NOISE REDUCTION OF AIR DISTRIBUTION GRILLES USING 3D PRINTED INFILL STRUCTURES

ÚTLUM HLUKU VZDUCHOTECHNICKÝCH DISTRIBUČNÍCH VYÚSTEK POMOCÍ 3D TIŠTĚNÝCH VÝPLŇOVÝCH STRUKTUR

DAVID SVOBODA[1, *], PETRA BERKOVÁ[1], FRANTIŠEK VLACH[1], DAVID BEČKOVSKÝ[1], MILAN GABZDYL[2], MARTIN DEUTSCH[2]

[1]Ústav pozemního stavitelství, Fakulta stavební, VUT v Brně, Brno, Czech Republic
[2]GADES solution, s.r.o., Nový Jičín, Czech Republic
*svoboda.d@fce.vutbr.cz

Abstract: The aim of this research is to reduce the noise level of air distribution grilles using 3D printed infill structures. The grilles are installed on a newly developed autonomous ventilation system, which is used for decentralised ventilation of e.g., school classrooms. Several supply and return grilles with functional gyroid and honeycomb shaped infill structures were created and subsequently printed on an FDM 3D printer. Based on measurements and analysis of the maximum sound pressure levels at different microphone positions around the system and at different airflows, the combination of grilles with the greatest noise reduction was selected. The research is complemented by other data such as spectral analysis of the noise, measurement of the airflow velocity through the grilles and measurement of the room reverberation time. Significant noise reduction was achieved by using the proposed grilles and further conclusions were drawn. 3D printing technology proved to be a very useful tool in this case.

Keywords: air distribution grille, noise reduction, 3D print, gyroid, honeycomb, decentral ventilation, autonomous ventilation

1. INTRODUCTION

Ventilation of schools, as well as other facilities, is important not only to ensure the required comfort, but also to eliminate potential health risks [1]. In addition to conventional natural ventilation through windows, which is accompanied by a number of limitations, especially in polluted and noisy areas, a solution in the form of central forced ventilation is often offered. However, this is usually very costly and requires many structural interventions and modifications. Instead, decentralised ventilation units can be chosen, which are much easier to install and more affordable. However, these are not as high quality and efficient as central units. Therefore, a decentralised autonomous ventilation system is currently being developed that combines the quality and efficiency of a central unit and the cost and simplicity of a decentralised unit.

1. ÚVOD

Větrání škol, ale i jiných zařízení, je důležité nejen z hlediska zajištění požadovaného komfortu, ale také i z hlediska eliminace možných zdravotních rizik [1]. Kromě běžného přirozeného větrání okny, jež doprovází řada omezení zejména ve znečištěných a hlučných oblastech, se často nabízí řešení ve formě centrálního nuceného větrání. To bývá však většinou velmi nákladné a vyžaduje mnohé stavební zásahy a úpravy. Na místo něj lze zvolit decentrální větrací jednotky, jejichž instalace je daleko jednodušší a pořizovací cena výhodnější. Ty však nebývají tak kvalitní a efektivní jako centrální jednotky. Proto je v současnosti vyvíjen decentrální autonomní větrací systém, jež kombinuje kvalitu a efektivitu centrální jednotky a cenu a jednoduchost decentrální jednotky.

Nicméně se jedná, stejně jako decentrálních jednotek, o zdroj hluku instalovaný přímo v chráněném prostoru. Tudíž musí být

However, it is, like decentralised units, a noise source installed directly in the protected space. Thus, all its components must be properly optimised. One of these components is the air distribution elements for supply and extract air. Many different types and sizes of these elements can be found on the market, but their use is often inappropriate. System developers are also concerned with the originality and individuality of their products. For prototyping or individual production of distribution elements, 3D printing technology appears to be a very suitable choice, as it allows the design of any shape and simple and inexpensive production.

The aim of the ongoing research at the Faculty of Civil Engineering of Brno University of Technology is to optimise the newly developed decentralised autonomous ventilation system GADES HEXAGON in terms of its noise performance. The main noise sources have been tentatively identified as distribution grilles. Their size and basic geometry will remain unchanged for the purpose of the research, in particular the suitability of using 3D printed gyroid and honeycomb filling structures as filling of the grilles will be investigated.

2. STATE OF THE ART

2. 1. Principles of acoustic design of distribution elements

The main sources of design principles for air handling equipment and components, including addressing noise issues, are the standards developed by ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), e.g. [2] or [3]. Most of the manuals published by similar associations or HVAC component manufacturers, such as [4] or [5], are based on these. These provide design and installation procedures for eliminating the noise generated by the various components of the HVAC system, including the distribution elements. However, it should be noted that these principles are very general and do not provide precise guidance on how to design their geometry for the most efficient flow and noise reduction. This tends to be addressed by individual commercial manufacturers and their know-how is not usually publicly available.

všechny jeho komponenty správně optimalizovány. Jedněmi z těchto komponent jsou i distribuční prvky pro přívod a odvod vzduchu. Na trhu lze nalézt velké množství různých typů a velikostí těchto prvků, ovšem jejich užití je mnohdy nevhodné. Vývojáři systémů rovněž dbají na originalitu a individuálnost svých produktů. Pro prototypování či individuální výrobu distribučních prvků se jeví technologie 3D tisku jako velmi vhodnou volbou, neboť umožňuje návrh libovolných tvarů a jednoduchou a levnou výrobu.

Cílem probíhajícího výzkumu na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně je optimalizovat nově vyvíjený decentrální autonomní větrací systém GADES HEXAGON z hlediska jeho hlučnosti. Mezi hlavní zdroje hluku byly předběžně identifikovány distribuční vyústky. Jejich velikost a základní geometrie zůstane pro účely výzkumu nezměněna, bude se zjišťovat především vhodnost užití 3D tištěných výplňových struktur typu gyroid a plástev jakožto výplně vyústek.

2. STÁVAJÍCÍ STAV POZNÁNÍ

2. 1. Principy návrhu distribučních prvků z hlediska akustiky

Hlavními zdroji návrhových principů vzduchotechnických zařízení a jejich součástí, včetně řešení problematiky hlučnosti, jsou standardy tvořené společností ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), např. [2] či [3]. Z nich pak pramení většina příruček publikovaných podobnými asociacemi či výrobci vzduchotechnických komponent, jako např. [4] nebo [5]. Jsou zde uvedeny návrhové a montážní postupy, jak eliminovat vznikající hluk z jednotlivých částí vzduchotechnického systému, vč. distribučních prvků. Nutno ovšem podotknout, že tyto zásady jsou velmi obecné a neposkytují přesný návod, jakým způsobem konstruovat jejich geometrii pro co nejefektivnější proudění a útlum hluku. To bývá řešeno jednotlivými komerčními výrobci a jejich know-how není obvykle veřejně publikováno.

The effect of geometry on noise reduction from distribution elements is described in several scientific publications, e.g. [6], [7], [8] However, none of them deals with standard rectangular grilles.

Vliv geometrie na útlum hluku od distribučních prvků je popsána v několika vědeckých publikací, např. [6], [7], [8] a [9]. Žádná se však nezabývá standardními obdélníkovými vyústkami.

2. 2. Use of 3D printing in acoustics and ventilation

Additive manufacturing, or 3D printing, technologies have been successfully applied in many professional sectors, not least the construction industry, over the last decade due to their simplicity, speed and cost. In the context of the construction industry, we usually talk either about the creation of 3D printed architectural models or about large format printing enabling the production of structural parts of buildings or even entire buildings. 3D printing is also starting to be applied in related fields such as acoustics or technical equipment of buildings, including ventilation.

In the context of building acoustics, 3D printing is mainly used for research and creation of absorbers modifying room acoustics and reverberation time, as in the work of [10], [11] and [12]. Furthermore, e.g., in the study [13], the effect of elements produced using additive technology on airflow and aerodynamic noise attenuation is treated.

Additive manufacturing of air distribution outlets and its effect on noise generation is investigated e.g. in [14]. 3D printing has here shown great potential for influencing airflow and attenuation of aerodynamic noise of distribution elements.

2. 2. Využití 3D tisku v akustice a větrání

Technologie aditivní výroby, neboli 3D tisku, byly v posledním desetiletí díky své jednoduchosti, rychlosti a ceně úspěšně aplikovány v mnoha profesních odvětvích, stavebnictví nevyjímaje. V souvislosti se stavebnictvím se většinou hovoří buď o vytváření 3D tištěných architektonických modelů či o velkoformátovém tisku umožňující výrobu konstrukčních částí objektů nebo dokonce celých pozemních a inženýrských staveb. 3D tisk začíná být aplikován i v souvisejících oborech jako je akustika či technická zařízení budov, vč. větrání.

V rámci stavební akustiky je 3D tisk využíván především pro výzkum a tvorbu absorbérů upravujících prostorovou akustiku a dobu dozvuku místnosti, jako např. v práci [10], [11] a [12]. Dále např. ve studii [13] je zpracován vliv prvků vyrobených pomocí aditivní technologie na proudění vzduchu a útlum aerodynamického hluku.

Aditivní výroba distribučních vzduchotechnických vyústek a jejích vliv na generování hluku je zkoumána např. v [14]. 3D tisk zde ukázal velký potenciál pro ovlivnění proudění vzduchu a útlum aerodynamického hluku distribučních prvků.

2. 3. 3D printed infill structures

In the case of model production using 3D printing, filler structures are often used instead of full product fillers, which, despite maintaining the required strength properties, significantly reduce the consumption of the supplied material.

Filler structures are divided into several categories and subcategories - see [15]. Within the 2.5D structures, the most commonly encountered are the so-called honeycombs or honeycomb structures.

Výplňové struktury ve 3D tisku

V případě výroby modelů pomocí 3D tisku se namísto plné výplně výrobku často využívají výplňové struktury, které i přes zachování požadovaných pevnostních vlastností výrazně šetří spotřebu dodávaného materiálu.

Výplňové struktury se dělí do několika kategorií a podkategorií – viz [15]. V rámci 2,5D struktur se nejběžněji můžeme setkat s tzv. voštinami neboli plástvemi. Velmi zajímavým a dnes často využívaným 3D uspořádáním jsou tzv. trojitě periodické

A very interesting and nowadays often used 3D arrangements are the so-called Triply Periodic Minimal Surfaces (TMPS). Examples of these structures are depicted in Fig. 1.

minimální povrchy (angl. Triply Periodic Minimal Surfaces – TMPS). Příklady těchto struktur jsou vyobrazeny na Obr. 1.

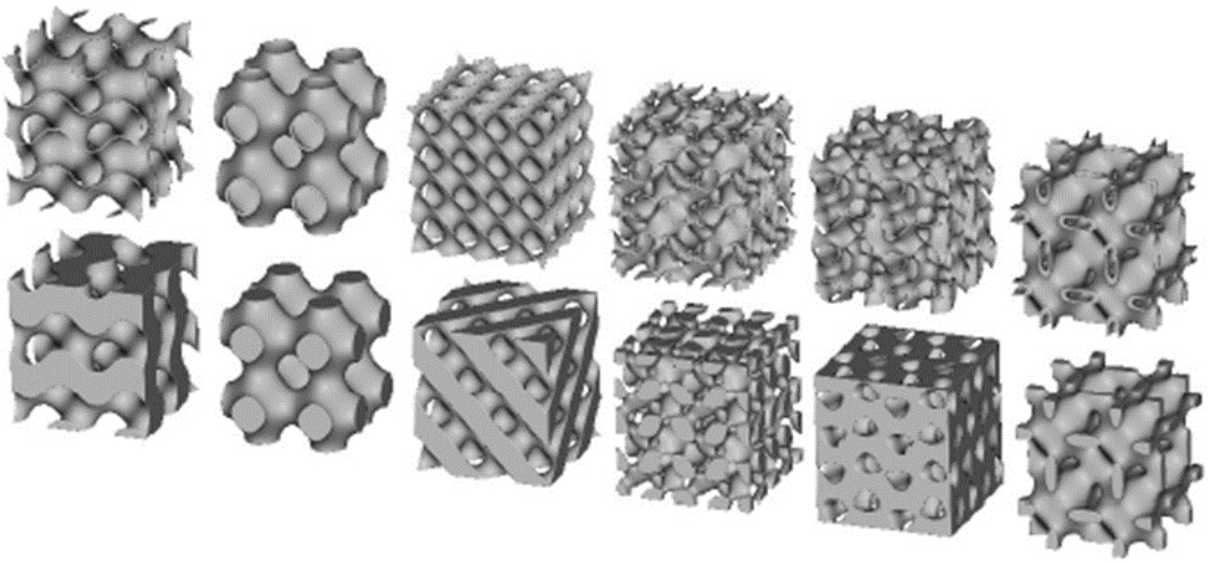


Fig. 1: Examples of TPMS - from left Gyroid, Schwarz P, Schwarz D, Lidinoid, Split P and Neovius [15]

Obr. 1: Ukázky TPMS – zleva Gyroid, Schwarz P, Schwarz D, Lidinoid, Split P a Neovius [15]

One of the best-known representatives of TPMS is the so-called „gyroid". It was defined along with 16 other types of TPMS in 1970 in a paper [16] published by physicist Alan Schoen. The gyroid is the only known example of a TPMS that does not contain straight lines or plane curvatures, hence its symmetry group does not contain any mirror image. Mathematically, it is described by the following equation:

Jedním z nejznámějších zástupců TPMS je tzv. „gyroid". Ten byl spolu s dalšími 16 druhy TPMS definován v roce 1970 v práci [16] publikované fyzikem Alanem Schoenem. Gyroid je jediný známý příklad TPMS, který neobsahuje rovné přímky ani rovinná zakřivení, tudíž jeho skupina symetrie neobsahuje žádný zrcadlový obraz. Matematicky je popsán touto rovnicí:

$$\cos x \sin x + \cos y \sin z + \cos z \sin x = 0 \quad [16]$$

These infill structures have also been applied for their potential to reduce noise, e.g. their sound insulation capacity at work [17] or sound absorption in [18]. The issue of airflow through these structures is addressed in the study [19], with possible noise attenuation in the study [20].

Tyto výplňové struktury jsou uplatňovány i pro jejich možný potenciál snižovat hluk, např. jejich zvuko-izolační schopnost v práci [17] nebo zvuková pohltivost v [18]. Otázka proudění vzduchu těmito strukturami je řešena v rámci studie [19], s možným útlumem hluku pak ve studii [20].

By analysing the current state of knowledge, it can be concluded that the fabrication of air distribution grilles by 3D printing using filler structures as functional outlet fillers and their effect on noise reduction seems to be an untapped area of research.

Analýzou stávajícího stavu poznání lze konstatovat, že výroba vzduchotechnických distribučních vyústek pomocí 3D tisku s využitím výplňových struktur jako funkční výplně vyústky a jejich vliv na útlum hluku se zdá být nezpracovanou oblastí výzkumu.

3. 1. METODOLOGY

3. 1. Description of ventilation system

Based on the evaluation of the state of the art, the research on noise reduction of air distribution grilles using FDM 3D printing on a specific decentral air handling unit installed in the premises of the Faculty of Civil Engineering of Brno University of Technology began.

The device is a newly developed autonomous ventilation system GADES HEXAGON. It is a decentral ventilation system, using available elements of ventilation units allowing equal pressure ventilation with heat and humidity recovery. The internal components are arranged in an insulated chamber of a multi-layered envelope system combining a solid surface board material of agglomerated wood 20 mm thick and internal acoustic foam 50 mm thick. The ventilation air velocity is corrected in the other distribution parts of the assembly so that at the outlet the velocity allows the required air distribution in the room and at the same time meets the acoustic requirements. The ventilation system consists of a machine box for the unit, an installation box for the connection of ducts, a supply box and a return box. Its external dimensions are 1 × 1 × 2 m. The distribution element for supply air is located at the top of the system, the exhaust elements are in the side walls.

In this particular installation, the system features a ventilation unit with an enthalpy heat and moisture recovery heat exchanger from Zehnder. The supply air is delivered from the systems into the room through a rectangular metal outlet with one row of movable slats with dimensions 500 × 130 × 45 mm. The air is exhausted from the room by two rectangular plastic outlets with fixed angled slats of 400 × 132 × 18 mm. The original rectangular distribution outlets are shown in Fig. 2.



Fig. 2: Return grille – left; supply grille – right

3. METODOLOGIE

3.1 Popis větracího systému

Na základě zhodnocení stávajícího stavu poznání započal výzkum hlukového útlumu vzduchotechnických distribučních vyústek pomocí FDM 3D tisku na konkrétním decentrálním vzduchotechnickém zařízení instalovaném v prostorech Fakulty stavební VUT v Brně.

Zařízením je nově vyvíjený autonomní větrací systém GADES HEXAGON. Jedná se o decentrální větrací systém, využívající dostupné elementy větracích jednotek umožňujících rovnotlaké větrání se zpětným ziskem tepla a vlhkosti. Vnitřní komponenty jsou uspořádány v izolované komoře vícevrstvého systému obvodového pláště kombinujícího hmotného povrchového deskového materiálu z aglomerovaného dřeva tl. 20 mm a vnitřní akustické pěny tl 50 mm. Rychlost proudění větracího vzduchu je korigována v dalších rozdělovacích částech sestavy tak, aby v místě vyústky rychlost umožňovala požadovanou distribuci vzduchu do místnosti a současně odpovídala požadavkům akustického hlediska. Větrací systém se skládá ze strojového boxu pro jednotku, instalačního boxu pro dopojení rozvodů, výdechového boxu a sacího boxu. Jeho vnější rozměry jsou 1 × 1 × 2 m. Distribuční prvek pro přívodní vzduch je situován v horní části systému, odvodní prvky jsou v bočních stěnách.

V této konkrétní instalaci systém disponuje větrací jednotkou s entalpickým rekuperačním výměníkem tepla a vlhkosti od společnosti Zehnder. Výdech vzduchu ze systémů do místnosti je zajištěn obdélníkovou kovovou vyústkou s jednou řadou pohyblivých lamel o rozměrech 500 × 130 × 45 mm. Vzduch z místnosti je odváděn pomocí dvou obdélníkových plastových vyústek s pevnými šikmými lamelami o rozměrech 400 × 132 × 18 mm. Originální distribuční obdélníkové vyústky jsou znázorněny na Obr. 2.



Obr. 2: Odvodní (sací) vyústka – vlevo; přívodní (výdechová) vyústka – vpravo

The GADES HEXAGON ventilation system is installed in a 6.28 m × 6.53 m room with a clear height of 3.83 m.

The room serves as a relaxation room and study room for students of FoCE BUT.

3. 2. Design and fabrication of grilles

The Průša i3 MK3s FDM 3D printer was chosen to produce the new air distribution grilles. For the functional part of the air outlets, two structured fillings were selected, which were available within the modelling software – gyroid and honeycomb. Gyroid is a representative of 3D structure of organic shape, honeycomb is a 2.5D structure of planar shape. In total, six types of grilles were designed with different thickness and density of the filling:

- return:
  a. gyroid, 5 mm, 10%,
  b. gyroid, 10 mm, 5%,
  c. honeycomb, 5 mm, 10 %,

- exhalation:
  d. gyroid, 20 mm, 2.5%
  e. honeycomb, 20 mm, 5%,
  f. honeycomb, 40 mm, 5%.

The printed outlet models are shown in Fig. 3.

Větrací systém GADES HEXAGON je instalován v místnosti o rozměrech 6,28 × 6,53 m o světlé výšce 3,83 m. Místnost slouží jako odpočinková místnost a studovna pro studenty FAST VUT v Brně.

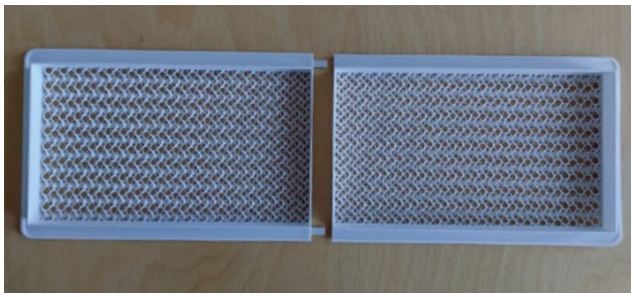
3. 2. Návrh a výroba vyústek

Pro výrobu nových vzduchotechnických vyústek byla zvolena FDM 3D tiskárna Průša i3 MK3s. Pro funkční část vyústek byly vybrány dvě strukturované výplně, jež byly dostupné v rámci modelovacího softwaru – gyroid a plástev. Gyroid je zástupcem 3D struktury organického tvaru, plástev 2,5D struktury rovinného tvaru. Celkem bylo navrženo šest typů vyústek
o různé tloušťce a hustotě výplně:

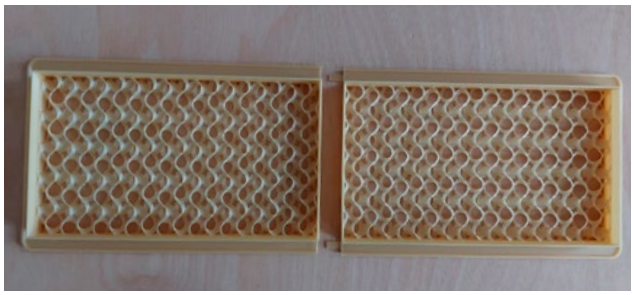
- sání:
  a. gyroid, 5 mm, 10 %,
  b. gyroid, 10 mm, 5 %,
  c. plástev, 5 mm, 10 %,

- výdech:
  d. gyroid, 20 mm, 2,5 %
  e. plástev, 20 mm, 5 %,
  f. plástev, 40 mm, 5 %.

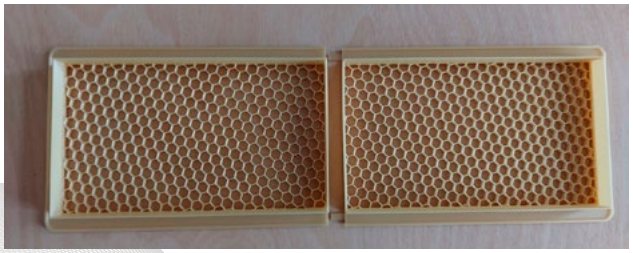
Vytištěné modely vyústek jsou zobrazeny na Obr. 3.



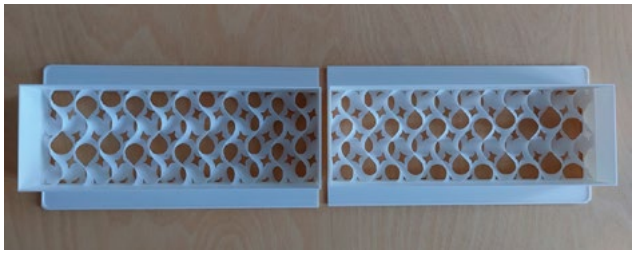
a) gyroid, 5 mm, 10 %



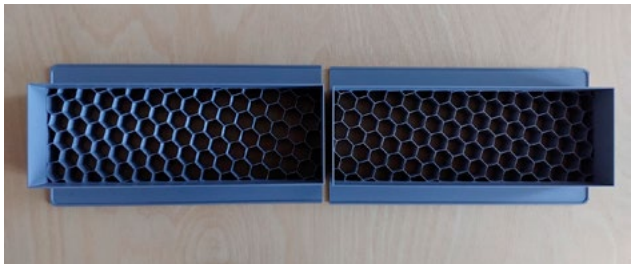
b) gyroid, 10 mm, 5 %



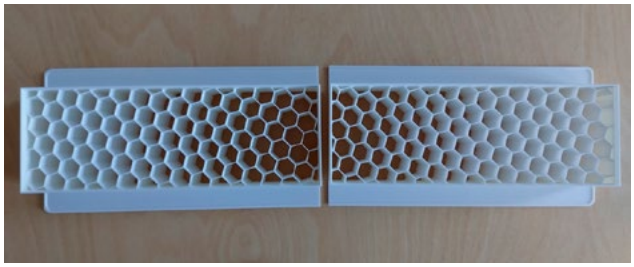
c) plástev, 5 mm, 10 %



d) gyroid, 20 mm, 2,5 %



c) plástev, 5 mm, 10 %



d) gyroid, 20 mm, 2,5 %

Fig. 3: Prints of the proposed grilles

Obr. 3: Výtisky navržených vyústek

3. 3. Measurement and evaluation

Measurement and evaluation of the noise caused by the operation of the autonomous ventilation system GADES HEXAGON with the proposed types of grilles was carried out according to the methodological instructions given in the Bulletin of the Ministry of Health of the Czech Republic 11-2017 [21]. The measurements were performed using a sound meter with frequency analyzer Brüel & Kjær 2270 and a pre-polarized 1/2'' microphone Brüel & Kjær 4189, which correspond to accuracy class 1 according to

ČSN EN 61672-1 [22]. A total of three microphone positions were chosen, all at a height of 1.5 m above the floor – in the centre of the room at approximately 3.4 m from the system (position 1), 1 m from the front of the system (position 2) and 1 m from the side of the system with the return grilles (position 3). Each position is considered separately. See Fig. 4 for microphone positions and sample measurements.

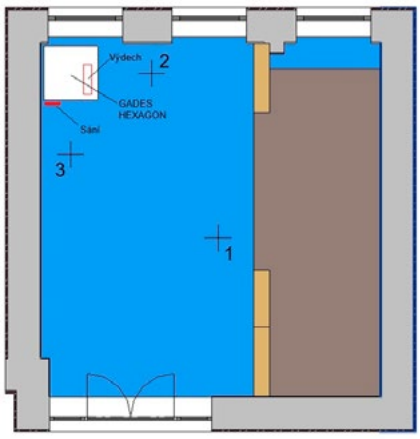


Fig. 4: Schematic of microphone positions within the room (left); sample measurement in position 2 (right)

3. 3. Měření a vyhodnocení

Měření a vyhodnocení hluku způsobeného provozem autonomního větracího systému GADES HEXAGON s navrženými typy vyústek bylo provedeno dle metodického návodu uvedeného ve Věstníku Ministerstva zdravotnictví České republiky 11-2017 [21]. K měření bylo užito zvukoměru s frekvenčním analyzátorem Brüel & Kjær 2270 a předpolarizovaného 1/2'' mikrofonu Brüel & Kjær 4189, jenž odpovídají třídě přesnosti 1 dle

ČSN EN 61672-1 [22]. Byly zvoleny celkem tři polohy umístění mikrofonu, všechny ve výšce 1,5 m nad podlahou – ve středu místnosti ve vzdálenosti cca 3,4 m od systému (poloha č. 1), 1 m od čelní strany systému (poloha č. 2) a 1 m od boční strany systému se sacími vyústkami (poloha č. 3). Každá poloha je posuzována samostatně. Polohy mikrofonu a ukázka z měření viz Obr. 4.



Obr. 4 Schéma poloh mikrofonu v rámci místnosti (vlevo), ukázka měření v poloze č. 2 (vpravo)

The noise from the system was measured in two performance settings - for air flow rates of 450 m^3/h and 600 m^3/h.

In each of these flow rates, the original condition with original grilles, the condition without grilles, the condition with return grilles only and the condition with supply grilles only were monitored. The combination of the honeycomb installed at the bottom of the exhalation outlet as a flow equalizing grid with another grille is also measured within the supply grilles. According to the current state of the art, it is expected that the use of an equalizing grid can reduce the overall noise of the outlet – see [4]. Based on the values obtained, the combination of return and supply grille with the apparent best possible overall noise attenuation was selected and compared with the initial condition.

The determining indicator of the noise from the operation of the plant is the maximum sound pressure level $L_{A,max}$. The resulting $L_{A,max}$ values are determined as the mean values of the measurement sets, which are corrected for background noise L_B.

To determine the boundary conditions, an additional measurement of the airflow velocity through the grilles was performed. The measurements were performed using a Laserliner Airflow Test-Master anemometer. The observed maximum air velocity was collected over the entire area of the grille.

In addition, a reverberation time measurement was performed within the reference data using the impulse response method according to ČSN EN ISO 3382-2 [23].

4. RESULTS

An overview of the obtained values of the maximum sound pressure level LA,max with installed grilles, in individual positions and air flows through the unit is given in Tab. 1.

Hluk ze zařízení byl měřen ve dvou výkonnostních nastaveních – pro průtok vzduchu 450 m^3/h a 600 m^3/h. V každém tomto průtoku byl sledován původní stav s originálními vyústkami, stav bez vyústek, dále pouze se sacími vyústkami a pouze s výdechovými vyústkami. V rámci výdechových vyústek je změřena i kombinace plástve instalované ve spodní části výdechového otvoru jakožto mřížky pro usměrnění proudění s jinou vyústkou. Dle stávajícího stavu poznání je očekáváno, že užití vyrovnávací mřížky může zredukovat celkový hluk vyústky – viz [4]. Na základě získaných hodnot byla vybrána kombinace sací a výdechové vyústky se zdánlivě nejlepším možným celkovým útlumem hluku a porovnána s původním stavem.

Určujícím ukazatelem hluku z provozu zařízení je maximální hladina akustického tlaku- $L_{A,max}$. Výsledné hodnoty $L_{A,max}$ jsou stanoveny jako střední hodnoty měřených souborů, jež jsou korigovány na hluk pozadí L_B.

Pro stanovení okrajových podmínek bylo provedeno doplňkové měření rychlosti proudění vzduchu vyústkami. Měření bylo provedeno pomocí anemometru Laserliner Airflow Test-Master. Sledovaná maximální rychlost vzduchu byla zjišťována po celé ploše vyústky.

Dále bylo provedeno v rámci referenčních údajů měření doby dozvuku metodou impulsové odezvy podle ČSN EN ISO 3382-2 [23].

4. VÝSLEDKY

Přehled získaných hodnot maximální hladiny akustického tlaku LA,max s instalovanými vyústkami, v jednotlivých polohách a průtocích vzduchu jednotkou je uveden v Tab. 1.

Sání (Return)	Výdech (Supply)	Poloha (Position)	Průtok (Flow) [m³/h]		Sání (Return)	Výdech (Supply)	Poloha (Position)	Průtok (Flow) [m³/h]	
			450	600				450	600
			$L_{A,max}$ [dB]					$L_{A,max}$ [dB]	
Original	Original	1	37,4	45,9	X	Plástev, 40 mm, 5 %	1	34,9	40,9
		2	39,3	45,6			2	36,9	41,6
		3	44,0	50,3			3	38,6	44,6
X	Original	1	34,6	41,1	X	Plástev 20 mm + Original	1	34,5	40,4
		2	37,9	40,9			2	36,8	41,2
		3	40,1	44,7			3	38,5	44,4
Original	X	1	36,7	45,7	X	Plástev 20 mm + Plástev 40 mm	1	34,9	41,3
		2	38,5	45,5			2	37,1	41,8
		3	43,1	50,1			3	38,8	44,9
X	X	1	34,5	40,5	X	Plástev 20 mm + Gyroid 20 mm	1	35,3	41,5
		2	36,8	40,7			2	37,0	42,2
		3	39,0	44,7			3	39,4	44,8
Gyroid, 5 mm, 10 %	X	1	34,2	40,0	X	Plástev 40 mm + Original	1	34,6	40,5
		2	36,8	40,3			2	36,4	41,2
		3	38,7	44,5			3	38,6	44,5
Gyroid, 10 mm, 5 %	X	1	34,2	40,1	X	Plástev 40 mm + Plástev 20 mm	1	34,9	41,1
		2	36,8	40,2			2	36,7	41,6
		3	39,2	44,3			3	38,3	45,0
Plástev, 5 mm, 10 %	X	1	34,3	40,0	X	Plástev 40 mm + Gyroid 20 mm	1	35,2	41,4
		2	36,7	40,7			2	37,0	42,2
		3	38,9	44,6			3	38,5	45,0
X	Gyroid 20 mm, 2,5 %	1	35,8	42,7	Gyroid, 10 mm, 5 %	Plástev 20 mm + Original	1	34,2	40,6
		2	38,0	43,7			2	37,0	41,1
		3	39,3	45,8			3	39,2	44,7
X	Plástev, 20 mm, 5 %	1	35,3	41,3	Pozn.: „spodní vyrovnávací mřížka" + „horní vyústka"				
		2	36,9	42,0					
		3	38,7	44,5					

Tab. 1: Summary of measured values of maximum sound pressure levels $L_{A,max.}$

Tab. 1: Přehled naměřených hodnot maximálních hladin akustického tlaku $L_{A,max}$

Overall, greater differences in values (reduction) can be observed at higher flow rates than at lower flow rates. However, the differences between grilles within the two flow rates are negligible. Therefore, for the sake of

Celkově lze pozorovat větší rozdíly hodnot (útlumy) při větším průtoku než při menším. Avšak rozdíly mezi jednotlivými vyústkami v rámci obou průtoků jsou zanedbatelné. Proto budou z důvodu větší přehlednosti v následujících

clarity, only the results for a flow rate of 600 m³/h will be shown in the following graphs. A graphical representation of the original condition with and without the original grilles is shown in Chart 1.

grafech znázorněny pouze výsledky pro průtok 600 m³/h. Grafické znázornění původního stavu s originálními vyústkami a bez nich je znázorněno v Graf 1.

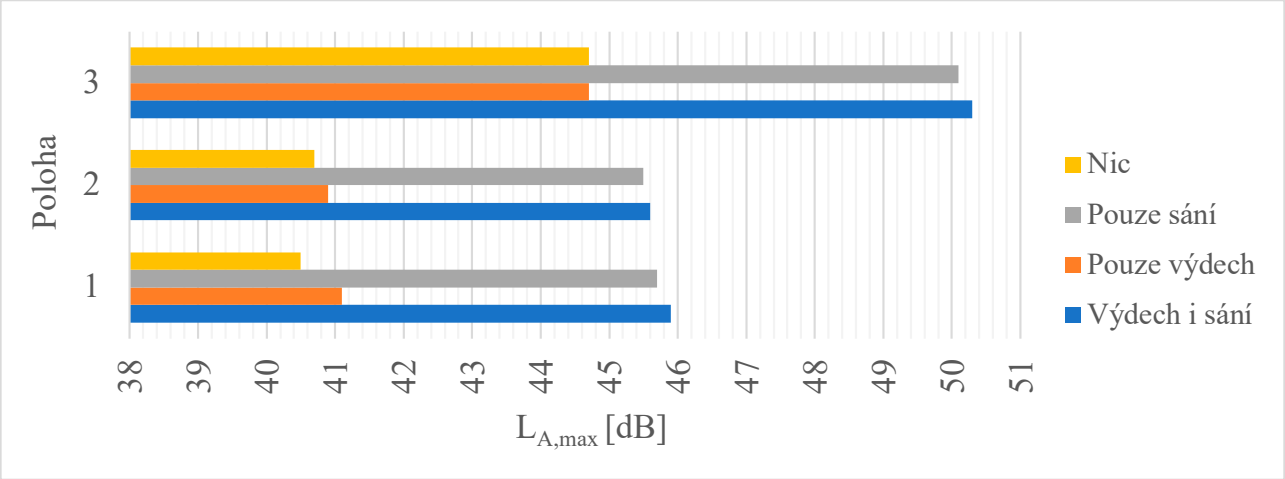


Chart 1: Maximum sound pressure levels – original condition – flow rate 600 m³/h

Graf 1: Maximální hladiny akustického tlaku – původní stav – průtok 600 m³/h

At first glance, it can be identified that the return grilles contribute the most to the overall sound pressure level. Depending on the position of the microphone, the contribution from them is (4.8–5.4) dB, while for the supply grille it is only (0–0.6) dB.

A graphical representation of the differences in the return grilles is shown in *Chart 2.*

Na první pohled lze identifikovat, že k celkové hladině akustického tlaku nejvíce přispívá sací vyústka. V závislosti na poloze mikrofonu je příspěvek od sací vyústky (4,8–5,4) dB, zatímco u výdechové pouze (0–0,6) dB.

Grafické znázornění rozdílů v sacích vyústkách je znázorněno v *Graf 2.*

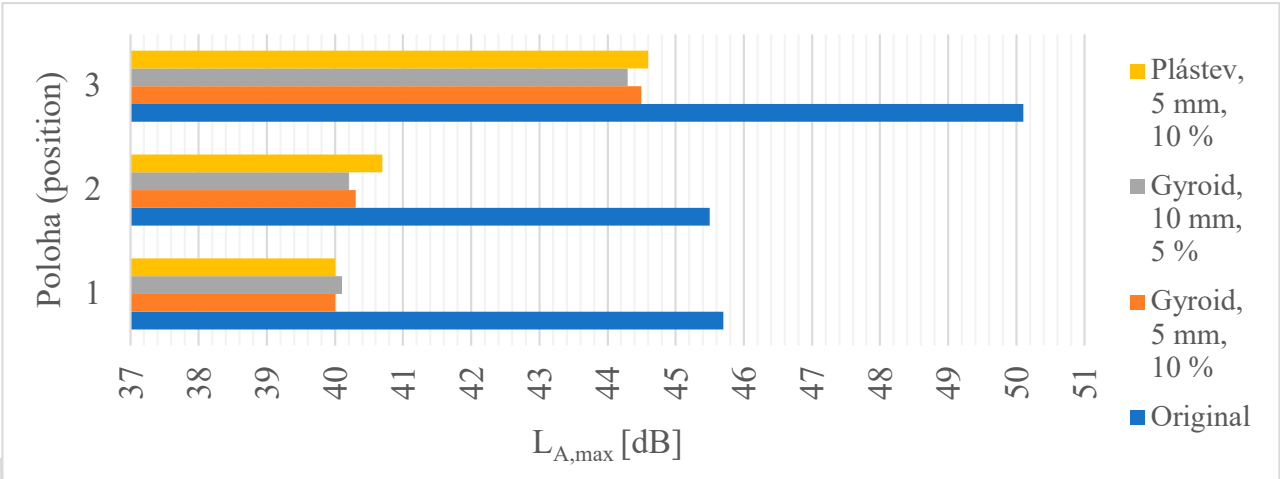


Chart 2: Maximum sound pressure levels – return grilles – flow rate 600 m³/h

Graf 2: Maximální hladiny akustického tlaku – sací vyústky – průtok 600 m³/h

As can be observed, the newly designed gyroid and honeycomb type return grilles have significantly reduced the maximum sound pressure level compared to the originally used fixed blade grilles.

The differences between the newly designed grilles are then in the range of only 0.05–0.5 dB. For the gyroid type grilles,

10 mm thick, 5% fill density, the highest noise reduction is observed on average. This grille is used for the final combination.

A graphical representation of the differences in the supply grilles is shown in *Chart 3.*

Jak lze pozorovat, nově navržené sací vyústky typu gyroid a plástev markantně snížili maximální hladinu akustického tlaku oproti původně použité vyústce

s pevnými lamelami. Rozdíly mezi jednotlivými nově navrženými vyústkami jsou pak v rozmezí pouze 0,05–0,5 dB.

U vyústky typu gyroid, tl. 10 mm, hustota výplně 5 % je pozorován průměrně největší útlum hluku. Tato vyústka je použita pro finální kombinaci.

Grafické znázornění rozdílů ve výdechových vyústkách je znázorněno v *Graf 3.*

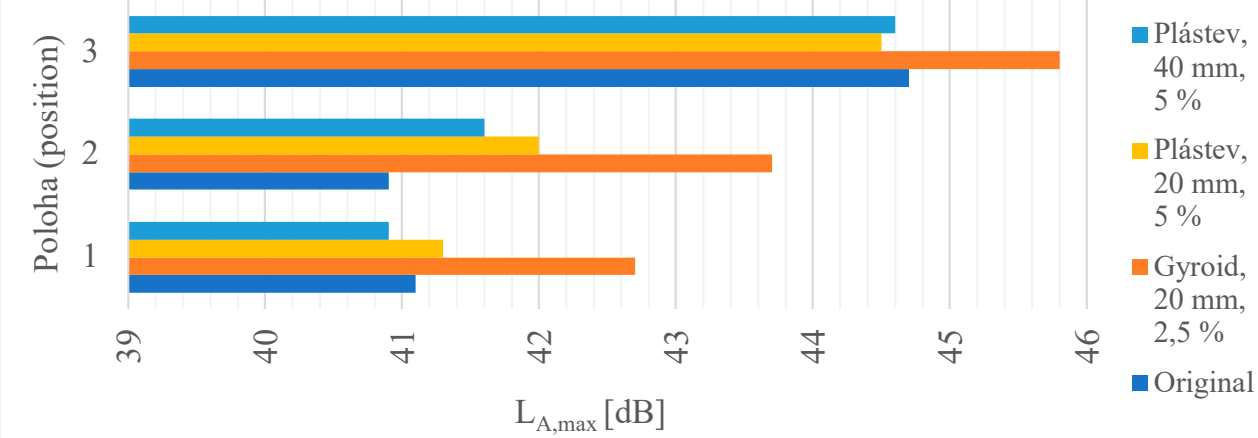


Chart 3: Maximum sound pressure levels – exhaust outlets – flow rate 600 m³/h

Graf 3: Maximální hladiny akustického tlaku – výdechové vyústky – průtok 600 m³/h

No more dramatic noise reduction can be observed on the supply side as was the case with the return grilles. When using a gyroid type grille, on the other hand, the values are significantly higher than with the originally installed outlet with movable blades. The 40 mm thick honeycomb type outlet achieves slightly higher reduction than the 20 mm thick one in some positions (approx. 0.4 dB). However, their overall effect varies based on airflow and microphone distance and comes out differently for different calculation points. It is not possible to state unequivocally whether noise reduction has been achieved with them compared to the original grille.

The honeycomb type grilles were also used as equalizing grids for the other grilles. A graphical comparison of their effect is shown in *Chart 4,* only the values in position 1 are shown.

Na straně výdechu již nelze pozorovat tak dramatické útlumy hluku, jako tomu bylo v případě sací vyústky. Při užití vyústky typu gyroid jsou hodnoty naopak výrazně vyšší než u původně instalované vyústky s pohyblivými lamelami. Vyústka typu plástev o tloušťce 40 mm dosahuje v některých polohách lehce většího útlumu než o tloušťce 20 mm (cca o 0,4 dB). Jejich celkový vliv se však liší na základě průtoku vzduchu a vzdálenosti mikrofonu a vychází pro různé výpočtové body rozdílně. Nelze jednoznačně konstatovat, zdali bylo pomocí nich dosaženo útlumu hluku oproti originální vyústce.

Vyústky typu plástev byly dále použity jako vyrovnávací mřížky pro ostatní vyústky. Grafické srovnání jejich vlivu je zobrazeno v *Graf 4,* zobrazeny jsou pouze hodnoty v poloze č. 1.

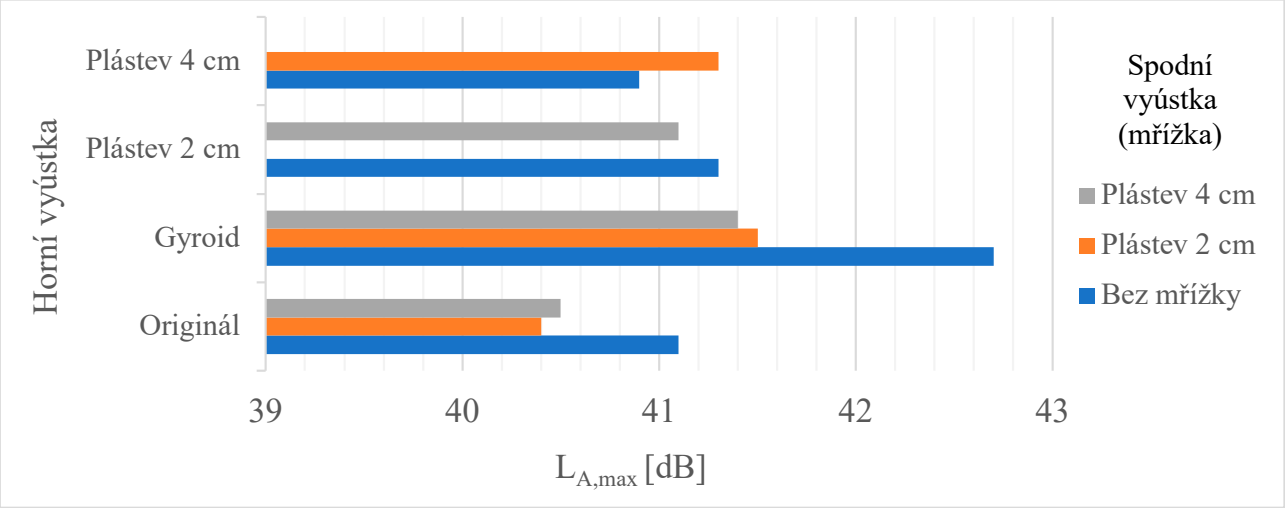


Chart 4: Maximum sound pressure levels – supply grilles with equalizing grille – flow rate 600 m³/h, position 1

Graf 4: Maximální hladiny akustického tlaku – výdechové vyústky s vyrovnávací mřížkou – průtok 600 m³/h, poloha č. 1

For all supply grilles – both original and designed, a noticeable noise reduction can be observed when using an equalizing grille in the form of a honeycomb-shaped grille. Only when a 20 mm thick honeycomb-type grille as an equalizing grid is used for a 40 mm thick honeycomb-type grille there is no noise reduction. Of all the supply grilles tested, the combination of the 20 mm thick honeycomb type outlet as an equalizing grille with the original grille with movable blades performs best. These grilles are used for the final combination.

A comparison of the original condition with the original grilles and the newly designed condition is shown in *Chart 5.*

U všech výdechových vyústek – originálních i navržených, lze při použití vyrovnávací mřížky ve formě vyústky tvaru plástve pozorovat znatelnou redukci hluku. Pouze v případě, kdy je pro vyústku typu plástev tl. 40 mm použito jako vyrovnávací mřížky vyústky typu plástev tl. 20 mm, k redukci hluku nedochází. Ze všech zkoušených výdechových vyústek vychází nejlépe kombinace vyústky typu plástev tl. 20 mm jako vyrovnávací mřížky s originální vyústkou s pohyblivými lamelami. Tyto vyústky jsou použity pro finální kombinaci.

Porovnání původního stavu s originálními vyústkami a nově navrženým stavem je znázorněno v *Graf 5.*

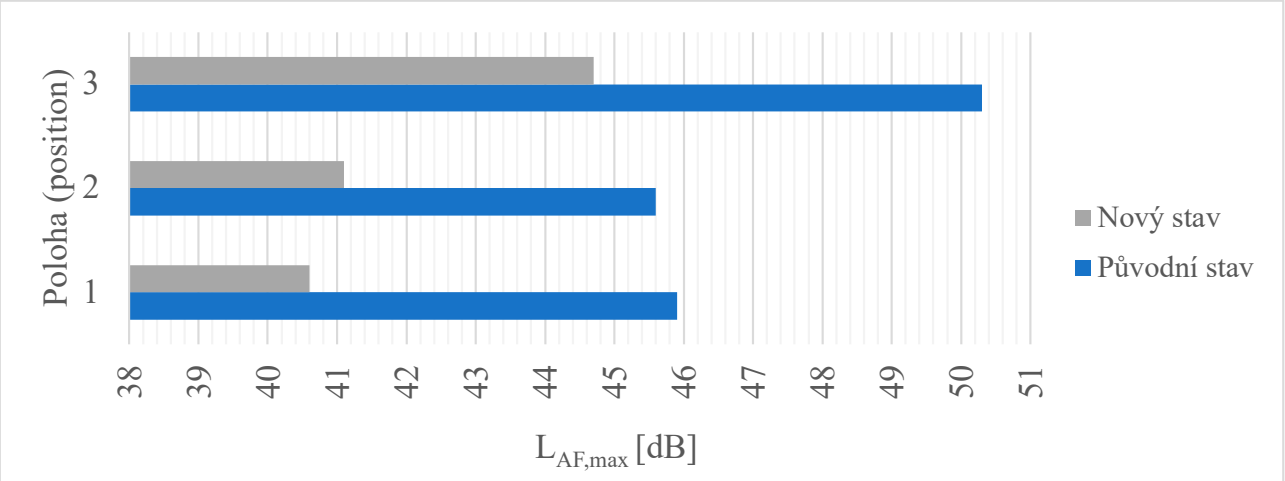


Chart 5: Maximum sound pressure levels original and new condition – flow 600 m³/h

Graf 5: Maximální hladiny akustického tlaku – původní a nový stav – průtok 600 m³/h

The final combination of grilles for comparison with the original condition is a gyroid type grille, 10 mm thick, filling density 5% on the return side and a honeycomb type grille, 20 mm thick, filling density 5% as an equalizing grid for the original rectangular grille with movable slats. Using these newly designed grilles manufactured using FDM 3D printing, reduction up to 5.6 dB was achieved, depending on the position of the microphone and the airflow through the unit. At the most critical calculation point (position 3 at a flow rate of 600 m³/h), the maximum sound pressure level LA,max induced by the operation of the GADES HEXAGON autonomous ventilation system is equal to 44.7 dB.

The spectral analysis is shown for the original condition, the condition without grilles, the newly designed condition and the residual background noise to determine the possible tonal component. Only the values in position 1 are monitored. The values for a flow rate of 450 m³/h are shown in Chart 6 and for a flow rate of 600 m³/h in *Chart 7.*

Finální kombinací vyústek pro porovnání s původním stavem je vyústka typu gyroid, tl. 10 mm, hustota výplně 5 % na straně sání a vyústka typu plástev, tl. 20 mm, hustota výplně 5 % jakožto vyrovnávací mřížka pro originální obdélníkovou vyústku s pohyblivými lamelami. Při použití těchto nově navržených vyústek vyrobených pomocí FDM 3D tisku bylo dosaženo útlumu až 5,6 dB, v závislosti na poloze mikrofonu a průtoku vzduchu jednotkou. V nejkritičtějším výpočtovém bodě (poloha č. 3 při průtoku 600 m³/h) je maximální hladina akustického tlaku LA,max vyvolaná provozem autonomního větracího systému GADES HEXAGON rovna 44,7 dB.

V původním stavu, stavu bez vyústek, v nově navrženém stavu a zbytkovém hluku pozadí je zobrazena spektrální analýza pro určení možné tónové složky. Sledovány jsou hodnoty pouze v poloze č. 1. Hodnoty pro průtok 450 m³/h jsou znázorněn v Graf 6, pro průtok 600 m³/h v *Graf 7.*

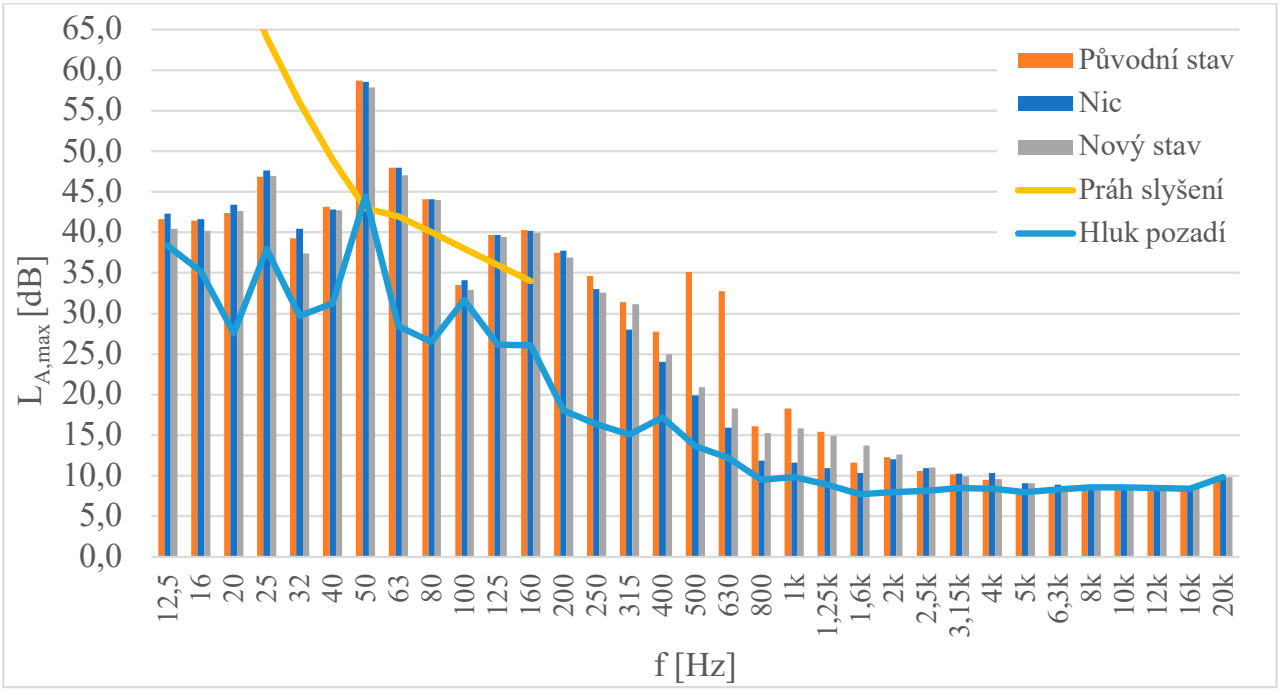


Chart 6: Spectral distribution of noise – original condition – flow rate 450 m³/h

Graf 6: Spektrální rozložení hluku – původní stav – průtok 450 m³/h

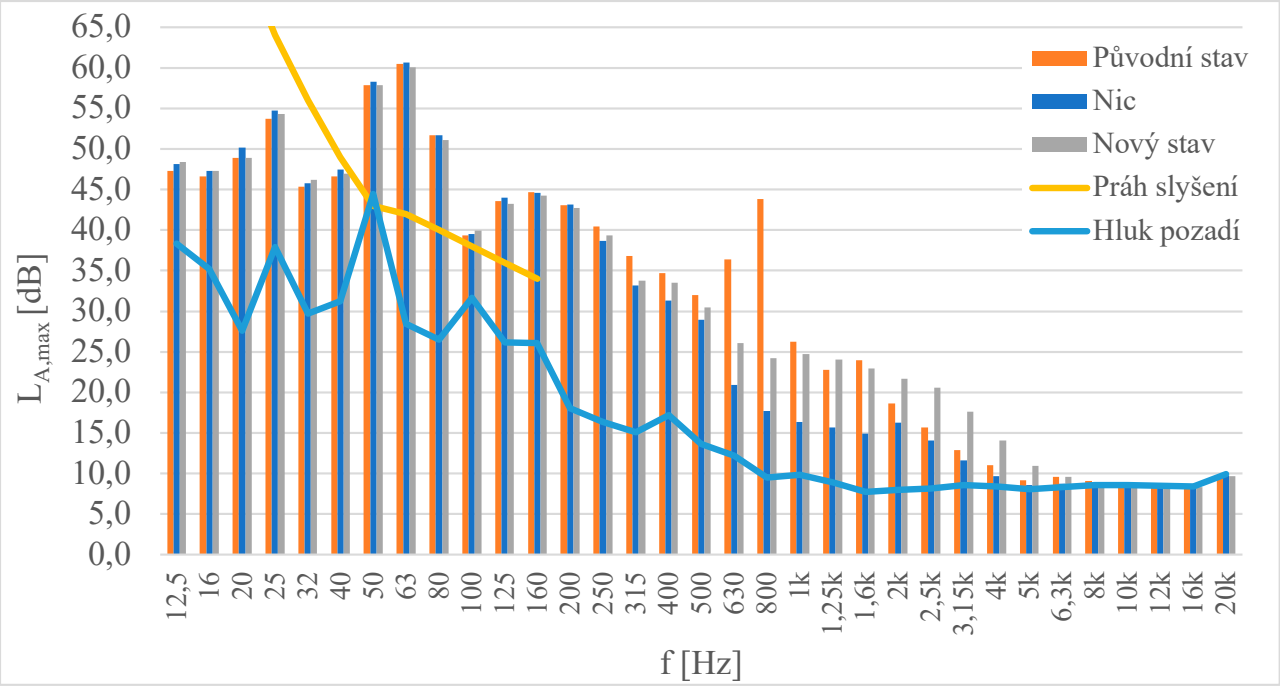


Chart 7: Spectral distribution of noise – original condition – flow rate 600 m³/h

Graf 7: Spektrální rozložení hluku – původní stav – průtok 600 m³/h

Within the audible range, at a flow rate of 450 m³/h a tonal component at a frequency of 50 Hz can be observed in all monitored states, at a flow rate of 600 m3/h the component is also extended by 60 Hz. This may be due to the operation of the fan motor with a possible contribution from background noise, which also shows a tonal component at 50 Hz. In the original condition with the original grilles, tonal components at 500/630 Hz can also be observed at a flow rate of 450 m³/h and 800 Hz at a flow rate of 600 m³/h. These tonal components have been eliminated by the use of the newly designed grilles.

For the same grille combinations as in the spectral analysis, the maximum velocities flowing through the grilles are measured – see *Tab. 2.*

V rámci slyšitelného rozsahu lze při průtoku 450 m³/h pozorovat tónovou složku na frekvenci 50 Hz ve všech sledovaných stavech, při průtoku 600 m³/h je složka rozšířená i o 63 Hz. To může být způsobeno chodem motoru ventilátoru s možným příspěvkem hluku pozadí, jež rovněž vykazuje tónovou složku na 50 Hz. V původním stavu s originálními vyústkami lze dále pozorovat tónové složky na 500/630 Hz při průtoku 450 m³/h a 800 Hz při průtoku 600 m³/h. Tyto tónové složky byly užitím nově navržených vyústek eliminovány.

Pro stejné kombinace vyústek jako ve spektrální analýze jsou změřeny maximální rychlosti proudící přes vyústky – viz *Tab. 2.*

Průtok [m³/h]	Komb.	Vyústka	Max. rychlost [m/s]	L_A,max [dB]
450	Original	Výdech	4,34	37,4
		Sání – horní	2,84	
		Sání – spodní	2,66	
	Nic	Výdech	4,16	34,5
		Sání – horní	2,24	
		Sání – spodní	1,84	
	Nové	Výdech	4,22	34,2
		Sání – horní	2,36	
		Sání – spodní	2,24	
600	Original	Výdech	6,03	45,9
		Sání – horní	3,8	
		Sání – spodní	3,5	
	Nic	Výdech	5,5	40,5
		Sání – horní	2,96	
		Sání – spodní	2,42	
	Nové	Výdech	5,54	40,6
		Sání – horní	3,38	
		Sání – spodní	3,08	

Tab. 2: Air flow velocities through the outlets

Tab. 2: Rychlosti proudění vzduchu vyústkami

At a flow rate of 450 m³/h, the maximum speed on the supply side is on average 4.2 m/s, on the return side 2.4 m/s. At a flow rate of 600 m³/h, the maximum velocity on the supply side averages 5.7 m/s, on the return side 3.2 m/s.

The measured velocities are close to or exceed the velocities at which aerodynamic noise is normally generated, namely more than 3.5 m/s for the supply and 2.5 m/s for the return [4]. Furthermore, a direct dependence can be observed where the sound pressure level increases with increasing flow velocity.

For reference purposes, the reverberation time of the room in which the ventilation system is installed was measured. The average reverberation time T20 is equal to 0.9 s. The frequency distribution is shown in *Chart 8.*

Při průtoku 450 m³/h je maximální rychlost na straně výdechu průměrně 4,2 m/s, na straně sání 2,4 m/s. Při průtoku 600 m³/h je maximální rychlost na straně výdechu průměrně 5,7 m/s, na straně sání 3,2 m/s. Naměřené rychlosti jsou blízko či přesahují rychlosti, při kterých běžně vzniká aerodynamický hluk, konkrétně více než 3,5 m/s pro výdech a 2,5 m/s pro sání [4]. Dále lze pozorovat přímou závislost, kde s rostoucí rychlostí proudění se zvyšuje hladina akustického tlaku.

Pro referenční účely byla změřena doba dozvuku místnosti, ve které je větrací systém instalován. Průměrná doba dozvuku T20 je rovna 0,9 s. Frekvenční rozdělení je znázorněno v *Graf 8.*

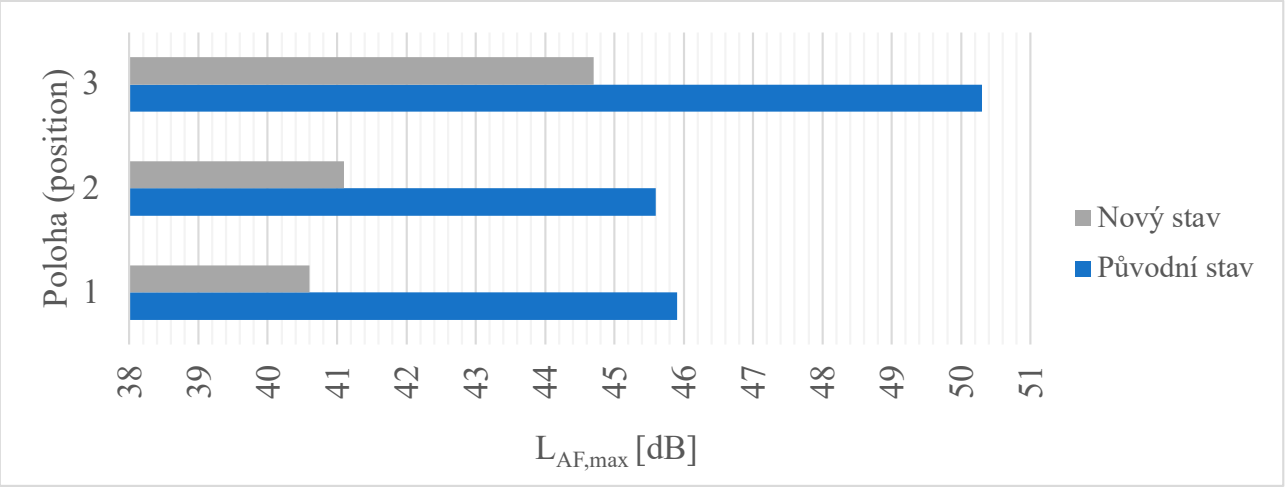


Chart 8: Measured room reverberation time

Graf 8: Naměřená doba dozvuku místnosti

5. DISCUSSION

In the course of the work carried out, several facts have been found regarding air distribution grilles manufactured by FDM 3D printing using gyroid and honeycomb type filling structures of different thicknesses and filling densities as functional parts of the grilles.

Firstly, it should be noted that the research on the air grilles was carried out on a unique prototype air handling system installed outside laboratory conditions. However, the sound pressure levels of the system itself without the grilles, the residual background noise levels, the airflow velocities through the grilles and the room reverberation time are provided as reference data.

The gyroid type infill structure appears to be more suitable for lower airflow velocities. Sufficient reduction was achieved using the gyroid structure for return grilles with airflow velocities between (2,5–3,5) m/s. In contrast, for the supply grilles where the airflow velocity was between (4,0–6,0) m/s, there was an increase in noise. This is due to possible turbulence occurring when flowing over the curved surfaces of the gyro. However, this was only a simple filling predefined by the software. The question for the future is the possible use of similar organic shapes but with a programmable structure that would eliminate these shortcomings.

The honeycomb structure, similar to the gyroid, appears suitable for return grilles and low velocities. Within the supply,

5. DISKUSE

V rámci vypracované práce bylo zjištěno několik skutečností ohledně distribučních vzduchotechnických vyústek vyrobených pomocí FDM 3D tisku s využitím výplňových struktur typu gyroid a plástev o různých tloušťkách a hustotách výplně jako funkčních částí vyústek.

Nejprve nutno podotknout, že výzkum vyústek byl prováděn na unikátním prototypu vzduchotechnického systému instalovaném „in-situ“ mimo laboratorní podmínky. Nicméně v rámci referenčních údajů jsou zde uvedeny hladiny akustického tlaku samotného systému bez vyústek, hladiny zbytkového hluku pozadí, rychlosti proudění vzduchu přes vyústky a doba dozvuku místnosti.

Výplňová struktura typu gyroid se jeví vhodná spíše pro menší rychlosti proudění vzduchu. U sacích vyústek, u kterých se rychlost proudění vzduchu pohybovala mezi (2,5–3,5) m/s, bylo za jejího použití dosaženo dostatečného útlumu. V případě výdechových vyústek, kde se rychlost proudění vzduchu pohybovala mezi (4,0–6,0) m/s, naopak došlo k nárustu hluku. Je to dáno možným vznikem turbulencí při proudění po zakřivených plochách gyroidu. Nicméně šlo pouze

o jednoduchou výplň předdefinovanou softwarem. Otázkou do budoucna je možné užití podobných organických tvarů ovšem s naprogramovatelnou strukturou, jež by eliminovala tyto nedostatky.

the results are ambiguous. However, these fillers can be successfully used as an equalizing grid to direct the airflow. When the honeycomb structure was installed in the inner part of the supply port, noise reduction was achieved in all cases.

6. CONLUSION

The subject of this work was the noise reduction of air distribution grilles manufactured by FDM 3D printing using infill structures for the functional part of the grilles.

The grilles were tested on a newly developed prototype of the GADES HEXAGON decentralised autonomous ventilation system, which is mainly used for ventilation of schools, classrooms and lecture halls. Several return and supply grilles with gyroid and honeycomb fillings of different thicknesses and filling densities were created. In addition, the maximum sound pressure level was measured at several microphone positions for combinations of grilles and at different airflows. The measurements are complemented by spectral analysis, air velocity measurements and room reverberation time measurements.

The following conclusions can be drawn from the results of the work:

- in the original condition, the noisiest elements were the return grilles with fixed slats;
- on the return side, gyroid and honeycomb type grilles reduced the noise level, probably due to the lower air velocities;
- on the supply side, due to the higher velocities, the gyroid did not seem to be a suitable grille filler, the noise levels were higher than the original;
- the use of a honeycomb-type filling for the supply does not have a clear result, the values differ from the original condition and from one another according to the location of the microphone and the airflow;
- the honeycomb type outlet can be used as a equalizing grid to direct the airflow, with its use there was a reduction in noise for all other combinations;
- in the combination with the greatest noise reduction the gyroid type grille, 10 mm thick, 5% filling on the return side and the honeycomb type grille, 20 mm thick, 2.5% filling as an equalizing grid for the origi-

Struktura plástve se obdobně jako gyroid jeví pro sací vyústky a malé rychlosti vhodná. V rámci výdechu jsou výsledky nejednoznačné. Tyto výplně lze však úspěšně využít jako vyrovnávací mřížku pro usměrnění proudu vzduchu. Při instalaci struktury plástve do vnitřní části výdechového otvoru došlo ve všech případech k redukci hluku.

6. ZÁVĚR

Předmětem této práce byl útlum hluku vzduchotechnických distribučních vyústek vyrobených pomocí FDM 3D tisku za užití výplňových struktur pro funkční část vyústek.

Vyústky byly zkoušeny na nově vyvíjeném prototypu decentrálního autonomního větracího systému GADES HEXAGON, jenž nachází uplatnění především pro větrání škol, učeben

a přednáškových sálů. Bylo vytvořeno několik sacích a výdechových vyústek s výplněmi typu gyroid a plástev o různých tloušťkách a hustotě výplně. Dále byla v několika polohách mikrofonu měřena maximální hladina akustického tlaku pro kombinace vyústek a při různých průtocích vzduchu. Měření je doplněno

o spektrální analýzu, měření rychlosti proudění vzduchu a měření doby dozvuku místnosti.

Z výsledků práce lze vyvodit následující závěry:

- v původním stavu byly nejhlučnějšími elementy sací vyústky s pevnými lamelami;
- na straně sání vyústky typu gyroid
- i plástev hladinu hluku snížili, patrně díky menším rychlostem proudění vzduchu;
- na straně výdechu se díky vyšším rychlostem nezdá být gyroid jako vhodná výplň vyústky, hodnoty hluku byly vyšší než původní;
- užití výplně typu plástev pro výdech nemá jednoznačný výsledek, hodnoty se oproti původnímu stavu a mezi sebou liší dle umístění mikrofonu a průtoku vzduchu;
- vyústku typu plástev lze použít jako vyrovnávací mřížku pro usměrnění průtoku vzduchu, s jejím užitím došlo k redukci hluku u všech dalších kombinací;
- v kombinaci s největším útlumem hluku jsou použity vyústky typu gyroid, tl. 10 mm, 5% výplň na straně sání a vyústka typu

nal grille with movable slats on the supply side are used;
- the newly designed grilles reduced the maximum sound pressure level by up to 5.6 dB – depending on the microphone location and airflow;
- the tonal component induced by the airflow through the original grilles was eliminated;
- the resulting maximum sound pressure level of the ventilation system is
- 44.7 dB for an air flow of 600 m^3/h.

The objectives of the research were met and the 3D printing technology proved to be a very useful tool for prototyping in this case. Furthermore, in addition to the use of infill structures, different shapes of grilles can be modelled to satisfy the wishes of developers, distributors and customers. In the future, for example, the GADES HEXAGON system is expected to design optimisation of the external shape of the grilles to fit the product concept – see *Fig. 11.*

plástev, tl. 20 mm, 2,5% výplň jako vyrovnávací mřížka pro originální vyústku s pohyblivými lamelami na straně výdechu;
- nově navržené vyústky snížili maximální hladinu akustického tlaku až o 5,6 dB – dle umístění mikrofonu a průtoku vzduchu;
- tónová složka vyvolaná prouděním vzduchu přes originální vyústky byla eliminována;
- výsledná maximální hladina akustického tlaku větracího zařízení je 44,7 dB pro průtok vzduchu 600 m^3/h.

Cíle výzkumu byly naplněny a technologie 3D tisku se v tomto případě ukázala jako velmi užitečný nástroj pro prototypování. Dále kromě využívání výplňových struktur lze i např. modelovat rozličné tvary vyústek, aby uspokojili přání vývojářů, distributorů a zákazníků.

Např. v rámci systému GADES HEXAGON se v budoucnu počítái s designovou optimalizací vnějšího tvaru vyústek tak, aby zapadal do konceptu produktu – viz *Obr. 11.*

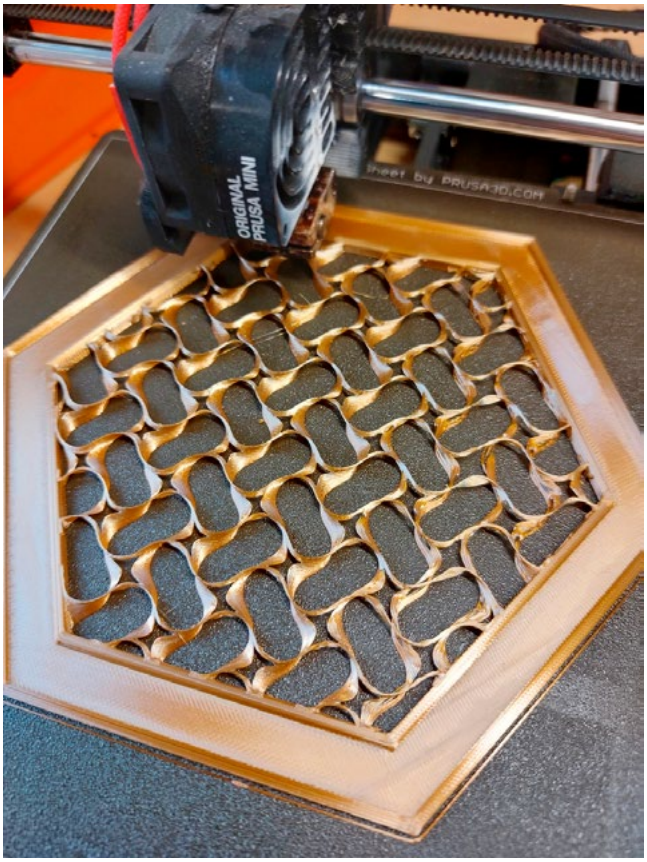


Fig. 5: Example of the individual shape of the distribution grille

Obr. 5: Ukázka individuálního tvaru distribuční vyústky

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper has been made possible thanks to the financial support of the project FAST-J-22-8027 „Effect of local ventilation units on acoustic comfort in school interiors" and the project FAST-S-22-8000 „Study of 3D printed structures for civil engineering 4.0". Thanks also to GADES solution, s.r.o., which provided a prototype of the newly developed autonomous ventilation system HEXAGON.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek byl vytvořen díky finanční podpoře projektu FAST-J-22-8027 „Vliv lokálních větracích jednotek na akustickou pohodu v interiérech školských zařízení" a projektu FAST-S-22-8000 „Studium 3D tištěných konstrukcí pozemního stavitelství 4.0". Dále díky společnosti GADES solution, s. r. o., jež poskytla prototyp nově vyvíjeného autonomního větracího systému HEXAGON.

REFERENCES

[1] Větrání škol. TZB-info [online]. Praha: Topinfo, 2016, 6. 1. 2016 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-skol/13662-vetrani-skol

[2] 2019 ASHRAE Handbook: Heating, Ventilating and Air-Conditioning Applications. 2019 version. Atlanta (Georgia): ASHRAE, 2019. ISBN 978-1-947192-13-3.

[3] BEHLS, Herman. Duct Systems: Design Guide. Atlanta (Georgia): ASHRAE, 2021. ISBN 978-1-947192-40-9.

[4] RUTKOWSKI, Hank. Manual D: Residential Duct Systems. Third Edition. Alexandria (Virginia): Air Conditioning Contractors of America Association, 2014. ISBN 1-892765-50-0.

[5] Air Distribution Engineering Guide [online]. V1.0. Suwanee (Georgia): Price Industries, 2011 [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: https://www.priceindustries.com/content/uploads/assets/literature/engineering-guides/air-distribution-engineering-guide.pdf

[6] BIBBY, Chris a Murray HODGSON. Laboratory measurement of the acoustical and airflow performance of interior natural-ventilation openings and silencers. Applied Acoustics. 2014, 82, 15-22. ISSN 0003682X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apacoust.2014.02.015

[7] HU, Junwei a Guoliang DING. Effect of the air outlet louver on the noise generated by the outdoor set of a split-unit air conditioner. Applied Thermal Engineering. 2006, 26(14-15), 1737-1745. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2005.10.032

[8] TIAN, Jie, Hua OUYANG a Yadong WU. Experimental and numerical study on aerodynamic noise of outdoor unit of room air conditioner with different grilles. International Journal of Refrigeration. 2009, 32(5), 1112-1122. ISSN 01407007. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijrefrig.2008.07.009

[9] LEE, Booyeong, Woojeong SIM, Junhyeon JO a Jintai CHUNG. Reduction of flow-induced noise in a household air purifier. Journal of Mechanical Science and Technology. 2020, 34(8), 3105-3115. ISSN 1738-494X. Dostupné z: doi:10.1007/s12206-020-0701-7

[10] YANG, Wenjing, Shangqin YUAN, Chee Kai CHUA a Kin ZHOU. Wideband Sound Absorption 3D Printed Multi-Layer Micro-Perforated Panels. Proceedings of the 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing. 2018, 370-375. Dostupné z: doi:10.25341/D4C307

[11] KHOSRAVANI, Mohammad Reza a Tamara REINICKE. Experimental characterization of 3D-printed sound absorber. European Journal of Mechanics - A/Solids. 2021, 89. ISSN 09977538. Dostupné z: doi:10.1016/j.euromechsol.2021.104304

[12] VASINA, Martin, Katarina MONKOVA, Peter Pavol MONKA, Drazan KOZAK a Jozef TKAC. Study of the Sound Absorption Properties of 3D-Printed Open-Porous ABS Material Structures. Polymers. 2020, 12(5). ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym12051062

[13] BATHLA, Pranjal a John KENNEDY. 3D Printed Structured Porous Treatments for Flow Control around a Circular Cylinder. Fluids. 2020, 5(3). ISSN 2311-5521. Dostupné z: doi:10.3390/fluids5030136

[14] SAFARI VARIANI, Ali, Ali DASTAMOZ, Sajad ZARE, Ahmad NIKPEY a Saeid AHMADI. The Acoustic Performance of 3D Printed Multiple Jet Nozzles with Different Configurations. Sound and Vibration. 2020, 54(1), 43-55. ISSN 1541-0161. Dostupné z: doi:10.32604/sv.2020.08636

[15] MATUŠKA, Karel. Analýza vlastností dutých, 3D tištěných struktur. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce František Tatíček.

[16] SCHOEN, Alan. Infinite Periodic Minimal Surfaces Without Self-Intersections [online]. Electronic research center, Cambridge Mass. 02139: National Aeronautics and Space Administration (NASA), Washington D.C., 1970 [cit. 2022-12-10]

[17] LIN, Chunguan, Guilin WEN, Hanfeng YIN, Zhen-Pei WANG, Jie LIU a Yi Min XIE. Revealing the sound insulation capacities of TPMS sandwich panels. Journal of Sound and Vibration. 2022, 540. ISSN 0022460X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsv.2022.117303

[18] YANG, Wenjing, Jia AN, Chee Kai CHUA a Kun ZHOU. Acoustic absorptions of multifunctional polymeric cellular structures based on triply periodic minimal surfaces fabricated by stereolithography. Virtual and Physical Prototyping. 2020, 15(2), 242-249. ISSN 1745-2759. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2020.1740747.

[19] BOWEN, Luke, Alper CELIK, Beckett ZHOU, Michelle Fernandino WESTIN a Mahdi AZARPEYVAND. The effect of leading edge porosity on airfoil turbulence interaction noise. The Journal of the Acoustical Society of America. 2022, 152(3), 1437-1448. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/10.0013703

[20] BOWEN, Luke, Alper CELIK, Beckett ZHOU, Michelle Fernandino WESTIN a Mahdi AZARPEYVAND. The effect of leading edge porosity on airfoil turbulence interaction noise. The Journal of the Acoustical Society of America. 2022, 152(3), 1437-1448. ISSN 0001-4966. Dostupné z: doi:10.1121/10.0013703

[21] Věstník Ministerstva zdravotnictví České republiky č. 11/2017: Metodický návod pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí. In: . Praha: Ministerstvo zdravotnictví České republiky, ročník 2017, částka 11.

[22] ČSN EN 61672-1. Elektroakustika – Zvukoměry: Část 1: Technické požadavky. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

[23] ČSN EN ISO 3382-2. Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky: Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.



DAVID SVOBODA

Ing. David Svoboda, graduate of master studies at the Faculty of Civil Engineering at Brno University of Technology. Doctoral student at the Institute of Building Structures, dissertation focused on the elimination of noise from the operation of technical equipment in buildings. Assistant in the accredited acoustic laboratory BP Akustika, No. 1475 – measurement of noise in working and non-working environment, measurement of sound insulation and reverberation time, processing of acoustic reports and studies.

DAVID SVOBODA

Ing. David Svoboda, absolvent magisterského studia na Fakultě stavební VUT v Brně. Student doktorského studia na Ústavu pozemního stavitelství, disertační práce zaměřena na eliminaci hluku z provozu technických zařízení budov. Asistent v akreditované akustické laboratoři BP Akustika, č. 1475 – měření hluku v pracovním a mimopracovním prostředí, měření neprůzvučností a doby dozvuku, zpracovávání akustických posudků a studií.

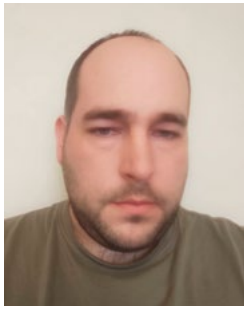


PETRA BERKOVÁ

Ing. Petra Berková, Ph.D., graduate of master and doctoral studies at the Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology. Dissertation focused on the prediction of sound insulation properties of partitioning building structures. Academic employee of the Institute of Building Structures, focusing on acoustics and lighting technology. Quality manager and technician in the accredited acoustic laboratory BP Akustika, No. 1475.

PETRA BERKOVÁ

Ing. Petra Berková, Ph.D., absolventka magisterského a doktorského studia na Fakultě stavební VUT v Brně. Disertační práce zaměřena na predikci zvukoizolačních vlastností dělících stavebních konstrukcí. Akademický pracovník Ústavu pozemního stavitelství, zaměření na akustiku a světelnou techniku. Manažer kvality a zkušební technik v akreditované akustické laboratoři BP akustika, č. 1475.



FRANTIŠEK VLACH

Ing. František Vlach, Ph.D., graduate of master and doctoral studies at the Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology. Academic employee of the Institute of Building Structures, focusing on energy-efficient buildings, thermal engineering and building diagnostics. Designer of ground structures and technician of air tightness measurement of buildings and their systems (blower-door tests).

FRANTIŠEK VLACH

Ing. František Vlach, Ph.D., absolvent magisterského a doktorského studia na Fakultě stavební VUT v Brně. Akademický pracovník Ústavu pozemního stavitelství, zaměření na energeticky úsporné stavby, tepelnou techniku a diagnostiku staveb. Projektant pozemních staveb a technik měření vzduchotěsnosti budov a jejich systémů (blowerdoor testy).



DAVID BEČKOVSKÝ

Ing. David Bečkovský, Ph.D., graduate of master and doctoral studies at the Faculty of Civil Engineering of Brno University of Technology. Academic employee of the Institute of Building Structures, focusing on building physics, environmental engineering, robotics and 3D printing. Founder and CEO of BUILDIGO Inc., member of the committee of the regional office of ČKAIT Brno.

DAVID BEČKOVSKÝ

Ing. David Bečkovský, Ph.D., absolvent magisterského a doktorského studia Fakulty stavební VUT v Brně. Akademický pracovník Ústavu pozemního stavitelství, zaměření na stavební fyziku, environmentální inženýrství, robotizaci a 3D tisk. Zakladatel a ředitel společnosti BUILDIGO, s. r. o., člen výboru oblastní kanceláře ČKAIT Brno.

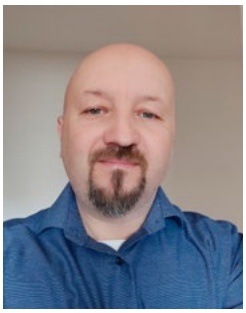


MILAN GABZDYL

Ing. Milan Gabzdyl, graduate of master studies at the Faculty of Civil Engineering at Brno University of Technology. Managing director of GADES solution Inc. Energy specialist for energy audits, assessments and energy performance certificates.

MILAN GABZDYL

Ing. Milan Gabzdyl, absolvent magisterského studia Fakulty stavební VUT v Brně. Jednatel společnosti GADES solution, s. r. o. Energetický specialista pro energetické audity, posudky a průkazy energetické náročnosti.



MARTIN DEUTSCH

Ing. Martin Deutsch, Ph.D., graduate of master and doctoral studies at the Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, external employee of the Institute of Building Structures. Managing director of GADES solution Inc., authorized engineer and examination commissioner of ČKAIT – ground structures with a focus on energy-efficient buildings, building physics and building energy. Research and development in the field of indoor microclimate, ventilation systems, energy systems and solar systems.

MARTIN DEUTSCH

Ing. Martin Deutsch, Ph.D., absolvent magisterského a doktorského studia Fakulty stavební VUT v Brně, jednatel společnosti GADES solution, s. r. o., externí pracovník Fakulty stavební VUT v Brně. Autorizovaný inženýr a zkušební komisař ČKAIT pro obor pozemní stavby se zaměřením na energeticky úsporné stavby, stavební fyziku a energetiku staveb. Výzkum a vývoj v oblasti vnitřního mikroklimatu budov, větrací systémy, energetické systémy solární systémy.