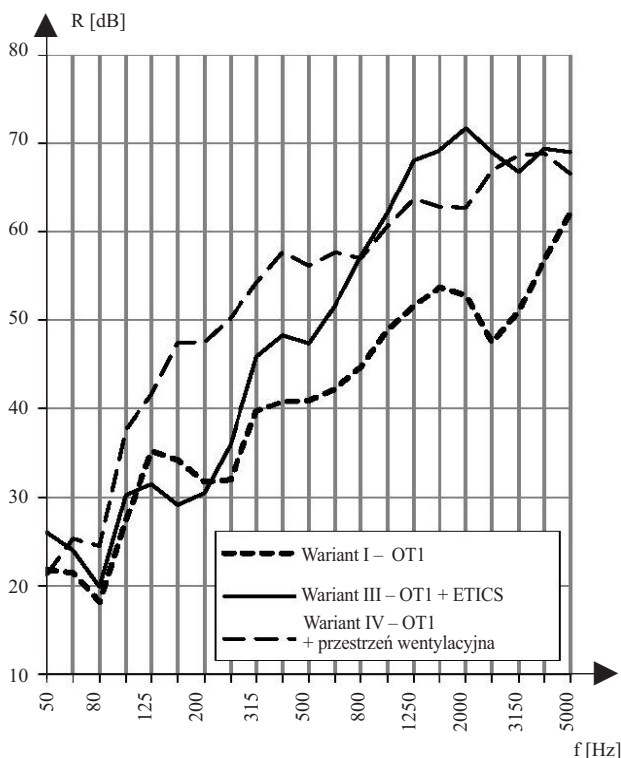
W drugim wariantcie (OT2) ta sama okładzina została zamocowana za pośrednictwem elastycznych przekładek, ograniczających materiałową drogę przenoszenia dźwięku. Nastąpił zdecydowany wzrost izolacyjności akustycznej w zakresie średnich i wysokich częstotliwości (rysunek 4), wskaźnik R_{A2} osiągnął wartość 46 dB. Podobnie jak w przypadku omawianego wcześniej stropu, decydujący wpływ na efektywność dodatkowej okładziny miał sposób jej zamocowania. Ważną rolę elastycznych zamocowań stosowanych w lekkim budownictwie zauważają również inni autorzy [9]. Należy zwrócić uwagę, że poniżej częstotliwości rezonansowej izolacyjność samego elementu konstrukcyjnego oraz elementu z dodatkową okładziną techniczną była praktycznie taka sama.

W następnej fazie badań, na wcześniej rozpatrywanej ścianie wyposażonej w okładzinę techniczną zamontowaną w sposób sztywny, bez elastycznych przekładek (OT1), zastosowa-

no kolejno dwie dodatkowe zewnętrzne izolacje termiczne o różnej konstrukcji, reprezentujące dwa typowe rozwiązania stosowane w praktyce. W wariantcie trzecim wykonano ocieplenie typu ETICS (external thermal insulation composite system), złożone z twardej elewacyjnej wełny mineralnej o grubości 100 mm oraz bezpośrednio na nią nałożonego cienkiego renderingu. W wariantcie czwartym zastosowano izolację termiczną opartą na drewnianym ruszcie zbudowanym z listew ułożonych prostopadłe jedne na drugich w trzech płaszczyznach. Pomiedzy licem ściany a izolacją występowała przestrzeń wentylacyjna.

Ustrój izolacyjny typu ETICS ma charakter rezonansowy, co w przypadku jego zastosowania na tradycyjnych ścianach masywnych zwykle powoduje wyraźne pogorszenie izolacyjności akustycznej [3, 10]. W rozpatrywanym przypadku (wariant III) można również zaobserwować pewne zmniejszenie izolacyjności w rejonie 160 Hz, ale efekt ten ma łagodniejszy przebieg niż dla ścian masywnych. Jednocześnie nastąpił znaczny wzrost izolacyjności akustycznej w zakresie średnich i wysokich częstotliwości (rysunek 5), ale ze względu na wspomniany niskoczęstotliwościowy rezonans, wartość wskaźnika R_{A2} zwiększyła się zaledwie o 2 dB w porównaniu ze ścianą z samą okładziną techniczną.

Znacznie **bardziej efektywna pod względem akustycznym była izolacja termiczna z przestrzenią wentylacyjną (wariant IV)**. Korzystny efekt był widoczny praktycznie w całym zakresie częstotliwości (rysunek 5). Wartość wskaźnika R_{A2} wynosiła w tym przypadku 54 dB, a więc zwiększyła się o kilkanaście decybeli w odniesieniu do ściany z samą



Rys. 5. Drewniana ściana zewnętrzna, efekt zastosowania izolacji termicznej

Fig. 5. External wooden wall, the acoustic effect of thermal insulation

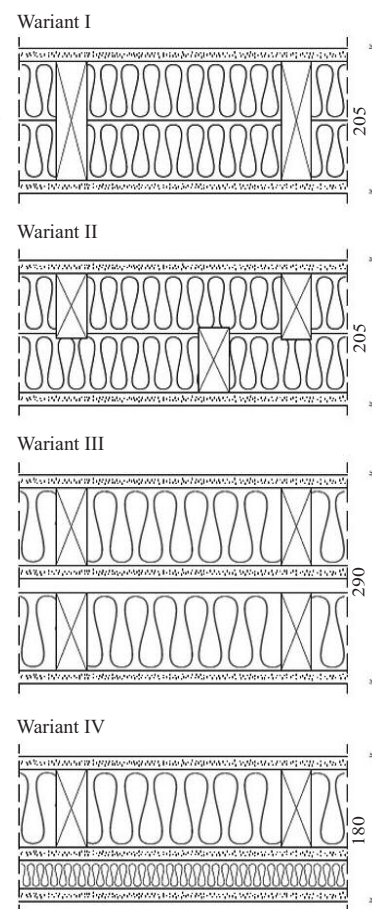
okładziną techniczną. Drewniany ruszt z wiotkich listew, ułożonych w trzech wzajemnie przesuniętych płaszczyznach, tworzył labirynt ograniczający transmisję dźwięku drogą materiałową. Dzięki temu dodatkowa warstwa izolacyjna została skutecznie odseparowana od zasadniczej części ściany. Pewnym zaskoczeniem było natomiast wypłaszczenie wykresu izolacyjności w pasmach wysokich. Jest ono prawdopodobnie spowodowane obecnością szczelin otwierających przestrzeń wentylacyjną od strony zewnętrznej.

Ściana wewnętrzna.

Element konstrukcyjny ściany wewnętrznej ma analogiczną budowę jak części pełnej ściany elewacyjnej, tj. składa się ze szkieletu, obustronnego opłytkowania i wypełnienia z wełny mineralnej. W niektórych przypadkach może być zastosowana dodatkowa okładzina techniczna, natomiast nie stosuje się izolacji termicznej. W takiej sytuacji, większego znaczenia nabierają parametry akustyczne samego elementu konstrukcyjnego, na które można wpływać m.in. przez odpowiednią budowę szkieletu [11]. Wpływ ten ilustrują wyniki badań czterech ścian różniących się jedynie rodzajem szkieletu (rysunek 6). W każdym z omawianych przypadków obustronne opłytkowanie było wykonane z płyt gipsowo-włóknowych 12,5 mm, natomiast wypełnienie ściany stanowiła wełna mineralna o gęstości ok. 40 kg/m³.

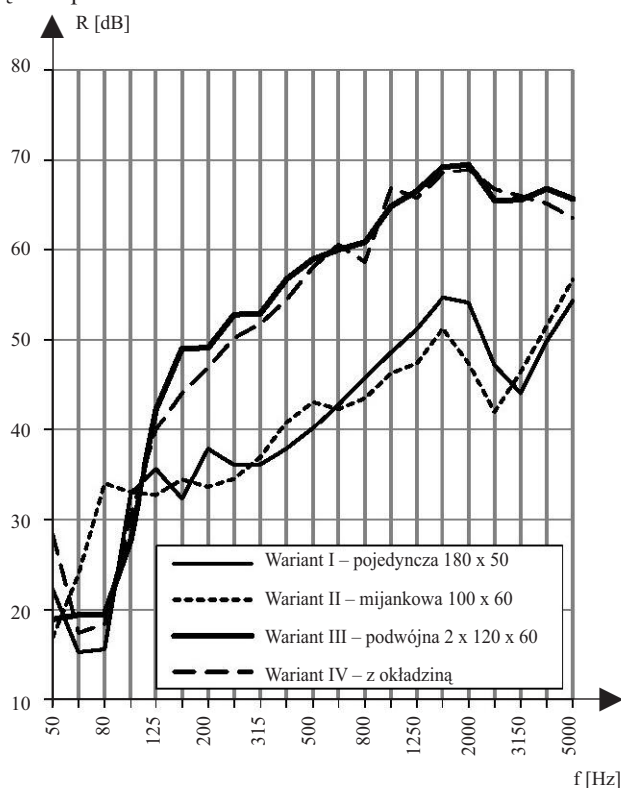
W **wariantcie pierwszym** zastosowano pojedynczy szkielet złożony z drewnianych słupków o przekroju 180 x 60 mm. Ściana charakteryzowała się słabą izolacyjnością akustyczną, co było związane głównie z transmisją dźwięków strukturalnych przez wspólny szkielet (rysunek 7). Wartość wskaźnika R_{A1} wynosiła zaledwie 44 dB, a więc ścianę można stosować jedynie jako przegrodę pomiędzy pokojami w obrębie jednego mieszkania.

W **drugim wariantcie** zastosowano podwójny szkielet ze słupkami 100 x 60 mm rozmieszczonymi mijankowo. Słupki obu warstw nie stykały się ze sobą, ale były osadzone we wspólnej ramie obwodowej. Wynik badania był pewnym zaskoczeniem, ponieważ rozdzielenie szkieletu nie przyniosło oczekiwanych efektów akustycznych – izolacyjność ściany



Rys. 6. Schematy konstrukcyjne badanych wariantów ściany wewnętrznej
Fig. 6. Construction schemes of the examined variants of the dividing wood frame wall

była prawie taka sama jak w przypadku wcześniej badanej ściany pojedynczej (rysunek 7). Zastosowanie szkieletu mijankowego, w przypadku wiotkich ścian szkieletowych z profili metalowych, pozwala uzyskać efekt zbliżony do całkowitego rozdzielonego szkieletu podwójnego. Z tego względu, w przypadku rozpatrywanej ściany drewnianej spodziewano się podobnego wyniku. W praktyce o jej słabych właściwościach akustycznych zadecydowała wspólna obwodowa rama spinająca słupki obu warstw.



Rys. 7. Drewniana ściana wewnętrzna, wpływ szkieletu na izolacyjność akustyczną ściany

Fig. 7. Dividing wood frame wall, the influence of the frame type on the sound insulation

Trzecim rozwiązaniem była ściana oparta na typowym podwójnym szkielecie zbudowanym ze słupków 120 x 60 mm. Przy częstotliwości większej od 125 Hz izolacyjność akustyczna ściany była o ok. 20 dB większa niż w dwóch poprzednich przypadkach (rysunek 7). Jest to efekt całkowitego rozdzielenia obu części ściany (wskaźnik R_{A1} osiągnął wartość 55 dB).

Interesujące są wyniki badań uzyskane w przypadku **czwartego wariantu** konstrukcyjnego, czyli pojedynczej ściany opartej na szkielecie ze słupków 120 x 60 mm, wyposażonej w dodatkową okładzinę technologiczną. Okładzina została zamontowana do podstawowej konstrukcji na metalowych profilach, utwierdzonych za pośrednictwem elastycznych przekładek. Charakterystyka widmowa izolacyjności akustycznej pojedynczej ściany z okładziną była praktycznie taka sama, jak wcześniej omawianej ściany podwójnej (rysunek 7), a wskaźnik R_{A1} był nawet o 1 dB większy, co w praktyce oznacza, że tego typu rozwiązania mogą zastąpić ścianę podwójną. W tym przypadku szczegóły mocowania miały również decydujący wpływ na uzyskiwane parametry akustyczne.

Wnioski

W artykule przedstawiono analizę wpływu wybranych rozwiązań konstrukcyjnych na właściwości akustyczne drewnianych przegród szkieletowych. W przypadku stropu i ściany zewnętrznej, decydujący wpływ na uzyskiwane parametry akustyczne miały dodatkowe warstwy izolacyjne w postaci sufitu podwieszanego, podłogi pływającej, izolacji termicznej oraz okładziny technologicznej. Izolacyjność ściany wewnętrznej zależała od rodzaju szkieletu, ale zastosowanie szkieletu mijankowego osadzonego w sztywnym obramowaniu nie przyniosło spodziewanych efektów akustycznych. Natomiast parametry akustyczne pojedynczej ściany z dodatkową, elastycznie zamocowaną okładziną z płyty gipsowo-kartonowej były porównywalne z parametrami uzyskanymi przez ścianę podwójną.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na dużą rolę strukturalnych dróg transmisji dźwięku. Decydujące znaczenie miał sposób zamocowania dodatkowych okładzin do elementów nośnych. Zastosowanie elastycznych przekładek, zawiesi i wiotkich profili montażowych pozwalało uzyskać znacznie lepszą izolacyjność akustyczną niż w przypadku sztywnych zamocowań. Należy jednak zwrócić uwagę, że wszystkie tego typu szczegóły konstrukcyjne i łączniki są delikatne pod względem mechanicznym i wrażliwe na uszkodzenia, co stwarza ryzyko utraty ich korzystnych właściwości na skutek wadliwego montażu, transportu lub niewłaściwej eksploatacji budynku. Realizacja lekkich budynków o odpowiedniej izolacyjności akustycznej wymaga więc stosowania rozwiązań systemowych, zapewnienia dużej precyzji podczas montażu i zaangażowania wysoko wykwalifikowanych pracowników w każdej fazie wykonawczej.

Literatura

- [1] De Geetere L, Ingelaere B. A new building acoustical concept for lightweight timber frame constructions. Proc. Forum Acust. 2014; 1–8.
- [2] Quirt J, Nightingale T, King F. Guide for Sound Insulation in Wood Frame Construction. 2006. <https://doi.org/10.4224/20377048>.
- [3] Nurzyński J. Is thermal resistance correlated with sound insulation? Energy Procedia. 2015; DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.131.
- [4] Caniato M, Bettarello F, Ferluga A, Marsich L, Schmid C, Fausti P. Acoustic of lightweight timber buildings: A review. Renew Sustain Energy Rev. 2017; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.110>.
- [5] EN ISO 10140-(1-5) Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Parts 1 – 5.
- [6] Nowotny Ł, Nurzyński J. The influence of insulating layers on the acoustic performance of lightweight frame floors intended for use in residential buildings. Energies. 2020; DOI: 10.3390/en13051217 2020.
- [7] Caniato M, Bettarello F, Fausti P, Ferluga A, Marsich L, Schmid C. Impact sound of timber floors in sustainable buildings. Build Environ. 2017; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.015>.
- [8] Bradley JS, Birta J. A. On the sound insulation of wood stud exterior walls, J. Acoust. Soc. Am.. 2001; <https://doi.org/10.1121/1.1416200>
- [9] Ljunggren F, Ågren A. Elastic Layers to Reduce Sound Transmission in Lightweight Buildings. Noise Notes. 2013; <https://doi.org/10.1260/1475-4738.12.3.3>.
- [10] Scholl W. Sound insulation of external thermal insulation composite systems (ETICS). Deutschen Jahrestagung für Akust. DAGA 02 Bochum. 2002.
- [11] Quirt JD, Warnock A, Halliwell R, Birta J. Influence of stud type and spacing, screw spacing, and sound absorbing material on the sound transmission through a double panel wall specimen. J Acoust Soc Am. 1992; <https://doi.org/10.1121/1.404482>.

Przyjęto do druku: 16.08.2023 r.