

USING IMPULSE ACOUSTIC RESPONSE TO EVALUATE THE EFFICIENCY OF RAIL ABSORBERS

VYUŽITÍ IMPULSNÍ AKUSTICKÉ ODEZVY PRO HODNOCENÍ ÚČINNOSTI KOLEJNICOVÝCH ABSORBÉRŮ

Smutný J., Pazdera L. Štukavec M.

Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Veveří 95, 602 00 Brno
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 95, 602 00 Brno

Abstract

The paper deals with laboratory measurements and analysis of the acoustic response of a rail equipped with various rail absorbers during impulse excitation by mechanical shock. The aim of the research was to design and verify an experimental methodology enabling an objective comparison of the acoustic properties of various design solutions of rail absorbers in controlled laboratory conditions. The excitation of the test sample was realized by the impact of a steel ball of defined mass from a constant height onto the rail head, while the resulting acoustic response was recorded using a measuring system with a calibrated measuring path. The measured signals were subsequently evaluated in the time, frequency and time-frequency domains using the analysis of the measured impulse response. Particular attention was paid to the evaluation of the maximum sound pressure levels, the course of the response attenuation and changes in spectral characteristics after the installation of the absorbers. The results demonstrate that the proposed methodology allows for reliable identification of differences in the acoustic behavior of individual absorbers and provides a suitable tool for their laboratory evaluation, development and optimization before deployment in railway operations.

Keywords: rail absorbers, laboratory measurements, acoustic response, impulse excitation, mechanical shock, steel ball, FFT analysis, vibroacoustics, railway infrastructure

Anotace

Příspěvek se zabývá laboratorním měřením a analýzou akustické odezvy kolejnice vybavené různými kolejnicovými absorbéry při impulsním buzení mechanickým rázem. Cílem výzkumu bylo navrhnout a ověřit experimentální metodiku umožňující objektivní porovnání akustických vlastností různých konstrukčních řešení kolejnicových absorbérů v kontrolovaných laboratorních podmínkách. Buzení zkušebního vzorku bylo realizováno dopadem ocelové koule definované hmotnosti z konstantní výšky na hlavu kolejnice, přičemž vzniklá akustická odezva byla zaznamenávána pomocí měřicího systému s kalibrovanou měřicí cestou. Naměřené signály byly následně vyhodnoceny v časové, frekvenční a časově frekvenční oblasti s využitím analýzy naměřené impulsní odezvy. Pozornost byla věnována zejména hodnocení maximálních hladin akustického tlaku, průběhu útlumu odezvy a změnám spektrálních charakteristik po instalaci absorbérů. Výsledky prokazují, že navržená metodika umožňuje spolehlivě identifikovat rozdíly v akustickém chování jednotlivých absorbérů a poskytuje vhodný nástroj pro jejich laboratorní hodnocení, vývoj a optimalizaci před nasazením v železničním provozu.

Klíčová slova: kolejnicové absorbéry, laboratorní měření, akustická odezva, impulsní buzení, mechanický ráz, ocelová koule, FFT analýza, vibroakustika, železniční infrastruktura

1. INTRODUCTION TO THE ISSUE

The noise generated by rail transport represents a significant environmental problem, especially in urbanized areas and in the vicinity of intensively used railway lines. With increasing train speeds and growing demands for the comfort of the population, the issue of reducing noise pollution is becoming increasingly important. The dominant sources of railway noise include noise generated by the interaction of the wheel and rail, which is considered to be a decisive component of the total noise emission of rail vehicles in the speed range of approximately $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ and above [1, 2]. This noise arises as a result of the dynamic excitation of the wheel and rail by the irregularities of their surface and the subsequent radiation of acoustic energy into the surrounding environment.

One of the effective measures for reducing noise emitted by tram and railway lines are rail absorbers [3]. These are passive vibroacoustic elements installed on the rail web or even the rail heel, whose task is to increase the structural damping of the rail and limit the amplitude of its vibrations in critical frequency bands. By reducing the vibration level, the acoustic power radiated by the rail is also reduced, which leads to a reduction in the overall noise emission of rail transport. Currently, a number of design solutions for rail absorbers are available on the market, differing in the materials used, weight, mounting method and frequency range of effectiveness.

Operational noise measurements during the passage of train sets or vibration measurements directly on the rail are commonly used to assess the effectiveness of rail absorbers. However, these methods are time-consuming, require appropriate operating conditions and their results can be influenced by a number of external factors, such as vehicle speed, rail surface condition, meteorological conditions or railway traffic composition [4, 5].

For this reason, increasing attention is being paid to laboratory methods that enable reproducible evaluation of the vibroacoustic properties of rail absorbers under controlled conditions. Laboratory methods represent an important tool for the development, optimization and comparison of rail absorbers before their deployment in railway operations. Com-

1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Hluk generovaný železniční dopravou představuje významný environmentální problém zejména v urbanizovaných oblastech a v okolí intenzivně využívaných železničních tratí. Se zvyšujícími se rychlostmi vlakových souprav a rostoucími požadavky na komfort obyvatelstva nabývá problematika snižování hlukové zátěže stále většího významu. Mezi dominantní zdroje železničního hluku patří zejména hluk vznikající interakcí kola a kolejnice, který je v rychlostním pásmu přibližně od cca $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ výše považován za rozhodující složku celkové hlukové emise kolejových vozidel [1, 2]. Tento hluk vzniká v důsledku dynamického buzení kola a kolejnice nerovnostmi jejich povrchu a následným vyzařováním akustické energie do okolního prostředí.

Jedním z účinných opatření ke snižování hluku vyzařovaného tramvajovou a železniční tratí jsou kolejnicové absorbéry [3]. Jedná se o pasivní vibroakustické prvky instalované na stojinu nebo i patu kolejnice, jejichž úkolem je zvýšit strukturální útlum kolejnice a omezit amplitudu jejích vibrací v kritických frekvenčních pásmech. Snížením úrovně vibrací dochází současně ke snížení akustického výkonu vyzařovaného kolejnicí, což vede ke snížení celkové hlukové emise železniční dopravy. V současné době je na trhu k dispozici řada konstrukčních řešení kolejnicových absorbérů, lišících se použitými materiály, hmotností, způsobem uchycení i frekvenčním rozsahem účinnosti.

Pro posouzení účinnosti kolejnicových absorbérů jsou běžně využívána provozní měření hluku při průjezdu vlakových souprav nebo vibrační měření přímo na kolejnici. Tyto metody však bývají časově náročné, vyžadují vhodné provozní podmínky a jejich výsledky mohou být ovlivněny řadou externích faktorů, například rychlostí vozidla, stavem povrchu kolejnice, meteorologickými podmínkami nebo složením železničního provozu [4, 5].

Z tohoto důvodu se stále větší pozornost věnuje laboratorním metodám umožňujícím reprodukovatelné hodnocení vibroakustických vlastností kolejnicových absorbérů v kontrolovaných podmínkách. Laboratorní metody představují důležitý nástroj pro vývoj, optimalizaci a porovnávání kolejnicových absorbérů ještě před jejich nasazením do že-

pared to operational measurements on the track, they offer a number of advantages that allow for more accurate and better reproducible results [6].

The most significant advantage of laboratory measurements is the high repeatability of the experiment. In laboratory conditions, the excitation force, excitation position, microphone placement, test sample geometry and boundary conditions can be precisely defined. Each measurement is thus carried out under practically the same conditions, which allows for an objective comparison of individual absorber variants. Another significant advantage is the elimination of the influence of railway operations. In operational measurements, the results are influenced by a number of variables, such as train speed, vehicle type, wheel condition, train load or immediate operating conditions. In the laboratory, these effects are removed and only the properties of the rail and absorber system itself can be monitored [7].

Another significant benefit is the possibility of detailed analysis of the causes of noise and vibrations. In laboratory conditions, the acoustic response, rail vibrations, frequency characteristics, natural frequencies and attenuation parameters can be measured simultaneously. This allows a better understanding of the mechanism of action of the absorber and identification of the frequency bands in which its efficiency is highest.

Laboratory measurements are also less time-consuming and economically demanding. There is no need to organize track closures or coordinate measurements with train operations. Individual absorber variants can be quickly changed and a large number of experiments can be performed in a short time. This is particularly advantageous when developing new design solutions or optimizing absorber parameters. Another advantage is the possibility of using standardized excitation. For example, a mechanical impact with a steel ball or modal hammer represents a well-defined broadband impulse, which allows results to be compared between different laboratories or different experimental campaigns. This increases the objectivity of the assessment [8].

lezničního provozu. Ve srovnání s provozními měřeními na trati nabízejí řadu výhod, které umožňují získat přesnější a lépe reprodukovatelné výsledky [6].

Nejvýznamnější výhodou laboratorního měření je vysoká opakovatelnost experimentu. V laboratorních podmínkách lze přesně definovat budící sílu, polohu buzení, umístění mikrofónů, geometrii zkušebního vzorku i okrajové podmínky. Každé měření tak probíhá za prakticky stejných podmínek, což umožňuje objektivní porovnávání jednotlivých variant absorbérů. Další významnou výhodou je eliminace vlivu železničního provozu. Při provozních měřeních jsou výsledky ovlivňovány řadou proměnných, jako jsou rychlost vlaku, typ vozidla, stav kol, zatížení soupravy nebo okamžité provozní podmínky. V laboratoři jsou tyto vlivy odstraněny a lze sledovat pouze vlastnosti samotného systému kolejnice a absorbérů [7].

Významným přínosem je také možnost detailní analýzy příčin vzniku hluku a vibrací. V laboratorních podmínkách lze současně měřit akustickou odezvu, vibrace kolejnice, frekvenční charakteristiky, vlastní frekvence i útlumové parametry. To umožňuje lépe pochopit mechanismus působení absorbérů a identifikovat frekvenční pásma, ve kterých je jeho účinnost nejvyšší.

Laboratorní měření jsou rovněž časově a ekonomicky méně náročná. Není nutné organizovat výluky tratí ani koordinovat měření s provozem vlaků. Jednotlivé varianty absorbérů lze rychle střídát a během krátké doby provést velké množství experimentů. To je výhodné zejména při vývoji nových konstrukčních řešení nebo při optimalizaci parametrů absorbérů. Další výhodou je možnost použití standardizovaného buzení. Například mechanický ráz ocelovou koulí nebo modálním kladivem představuje dobře definovaný širokopásmový impuls, který umožňuje porovnávat výsledky mezi různými laboratořemi nebo různými experimentálními kampaněmi. Tím se zvyšuje objektivita hodnocení [8].

Laboratorní podmínky rovněž umožňují omezení vlivu okolního hluku. Měření lze provádět v akusticky upravených prostorech, případně v bezdozvukových nebo polobezdozvukových komorách, kde je minimalizován vliv odrazů a rušivých zvuků. Výsledky tak lépe odrážejí

Laboratory conditions also allow limiting the influence of ambient noise. Measurements can be performed in acoustically modified rooms, or in anechoic or semi-anechoic chambers, where the influence of reflections and disturbing sounds is minimized. The results thus better reflect the real properties of the measured system.

An important aspect is also the safety and simplicity of the implementation of experiments. It is not necessary to enter the track during operation or to handle measuring equipment near passing trains. All measurements can be performed in a controlled laboratory environment.

In addition, laboratory methods allow the testing of prototype solutions that have not yet been approved for operational use. Manufacturers and research organizations can thus verify new materials, absorber geometries or mounting methods without the need for their immediate installation on the railway infrastructure.

Although laboratory measurements cannot fully replace verification operational tests, they represent a necessary intermediate step between absorber design and its application in practice. They enable the rapid identification of prospective design variants, reduce development costs and provide detailed information on the vibroacoustic behavior of the system, which is often difficult to obtain during operational measurements. For these reasons, laboratory methods are now considered a standard part of the development and evaluation of rail absorbers.

2. METHODS USED FOR THE EVALUATION OF RAIL ABSORBERS

Evaluation of the effectiveness of rail absorbers is an important part of the development and verification of noise control measures in rail transport. The aim of these methods is to determine the ability of the absorber to reduce rail vibrations and subsequently the noise emitted into the surrounding environment.

Currently, several approaches are used, which differ in complexity, accuracy and areas of application [9].

skutečné vlastnosti měřeného systému.

Významným aspektem je také bezpečnost a jednoduchost realizace experimentů. Není nutné vstupovat do kolejiště za provozu ani manipulovat s měřicí technikou v blízkosti projíždějících vlaků. Veškerá měření lze provádět v kontrolovaném laboratorním prostředí.

Laboratorní metody navíc umožňují testování prototypových řešení, která ještě nebyla schválena pro provozní použití. Výrobci a výzkumné organizace tak mohou ověřovat nové materiály, geometrie absorbérů nebo způsoby uchycení bez nutnosti jejich okamžité instalace na železniční infrastrukturu.

Přestože laboratorní měření nemohou plně nahradit ověřovací provozní zkoušky, představují nezbytný mezikrok mezi návrhem absorbérů a jeho aplikací v praxi. Umožňují rychlou identifikaci perspektivních konstrukčních variant, snižují náklady na vývoj a poskytují podrobné informace o vibroakustickém chování systému, které bývá při provozních měřeních obtížné získat. Z těchto důvodů jsou laboratorní metody dnes považovány za standardní součást vývoje a hodnocení kolejnicových absorbérů.

2. METODY POUŽÍVANÉ PRO HODNOCENÍ KOLEJNICOVÝCH ABSORBÉRŮ

Hodnocení účinnosti kolejnicových absorbérů představuje důležitou součást vývoje a ověřování protihlukových opatření v železniční dopravě. Cílem těchto metod je stanovit schopnost absorbérů snižovat vibrace kolejnice a následně i hluk vyzařovaný do okolního prostředí. V současné době se používá několik přístupů, které se liší náročností, přesností i oblastí použití [9].

Nejpřímější metodou je provozní měření hluku při průjezdu vlakových souprav. Při této

The most direct method is the operational measurement of noise during the passage of train sets. In this method, the noise emitted by the railway track before and after the absorber installation is recorded using precise measuring microphones. The result is a comparison of equivalent sound pressure levels, maximum levels or spectral characteristics of the noise. The advantage of this method is the direct evaluation of the actual benefit of the absorber in real operation. The disadvantage is a significant dependence on operating conditions, train speed, vehicle type, wheel condition and meteorological influences.

Another frequently used method is the measurement of rail vibrations. Vibrations are usually detected by piezoelectric accelerometers placed on the rail web or head. The vibration level before and after the installation of absorbers is compared, and the frequency response of the vibrations is evaluated. This method provides information directly about the mechanism of action of the absorber, since its main function is to increase the attenuation of the rail and limit the amplitude of its vibrations. In the case of measuring rails with absorbers, the problem of attaching the accelerometer can be a problem.

A significant group of methods is represented by modal and dynamic rail tests. In these, the rail is excited, for example, by a modal hammer, an electrodynamic exciter or a mechanical impulse. Based on the response, the natural frequencies, vibration shapes and damping characteristics of the system are determined. The information obtained allows the evaluation of changes in the dynamic properties of the rail caused by the installation of absorbers.

Laboratory methods based on impulse response have been increasingly used in recent years. The rail is excited by a short mechanical impulse, for example by the impact of a steel ball or a modal hammer. The acoustic or vibration response is then analyzed in the time and frequency domain. The advantages of this method are high repeatability of the measurement, simple experimental setup and the possibility of quick comparison of different absorber design variants without the need for operational tests.

Another option is to measure frequency transfer functions (FRF). This method analyzes the

metodě se pomocí přesných měřicích mikrofonů zaznamenává hluk vyzařovaný železniční tratí před instalací absorbérů a po jeho instalaci. Výsledkem bývá porovnání ekvivalentních hladin akustického tlaku, maximálních hladin nebo spektrálních charakteristik hluku. Výhodou této metody je přímé hodnocení skutečného přínosu absorbérů v reálném provozu. Nevýhodou je značná závislost na provozních podmínkách, rychlosti vlaků, typu vozidel, stavu kol a meteorologických vlivech.

Další často používanou metodou je měření vibrací kolejnice. Vibrace jsou zpravidla snímány piezoelektrickými akcelerometry umístěnými na stojině nebo hlavě kolejnice. Porovnává se úroveň vibrací před a po instalaci absorbérů, případně se vyhodnocuje frekvenční průběh vibrací. Tato metoda poskytuje informace přímo o mechanismu působení absorbérů, protože jeho hlavní funkcí je zvýšení útlumu kolejnice a omezení amplitudy jejích vibrací. V případě měření kolejnic s absorbéry může být problémem uchycení akcelerometru.

Významnou skupinu metod představují modální a dynamické zkoušky kolejnic. Při nich je kolejnice buzena například modálním kladivem, elektrodynamickým budičem nebo mechanickým impulsem. Na základě odezvy se stanovují vlastní frekvence, tvary kmitání a útlumové charakteristiky systému. Získané informace umožňují hodnotit změny dynamických vlastností kolejnice způsobené instalací absorbérů.

V posledních letech se stále častěji využívají laboratorní metody založené na impulsní odezvě. Kolejnice je buzena krátkým mechanickým impulsem, například dopadem ocelové koule nebo úderem modálního kladiva. Následně se analyzuje akustická nebo vibrační odezva v časové a frekvenční oblasti. Výhodou této metody je vysoká opakovatelnost měření, jednoduché experimentální uspořádání a možnost rychlého porovnání různých konstrukčních variant absorbérů bez nutnosti realizace provozních zkoušek.

Další možností je měření frekvenčních přenosových funkcí (FRF). Při této metodě se analyzuje vztah mezi budicí silou a odezvou konstrukce. Frekvenční přenosové funkce poskytují podrobné informace o rezonančních frekvencích, úrovni útlumu a dynamické tuhosti

relationship between the excitation force and the response of the structure. Frequency transfer functions provide detailed information about the resonant frequencies, the level of attenuation and the dynamic stiffness of the system. The method is often used in the development of new absorbers and in the validation of numerical models. It should be noted that more expensive specific equipment is needed for this type of test.

In addition to experimental methods, numerical simulations are also widely used, in particular the finite element method (FEM) and the boundary element method (BEM). These approaches allow the analysis of the vibration and acoustic behavior of the rail and absorber before the prototype is manufactured. Numerical models are used to optimize the absorber mass, its geometry, material composition or frequency tuning. In practice, the simulation results are verified by laboratory or operational measurements.

For the evaluation of acoustic properties, frequency analysis in the time domain is commonly used, followed by FFT, one-third octave analysis and impulse response analysis, or the application of modern time-frequency analysis methods. These procedures allow to determine the frequency bands in which the absorber shows the highest efficiency. One-third octave analysis in particular is important for comparing the results with the requirements of technical standards and regulations used in the field of railway acoustics.

Therefore, a comprehensive evaluation of rail absorbers usually combines several methods simultaneously. Laboratory measurements provide detailed information on the acoustic behavior of the absorber under controlled conditions, while operational measurements verify its real benefit in real railway operation. The combination of experimental methods with numerical modeling today represents the most effective approach to the development, optimization and objective evaluation of rail absorbers [9].

One of the advantageous options is the use of pulsed excitation of the rail by mechanical shock. A short pulse represents a broadband energy source capable of exciting a significant part of the natural frequencies of the rail-absorber system. The subsequent analysis of the

system. Metoda je často využívána při vývoji nových absorbérů a při validaci numerických modelů. Podotkněme, že pro tento typ zkušek je potřeba dražší specifické vybavení.

Vedle experimentálních metod se široce uplatňují také numerické simulace, zejména metoda konečných prvků (FEM) a metoda hraničních prvků (BEM). Tyto přístupy umožňují analyzovat vibrační i akustické chování kolejnice a absorbéru ještě před výrobou prototypu. Numerické modely se využívají k optimalizaci hmotnosti absorbéru, jeho geometrie, materiálového složení nebo frekvenčního naladění. V praxi bývají výsledky simulací ověřovány laboratorními nebo provozními měřeními.

Pro hodnocení akustických vlastností se běžně používá frekvenční analýza v časové rovině, dále pomocí FFT, třetinooktávová analýza a analýza impulsní odezvy, případně aplikace moderních metod časově frekvenční analýzy. Tyto postupy umožňují určit frekvenční pásma, ve kterých absorbér vykazuje nejvyšší účinnost. Zejména třetinooktávová analýza je důležitá pro porovnání výsledků s požadavky technických norem a předpisů používaných v oblasti železniční akustiky.

Komplexní hodnocení kolejnicových absorbérů proto zpravidla kombinuje několik metod současně. Laboratorní měření poskytují detailní informace o akustickém chování absorbéru v kontrolovaných podmínkách, zatímco provozní měření ověřují jeho skutečný přínos v reálném železničním provozu. Spojení experimentálních metod s numerickým modelováním dnes představuje nejefektivnější přístup k vývoji, optimalizaci a objektivnímu hodnocení kolejnicových absorbérů [9].

Jednou z výhodných možností je využití impulsního buzení kolejnice mechanickým rázem. Krátký impuls představuje širokopásmový zdroj energie schopný excitovat významnou část vlastních frekvencí systému kolejnice–absorbér. Následná analýza akustické odezvy poskytuje informace o dynamických vlastnostech měřeného systému, jeho útlumových schopnostech a frekvenční charakteristice [10]. Výhodou této metody je jednoduchost experimentálního uspořádání, vysoká opakovatelnost měření a možnost rychlého porovnání různých konstrukčních variant absorbérů.

acoustic response provides information about the dynamic properties of the measured system, its attenuation capabilities and frequency characteristics [10]. The advantage of this method is the simplicity of the experimental arrangement, high repeatability of measurements and the possibility of quick comparison of different design variants of absorbers.

The rest of the article deals with the design and verification of a laboratory methodology for evaluating rail absorbers based on measuring the acoustic response of the rail caused by the mechanical impact of a steel ball. Attention is paid to the description of the experimental arrangement, the measurement methodology and the methods of processing the measured data in the time and frequency domains. The aim of the conclusion of the article is to assess the usability of the proposed procedure for objectively comparing the acoustic properties of rail absorbers and to create a basis for their further development and optimization.

3. DESCRIPTION OF TEST MEASUREMENTS

The aim was not only to perform laboratory measurements of the acoustic parameters of a rail sample without and with two types of sidewalls in order to compare their acoustic parameters, but also to verify the reliability of the method in question. A total of three types of measurements were performed. The first measurement was performed on a grooved NT3 rail without rail absorbers, the next two using two types of rail absorber fastening, one of which was attached with steel clips and the other was glued and with an SBR heel profile. It should be noted that the SBR heel profile is a flexible profile located in the area of the rail heel, made of SBR (Styrene-Butadiene Rubber). This is one of the most widely used synthetic rubbers in railway construction, especially for anti-vibration and acoustic applications. The SBR profile is installed along the rail foot and performs several functions:

- Reduces the transmission of vibrations from the rail to the fasteners and sleepers,
- Increases the material damping of the rail-fastening system,

Další text příspěvku se zabývá návrhem a ověřením laboratorní metodiky hodnocení kolejnicových absorbérů založené na měření akustické odezvy kolejnice vyvolané mechanickým rázem ocelové koule. Pozornost je věnována popisu experimentálního uspořádání, metodice měření a způsobům zpracování naměřených dat v časové i frekvenční oblasti. Cílem závěru článku je posoudit využitelnost navrženého postupu pro objektivní porovnávání akustických vlastností kolejnicových absorbérů a vytvořit podklady pro jejich další vývoj a optimalizaci.

3. POPIS TESTOVACÍCH MĚŘENÍ

Cílem bylo nejen laboratorní měření akustických parametrů vzorku kolejnice bez a s dvěma typy bokovnic za účelem srovnání jejich akustických parametrů, ale i ověření spolehlivosti předmětné metody. Celkem byly provedeny tři typy měření. První měření bylo provedeno na žlábkové kolejnici NT3 bez kolejnicových absorbérů, další dvě s využitím dvou typů upevnění kolejnicových absorbérů, kdy jeden byl připevněn ocelovými sponami a druhý byl nalepený a s patním profilem SBR. Podotkněme, že SBR patní profil je pružný profil umístěný v oblasti paty kolejnice, vyrobený z materiálu SBR (Styrene-Butadiene Rubber), tedy styren-butadienového kaučuku. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších syntetických kaučuků v železničním stavitelství, zejména pro antivibrační a akustické aplikace. SBR profil se instaluje podél paty kolejnice a plní několik funkcí:

- Snižuje přenos vibrací z kolejnice do upevňovadel a pražce,
- Zvyšuje materiálové tlumení soustavy kolejnice–upevnění,

- Limits noise radiation through the rail,
- Protects the rail from direct contact with some parts of the absorber,
- Serves as an elastic element when attaching rail absorbers.
- Omezuje vyzařování hluku kolejnicí,
- Chrání kolejnici před přímým kontaktem s některými částmi absorbérů,
- Slouží jako pružný prvek při uchycení kolejnicových absorbérů.

When a train passes through, bending, longitudinal and torsional vibrations occur in the rail. Due to its elasticity, the SBR profile allows for small deformations and at the same time converts part of the vibration energy into heat. This phenomenon is referred to as internal hysteretic damping of rubber. From the point of view of rail dynamics, the SBR foot profile is actually a viscoelastic damper, which together with the rail mass and any steel core of the absorber creates a mass-spring-damper system.

The mechanical shock was realized by the impact of a steel ball (Fig. 1) lowered from a special holder (with adjustable heights) in the vertical direction. A steel ball with a diameter of 38 mm was used. The microphone was placed 1 m from the measured samples (rail posts). The measuring microphone was directed perpendicular to the samples and was placed at a height of 17 cm above the surface. The excitation ball was lowered onto the running part of the rail from a height of 60 cm. Each measurement in each variant was performed 10 times. The values obtained were averaged.

The dynamic-acoustic response parameters were recorded by a microphone. The B&K 3053-B-120 measuring set from Brüel&Kjaer and the Labshop B&K measuring software were used to measure the acoustic parameters. The dynamic-acoustic response parameters were measured when applying shock excitation, i.e. when the ball hit once. After the analysis, control measurements and calculations were carried out, the following methods and parameters were used to analyze the response to mechanical shock:

- Time display of the instantaneous sound pressure value,
- Short-term equivalent sound pressure level, one-third octave spectrum,
- Časového zobrazení průběhu okamžité hodnoty akustického tlaku,
- Krátkodobé ekvivalentní hladiny akustického tlaku, třetinooktávové spektrum,
- třetino-oktávových spekter akustického tlaku,
- Frekvenční analýzy Welchovou metodou,

Při průjezdu vlaku vznikají v kolejnici ohybové, podélné i torzní kmity. SBR profil díky své pružnosti umožňuje malé deformace a současně přeměňuje část vibrační energie na teplo. Tento jev je označován jako vnitřní hysteretické tlumení pryže. Z pohledu dynamiky kolejnice je SBR patní profil vlastně viskoelastický tlumič, který společně s hmotou kolejnice a případným ocelovým jádrem absorbérů vytváří systém hmota–pružina–tlumič.

Mechanický ráz byl realizován dopadem ocelové koule (Obr 1) spouštěné ze speciálního držáku (s nastavitelnými výškami) ve svislém směru. Byla použita ocelová koule o průměru 38 mm. Mikrofon byl umístěn od měřených vzorků (stojny kolejnic) ve vzdálenosti 1 m. Měřicí mikrofon byl nasměrován kolmo ke vzorkům a byl umístěn ve výšce 17 cm nad povrchem. Budící koule byla spouštěna na jezdvou část kolejnice z výšky 60 cm. Každé měření v dané variantě bylo provedeno 10x. Získané hodnoty byly průměrovány.

Parametry dynamicko-akustické odezvy byly snímány mikrofonom. K měření akustických parametrů byla využita měřicí souprava B&K 3053-B-120 od společnosti Brüel&Kjaer a měřicí software Labshop B&K. Parametry dynamicko-akustické odezvy byly měřeny při aplikaci rázového buzení, tj. při jednom dopadu koule. Po provedení rozboru, realizovaných kontrolních měřeních a výpočtech byly k analýze odezvy na mechanický ráz použito následujících metod a parametrů:

- Third-octave sound pressure spectra,
- Frequency analysis by the Welch method, this method is based on the use of a discrete Fourier transform applied to the measured data and subsequent appropriate averaging,
- Time-frequency analysis (for the transition from the time to the time-frequency domain, the Short-term Fourier transform algorithm was used).

The author-developed software implemented in the Python programming language was used to analyze and evaluate the measured data. This software allows for effective processing, analysis and visualization of the obtained data.

tato metoda je založena na použití diskrétní Fourierovy transformace aplikované na naměřená data a na následném vhodném průměrování,

- Časově-frekvenční analýzy (pro přechod z časové do časově-frekvenční oblasti byl využit algoritmus Krátkodobé Fourierovy transformace).

K analýze a vyhodnocení naměřených dat byl použit autorsky vyvinutý software implementovaný v programovacím jazyce Python. Tento software umožňuje efektivní zpracování, analýzu i vizualizaci získaných dat.



Fig. 1 View of the measurement location, absorber attached to the rail with clips

Obr. 1 Pohled na místo měření, absorbér uchyćený ke kolejnici sponami



Fig. 2 View of the measurement location, absorber attached to the rail by gluing

Obr. 2 Pohled na místo měření, absorbér uchycený ke kolejnici lepením

4. RESULTS

For the calculation of the short-term equivalent sound pressure level, an interval of 100 ms from the beginning of the measured signal was selected due to the nature of the response signals. This is the interval in which the most significant attenuation of the sound pressure occurs. The calculated values were averaged. The average values of the short-term sound pressure level for the investigated signal interval of 200 ms are given in Table Tab. 1. Furthermore, from the measured data in the given interval, the third-octave spectra were calculated for each variant. These were again averaged. The average third-octave spectra are shown in Figure Fig. 3.

4. ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

Pro výpočet krátkodobé ekvivalentní hladiny akustického tlaku byl vzhledem k charakteru odezvových signálů vybrán interval 100 ms od začátku naměřeného signálu. Jde o interval, v kterém dochází k nejvýraznějšímu útlumu akustického tlaku. Vypočtené hodnoty byly zprůměrovány. Průměrné hodnoty krátkodobé hladiny akustického tlaku pro vyšetřovaný interval signálu délky 200 ms jsou uvedeny v tabulce Tab. 1.

Dále byla z naměřených dat v daném intervalu vypočtena pro každou variantu třetino-oktávová spektra. Tyto byla opět průměrovány. Průměrná třetino-oktávová spektra jsou uvedena v obrázku Obr. 3.

Měřený vzorek / Measured sample	L_{eqv} [dB(A)]
Kolejnice NT3, bez absorbéru / NT3 rail, without acoustic absorber	93.5
Kolejnice NT3, s absorbérem a se sponami / NT3 rails, with side rails with clips	84.8
Kolejnice NT3, s nalepeným absorbérem a s SBR patním profilem / NT3 rail, with glued absorber and SBR heel profile	83.2

Table 1 Comparison of short-term equivalent level values for individual variants

Tab. 1 Srovnání hodnot krátkodobé ekvivalentní hladiny pro jednotlivé varianty

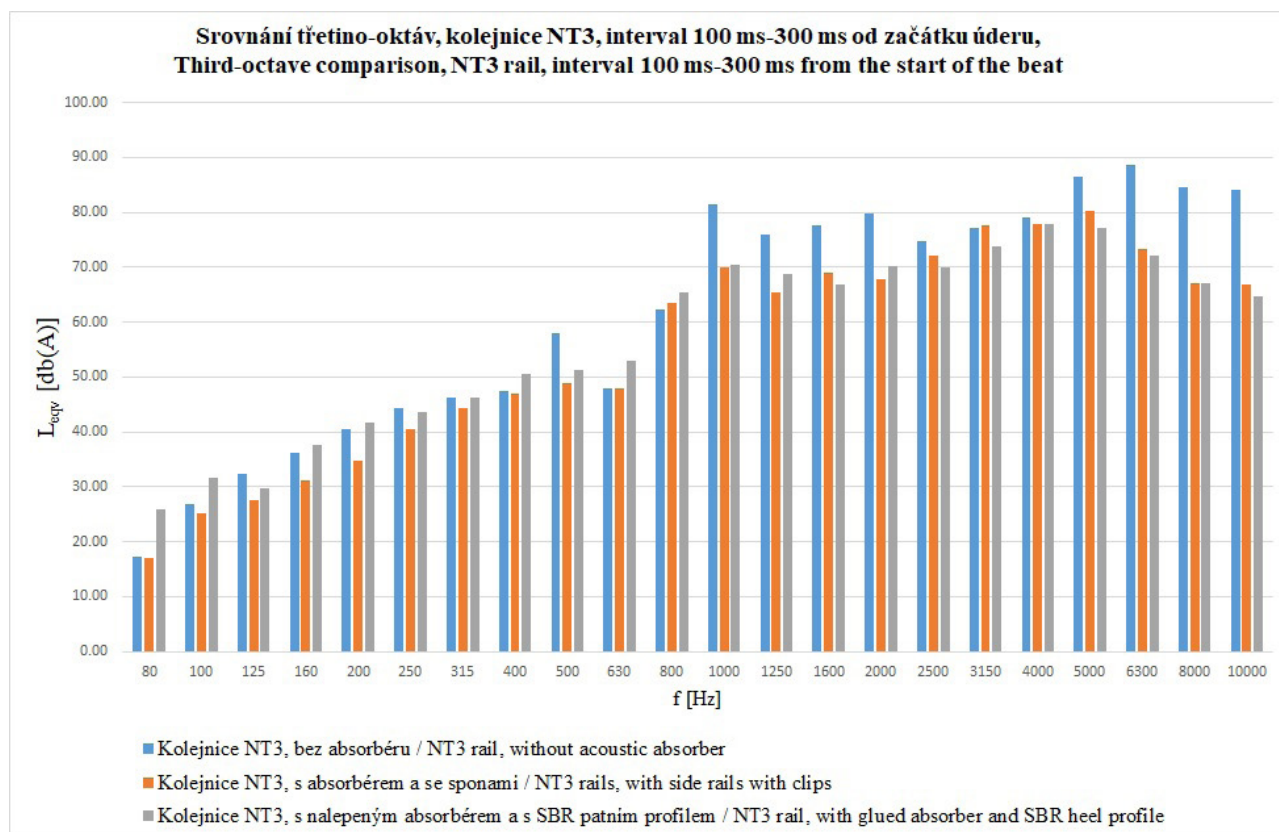


Fig. 3 Comparison of third-octave spectra for the measured variants

Obr. 3 Srovnání třetino-oktávových spekter pro měřené varianty

According to Table Tab. 1, the sound pressure values in the case of a separate NT3 rail are almost ten decibels higher than when using sidewalls. When comparing both types of sidewalls, it is possible to state from this table that the equivalent sound pressure level values are slightly more favourable for the rail with glued sidewalls including SBR foot profile. The difference here is 1.6 dB.

The third-octave characteristic of the equivalent noise levels using the A filter is shown in Fig. 3 for the measurement of all three variants, i.e. without sidewall rails, rails with sidewalls fastened with steel clips and rails with

Dle tabulky Tab. 1 jsou hodnoty akustického tlaku v případě samostatné kolejnice NT3 o téměř deset decibelů vyšší než při použití bokovnic. Při srovnání obou typů bokovnic je možné z této tabulky konstatovat nepatrně výhodnější ekvivalentní hodnoty hladiny akustického tlaku u kolejnice s nalepovacími bokovnicemi včetně SBR patním profilem. Rozdíl zde činí 1.6 dB.

Třetino-oktávová charakteristika ekvivalentních hladin hluku s použitím filtru A je pro měření všech tří variant, tedy bez kolejnice bokovnic, kolejnice s bokovnicemi upevněnými ocelovými sponami a kolejnice s nalepenými bokovnicemi a SBR

glued sidewalls and SBR foot profile. Significant values in the measurement variant on the rail without sidewalls were found at a frequency 500 Hz and further especially in the intervals 800 Hz to 2500 Hz and 5 kHz to 10 kHz. Both types of sidewalls, both with clips and with adhesive sidewalls including the SBR heel profile, significantly attenuate frequency components in the intervals of 800 Hz to 2500 Hz and 5 kHz to 10 kHz compared to the variant without sidewalls. Slightly more favourable attenuation was achieved in the rail sample with adhesive sidewalls with an SBR heel profile. It should be noted that the frequency range up to 800 Hz is less significant in terms of the total Short-term equivalent sound pressure level, since in this interval its values are approximately below 60 dB(A). Therefore, from the point of view of the effect of noise on humans, attenuation in the area of 800 Hz is important. It should be noted that these are third-octave waveforms, i.e. from the point of view of calculating a discontinuous frequency range. For this reason, bar graphs were used.

For a more detailed evaluation and comparison of individual samples, an analysis was performed using the time, frequency and time-frequency domains. Images were created for the time-frequency analysis, which consist of three graphs (Fig. 3 to Fig. 6). The upper graph shows the time course of the instantaneous acoustic pressure value. It shows in particular global extremes and attenuation within the entire signal with time. The left graph shows the amplitude spectrum of the acoustic response as a function of frequency calculated by direct application of the Fourier transform to the measured signal. Significant frequency components contained in the entire measured signal are visible here. The middle graph shows a 3D display of the time-frequency course of the acceleration amplitude spectrum. The dependence of the amplitude spectrum at individual time and frequency moments is shown here, i.e. the time and frequency course are combined. In simple terms, time-frequency graphs provide information about how long a given frequency component occurs in the measured signal. The sound pressure values in the decibel scale are shown in different colors in the middle graphs. Note that the maximum value is black, the lowest is white.

The time course of the sound pressure for a rail without sidewalls shows a maximum sound pressure value of around ± 20 Pa on average.

patním profilem, zobrazena v obr. 3. Výrazné hodnoty ve variantě měření na kolejnici bez bokovnic byly zjištěny na frekvenci 500 Hz a dále zejména v intervalech 800 Hz až 2500 Hz a 5 kHz až 10 kHz. Oba typy bokovnic, jak se sponami, tak s nalepovacími bokovnicemi včetně SBR patního profilu výrazně tlumí frekvenční složky v intervalech 800 Hz až 2500 Hz a 5 kHz až 10 kHz oproti variantě bez bokovnic. Nepatrně výhodnějšího útlumu bylo dosaženo u vzorku kolejnice s nalepovacími bokovnicemi s SBR patním profilem. Podotkněme, že frekvenční oblast do 800 Hz je méně významná z hlediska výše celkové Krátkodobé ekvivalentní hladiny akustického tlaku, neboť v tomto intervalu jsou její hodnoty cca pod 60 dB(A). Tedy z hlediska vlivu hluku na člověka je důležité tlumení v oblasti na 800 Hz. Poznamenejme, že se jedná o třetino-oktávové průběhy, tedy z hlediska výpočtu nespojitě frekvenční oblasti. Z uvedeného důvodu byly použity sloupcové grafy.

K detailnějšímu vyhodnocení a srovnání jednotlivých vzorků byla provedena analýza s využitím časové, frekvenční a časově frekvenční oblasti. K časově frekvenční analýze byly vytvořeny obrázky, které jsou tvořeny trojicí grafů (Obr. 3 až Obr. 6). V horním grafu je zobrazen časový průběh okamžité hodnoty akustického tlaku. V něm jsou patrné zejména globální extrémy a útlum v rámci celého signálu s časem. V levém grafu je zobrazeno amplitudové spektrum akustické odezvy v závislosti na frekvenci vypočítané přímou aplikací Fourierovy transformace na naměřený signál. Zde jsou patrné význačné frekvenční složky obsažené v celém naměřeném signále. V prostředním grafu je 3D zobrazení časově frekvenčního průběhu amplitudového spektra zrychlení. Je zde zobrazena závislost amplitudového spektra v jednotlivých časových a frekvenčních okamžicích, tj. spojuje se časový a frekvenční průběh. Zjednodušeně je možné říci, že časově frekvenční grafy poskytují informaci o tom, jak dlouho se daná frekvenční složka vyskytuje v naměřeném signále. Hodnoty akustického tlaku v decibelové stupnici jsou znázorněny u prostředních grafů odlišnými barvami. Poznamenejme, že maximální hodnota je barvy černé, nejnižší je pak barvy bílé.

Z časového průběhu akustického tlaku u kolejnice bez bokovnic je patrná maximální hodnota akustického tlaku v průměru kolem

The attenuation of the response signal is very gradual, reaching values 10x lower in about 0.5 s. The amplitude spectrum calculated by the Welch method shows significant values at frequencies 1020 Hz, 2010 Hz, 2900 Hz, 4100 Hz, 4380 Hz, 4540 Hz, 5280 Hz, 6690 Hz, 6880 Hz, 7740 Hz, 8600 Hz, 9440 Hz, and 9700 Hz. The calculated values of the key components of the spectrum range from 110 dB to 130 dB. The same key components of the spectrum are visible from the amplitude spectrum created using the short-term Fourier transform. At the same time, it is evident that the key components of the spectrum have a relatively long duration from the excitation pulse (up to 0.5 s), with a decrease of 30 dB.

The time course of the acoustic pressure for a rail with sidewalls attached with steel clips shows a maximum acoustic pressure value of around ± 13 Pa on average. Compared to the variant without sidewalls, the signal attenuation is significantly faster, reaching values 10x lower in approximately 0.2 s. The amplitude spectrum calculated by the Welch method shows significant values at frequencies of 1020 Hz, 2010 Hz, 2900 Hz, 4100 Hz, 4380 Hz, 4540 Hz, 5280 Hz, 6690 Hz, 7740 Hz, 8600 Hz, 9440 Hz, 9700 Hz. The calculated values of the key components of the spectrum range from 102 dB to 116 dB. It is clear that these are significantly lower than in the case of measuring a rail without sidewalls. The amplitude spectrum created using the short-term Fourier transform shows the same key components of the spectrum. At the same time, it is clear that the key components of the spectrum have a higher attenuation compared to the measurement variant of the rail without sidewalls, from the excitation shock (maximum 0.3 s – 0.35 s), with a decrease of 30 dB.

From the time course of the acoustic pressure for the rail with glued sidewalls including the application of the SBR foot profile, the maximum acoustic pressure value is visible on average around ± 11 Pa. The attenuation of the signal is again relatively fast compared to the measurement on the rail without sidewalls, to values 10x lower in about 0.2 s. When compared to the variant of the rail with sidewalls attached with steel clips, it is approximately the same. The amplitude spectrum calculated by the Welch method shows significant values at frequencies of 990 Hz, 2430 Hz, 4100 Hz, 4540 Hz, 5760 Hz, 7500 Hz, 850 Hz and 9100 Hz. The calculated values of the key

± 20 Pa. Útlum odezvvového signálu je velmi pozvolný, na hodnoty 10x nižší je za cca 0.5 s. Amplitudové spektrum vypočtené Welchovou metodou vykazuje význačné hodnoty na frekvencích 1020 Hz, 2010 Hz, 2900 Hz, 4100 Hz, 4380 Hz, 4540 Hz, 5280 Hz, 6690 Hz, 6880 Hz, 7740 Hz, 8600 Hz, 9440 Hz, a 9700 Hz. Vypočtené hodnoty klíčových složek spektra se pohybují v intervalu 110 dB do 130 dB. Z amplitudového spektra vytvořeného pomocí krátkodobé Fourierovy transformace jsou patrné stejné klíčové složky spektra. Současně je patrné, že klíčové složky spektra mají poměrně dlouhou dobu svého trvání od budícího rázu (až 0.5 s), při poklesu o 30 dB.

Z časového průběhu akustického tlaku u kolejnice s bokovnicemi připevněnými ocelovými sponami je patrná maximální hodnota akustického tlaku v průměru kolem ± 13 Pa. Oproti variantě bez bokovnic je útlum signálu výrazně rychlejší, na hodnoty 10x nižší za cca 0.2 s. Amplitudové spektrum vypočtené Welchovou metodou vykazuje význačné hodnoty na frekvencích 1020 Hz, 2010 Hz, 2900 Hz, 4100 Hz, 4380 Hz, 4540 Hz, 5280 Hz, 6690 Hz, 7740 Hz, 8600 Hz, 9440 Hz, 9700 Hz. Vypočtené hodnoty klíčových složek spektra se pohybují v intervalu 102 dB do 116 dB. Je zřejmé, že tyto jsou výrazně nižší než v případě měření kolejnice bez bokovnic. Z amplitudového spektra vytvořeného pomocí krátkodobé Fourierovy transformace jsou patrné stejné klíčové složky spektra. Současně je patrné, že klíčové složky spektra mají vyšší útlum v porovnání s variantou měření kolejnice bez bokovnic, od budícího rázu (maximálně 0.3 s – 0.35 s), při poklesu o 30 dB.

Z časového průběhu akustického tlaku u kolejnice s lepenými bokovnicemi včetně aplikace SBR patního profilu je patrná maximální hodnota akustického tlaku v průměru kolem ± 11 Pa. Útlum signálu je opět poměrně rychlý oproti měření na kolejnici bez bokovnic, na hodnoty 10x nižší za cca 0.2 s. Při srovnání s variantou kolejnice s bokovnicemi uchycenými ocelovými sponami je přibližně stejný. Amplitudové spektrum vypočtené Welchovou metodou vykazuje význačné hodnoty na frekvencích 990 Hz, 2430 Hz, 4100 Hz, 4540 Hz, 5760 Hz, 7500 Hz, 850 Hz a 9100 Hz. Vypočtené hodnoty klíčových složek spektra se pohybují v intervalu 86 dB až 114 dB. Je zřejmé, že tyto jsou výrazně

components of the spectrum range from 86 dB to 114 dB. It is clear that these are significantly lower than in the case of measuring a rail without sidewalls.

When compared with the variant of a rail with sidewalls attached with steel clips, the results are similar. The amplitude spectrum created using the short-term Fourier transform shows the same key components of the spectrum as in the frequency analysis. At the same time, it is clear that the key components of the spectrum have a higher attenuation compared to the variant of measuring a rail without sidewalls, from the excitation shock (maximum 0.3 s – 0.35 s), with a decrease of 30 dB. When comparing the measurements of the rail and both types of sidewalls, it is clear that the rail with adhesive sidewalls and SBR heel profile has more favourable time, frequency and time-frequency characteristics.

4. CONCLUSIONS

Within the framework of the obtained results, it can be stated that the best damping properties are exhibited by the rail sample with adhesive sidewalls and SBR heel profile. However, it is worth noting that the difference in measured values for the rail sample with adhesive sidewalls and SBR heel profile compared to the rail with sidewalls fastened with steel clips is relatively small.

Based on the measurements and analyses performed, it can be stated that the methodology of laboratory measurements and analyses used provides suitable results and conclusions for assessing the attenuation of the measured samples in the laboratory. The measured and calculated quantities are characterized by sufficient accuracy and informativeness. They allow for very good qualitative differentiation of individual samples. The obtained results will need to be verified during field measurements.

Based on the laboratory measurements and subsequent analyses, it can be stated that the proposed methodology for evaluating rail absorbers using acoustic response to mechanical impact by a steel ball represents a suitable tool for rapid and reproducible assessment of their acoustic properties. The use of standard-

nižší než v případě měření kolejnice bez bokovnic.

Při srovnání s variantou kolejnice s bokovnicemi uchycenými ocelovými sponami jde o podobné výsledky. Z amplitudového spektra vytvořeného pomocí krátkodobé Fourierovy transformace jsou patrné stejné klíčové složky spektra jako u frekvenční analýzy. Současně je patrné, že klíčové složky spektra mají vyšší útlum v porovnání s variantou měření kolejnice bez bokovnic, od budícího rázu (maximálně 0.3 s – 0.35 s), při poklesu o 30 dB. Při srovnání měření kolejnice a obou typů bokovnic je zřejmé, že výhodnější časové, frekvenční i časově frekvenční charakteristiky vykazuje kolejnice s nalepovacími bokovnicemi a SBR patním profilem.

4. ZÁVĚRY

V rámci získaných výsledků je možné konstatovat, že nejlepší tlumící vlastnosti vykazuje vzorek kolejnice s nalepovacími bokovnicemi a SBR patním profilem. Je však vhodné podotknout, že rozdíl naměřených hodnot u vzorku kolejnice s nalepovacími bokovnicemi a SBR patním profilem ve srovnání s kolejnicí s bokovnicemi upevněnými ocelovými sponami je poměrně malý.

Na základě provedených měření a analýz lze konstatovat, že použitá metodika laboratorních měření a analýz poskytuje vhodné výsledky a závěry pro posouzení útlumu měřených vzorků v laboratoři. Měření i vypočítané veličiny se vyznačují dostatečnou přesností a vypočítací schopností. Umožňují od sebe velmi dobře kvalitativně odlišit jednotlivé vzorky. Získané výsledky bude nutné ověřit při měřeních v terénu.

Na základě provedených laboratorních měření a následných analýz lze konstatovat, že navržená metodika hodnocení kolejnicových absorbérů prostřednictvím akustické odezvy na mechanický ráz ocelovou koulí představuje vhodný nástroj pro rychlé a reprodukovatelné posuzování jejich akustických vlastností. Použití standardizovaného impulsního buzení umožnilo vytvořit opakovatelné podmínky

ized impulse excitation made it possible to create repeatable experimental conditions and ensure mutual comparability of the results obtained for individual tested absorber variants.

The analyses performed in the time and frequency domains demonstrated that the measured acoustic response reacts sensitively to changes in the dynamic properties of the rail-absorber system. The obtained impulse responses, frequency spectra, one-third octave characteristics and the use of time-frequency analysis made it possible to identify differences between individual design solutions and assess their ability to limit rail vibrations and reduce acoustic energy radiation. At the same time, it was confirmed that the efficiency of the absorbers is manifested not only by a decrease in the amplitude of the acoustic response, but also by a faster attenuation of vibrations and therefore of the acoustic pressure by changing the spectral distribution of energy in the crucial frequency bands.

A significant advantage of the proposed methodology is its simplicity, low time consumption and minimal requirements for experimental equipment compared to extensive operational measurements on the railway infrastructure. The method allows for a large number of repeated tests to be carried out in controlled laboratory conditions and provides sufficiently sensitive data for the development, optimization and mutual comparison of rail absorbers before their installation into service.

The obtained results confirm that the acoustic response induced by mechanical shock can be used as a relevant indicator of the vibroacoustic behaviour of the rail and the efficiency of the absorbers used. The proposed procedure thus represents a suitable addition to standard vibration and acoustic tests and can serve as an effective tool for laboratory screening of new design solutions. At the same time, it creates the prerequisites for further development of the methodology, for example by some connection of acoustic parameter measurements with vibration measurements using accelerometers, modal analysis or numerical modelling using the finite element method. It can therefore be stated that the proposed methodology has met the expected goals and has proven its applicability for objective evaluation of the acoustic properties of rail absorbers. Its use can contribute to streamlining the process

experimentu a zajistit vzájemnou porovnatelnost výsledků získaných pro jednotlivé zkoušené varianty absorbérů.

Provedené analýzy v časové i frekvenční oblasti prokázaly, že měřená akustická odezva citlivě reaguje na změny dynamických vlastností systému kolejnice–absorbér. Získané impulzní odezvy, frekvenční spektra, třetinoctávkové charakteristiky i použití časově frekvenční analýzy umožnily identifikovat rozdíly mezi jednotlivými konstrukčními řešeními a posoudit jejich schopnost omezovat vibrace kolejnice a snižovat vyzařování akustické energie. Současně bylo potvrzeno, že účinnost absorbérů se projevuje nejen poklesem amplitudy akustické odezvy, ale také rychlejším útlumem vibrací a tedy i akustického tlaku změnou spektrálního rozložení energie v rozhodujících frekvenčních pásmech.

Významnou předností navržené metodiky je její jednoduchost, nízká časová náročnost a minimální požadavky na experimentální vybavení ve srovnání s rozsáhlými provozními měřeními na železniční infrastruktuře. Metoda umožňuje realizovat velké množství opakovaných zkoušek v kontrolovaných laboratorních podmínkách a poskytuje dostatečně citlivé podklady pro vývoj, optimalizaci a vzájemné porovnávání kolejnicových absorbérů ještě před jejich instalací do provozu.

Získané výsledky potvrzují, že akustická odezva vyvolaná mechanickým rázem může být využita jako relevantní indikátor vibroakustického chování kolejnice a účinnosti použitých absorbérů. Navržený postup tak představuje vhodný doplněk ke standardním vibračním a akustickým zkouškám a může sloužit jako efektivní nástroj pro laboratorní screening nových konstrukčních řešení. Současně vytváří předpoklady pro další rozvoj metodiky, například určitým propojením měření akustických parametrů s měření vibrací pomocí akcelerometrů, modální analýzou nebo numerickým modelováním metodou konečných prvků.

Lze proto konstatovat, že navržená metodika splnila očekávané cíle a prokázala svou použitelnost pro objektivní hodnocení akustických vlastností kolejnicových absorbérů. Její využití může přispět k zefektivnění procesu vývoje protihlukových opatření a ke zvyšování účinnosti technických prostředků určených

of developing noise-reducing measures and increasing the efficiency of technical means intended to reduce the noise load of railway transport.

ke snižování hlukové zátěže železniční dopravy.

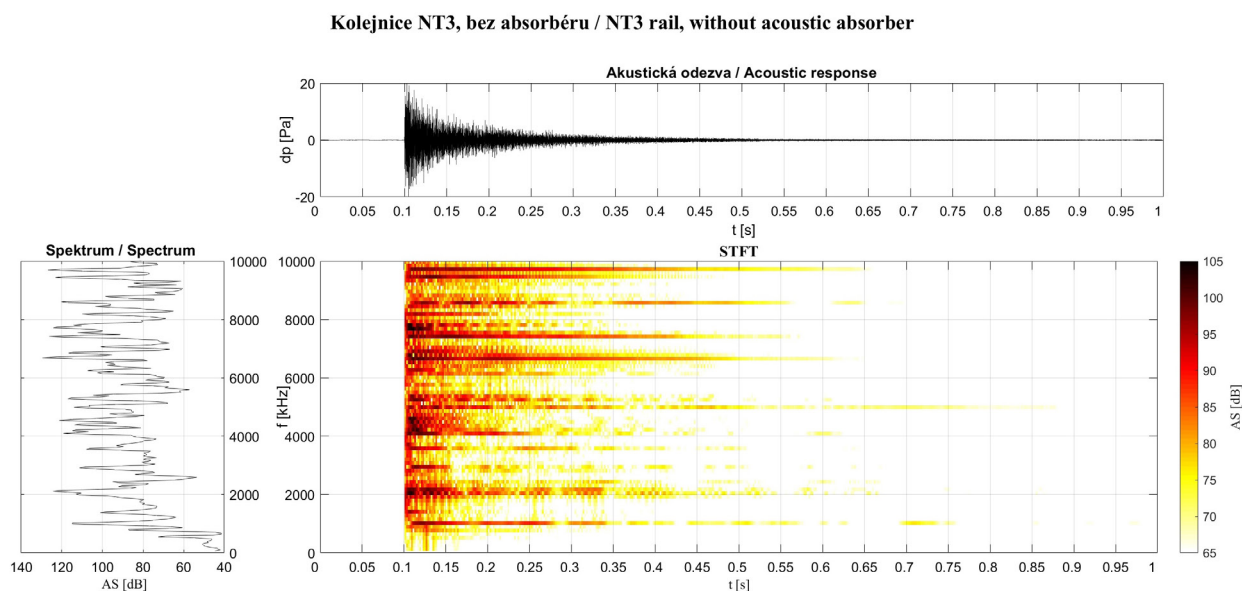


Fig. 4 Rail without absorber

Obr. 4 Kolejnice bez absorbéru

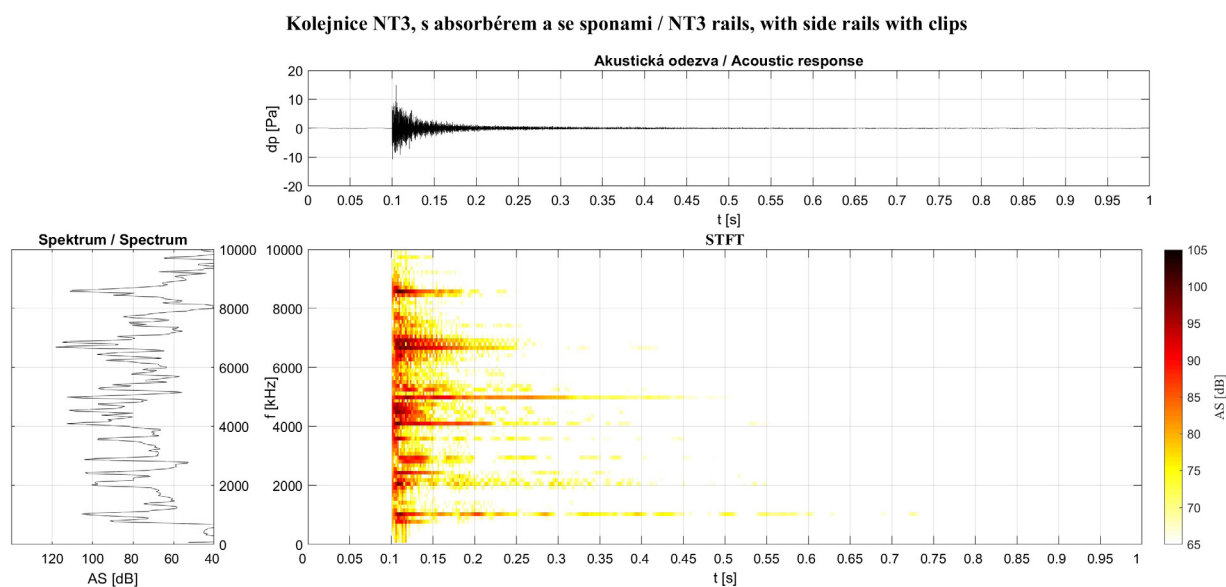


Fig. 5 Rail with absorber attached with steel clips

Obr. 5 Kolejnice s absorbérem uchyceným ocelovými sponami

Kolejnice NT3, s nalepeným absorbérem a s SBR patním profilem / NT3 rail, with glued absorber and SBR heel profile

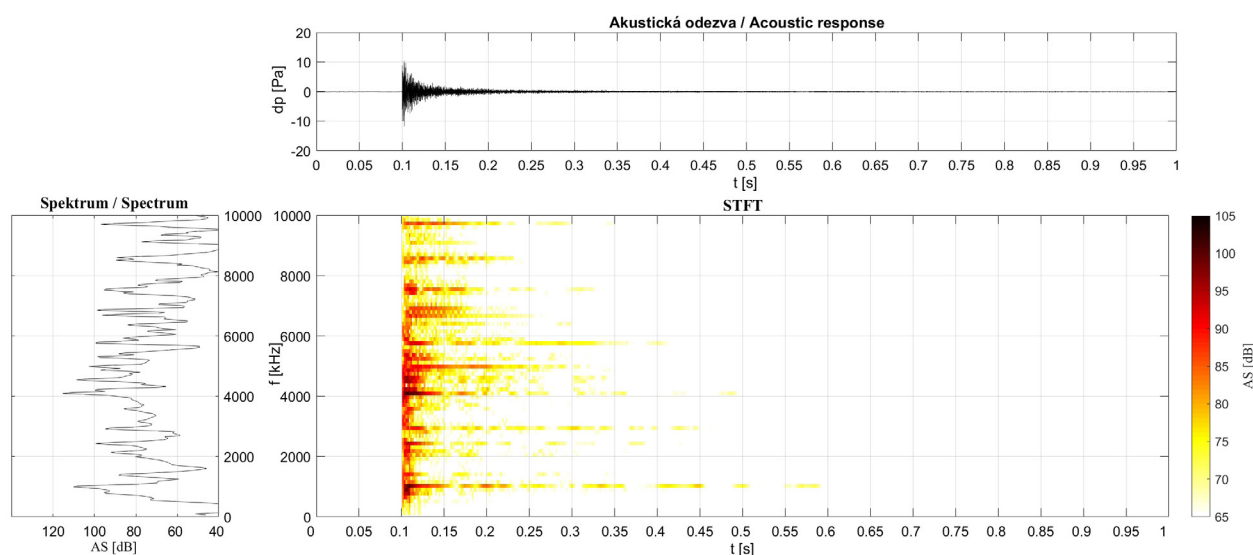


Fig. 6 Rail with glued absorber including SBR foot profile

Obr. 6 Kolejnice s nalepeným absorbérem včetně SBR patního profilu

In the future, the authors plan to expand the research by designing and implementing a large-scale model of a railway/tram track, which will allow for a more detailed study of vibration propagation, interaction of individual structural elements and evaluation of the effectiveness of various anti-vibration measures under laboratory conditions. Further development will also include the implementation of an electrodynamic exciter, which will enable precisely defined and repeatable excitation of the structure in a wide frequency range. The use of an electrodynamic exciter will provide the opportunity to perform advanced dynamic tests, identify natural frequencies and shapes of structural oscillations, determine frequency transfer functions and perform a detailed analysis of the effectiveness of the proposed anti-noise and anti-vibration measures. The experimental facility created in this way should contribute to a deeper understanding of the mechanisms of vibration generation and propagation in the railway infrastructure and at the same time enable verification of the results of numerical models and simulation calculations.

In future research, the authors also want to pay great attention to the development of modern methods of signal processing and analysis and their connection with artificial intelligence tools. The goal is to implement advanced methods of time, frequency and

Do budoucna autoři plánují rozšířit výzkum o návrh a realizaci velkoprostorového modelu železniční/tramvajové tratě, který umožní podrobnější studium šíření vibrací, interakce jednotlivých konstrukčních prvků a hodnocení účinnosti různých antivibračních opatření za laboratorních podmínek. Součástí dalšího vývoje bude rovněž implementace elektrodynamického budiče, jenž umožní přesně definované a opakovatelné buzení konstrukce v širokém frekvenčním rozsahu. Využití elektrodynamického budiče poskytne možnost realizovat pokročilé dynamické zkoušky, identifikaci vlastních frekvencí a tvarů kmitání konstrukce, stanovení frekvenčních přenosových funkcí a detailní analýzu účinnosti navržených protihlukových a protivibračních opatření. Takto vytvořené experimentální zařízení by mělo přispět k hlubšímu pochopení mechanismů vzniku a šíření vibrací v železniční infrastruktuře a současně umožnit ověřování výsledků numerických modelů a simulačních výpočtů.

Velkou pozornost chtějí autoři v budoucím výzkumu věnovat také rozvoji moderních metod zpracování a analýzy signálů a jejich propojení s nástroji umělé inteligence. Cílem je implementace pokročilých metod časové, frekvenční a časově-frekvenční analýzy, které umožní podrobnější identifikaci dynamických jevů probíhajících v železniční infrastruktuře. Současně bude pozornost zaměřena na

time-frequency analysis, which will allow for a more detailed identification of dynamic phenomena occurring in the railway infrastructure. At the same time, attention will be focused on the use of machine learning methods and deep neural networks for automatic classification, anomaly detection, damage identification and prediction of the future technical condition of structures.

It is expected that the combination of modern signal analysis methods with artificial intelligence algorithms will significantly increase the accuracy of structural condition assessment, streamline the diagnostic process and create the prerequisites for the introduction of predictive maintenance systems for railway infrastructure. The result should be tools capable of automatically evaluating large volumes of measured data, identifying incipient degradation processes and providing support in decision-making on the optimal timing of maintenance and repairs. The process will be completed with a certified methodology.

využití metod strojového učení a hlubokých neuronových sítí pro automatickou klasifikaci, detekci anomálií, identifikaci poškození a predikci budoucího technického stavu konstrukcí.

Očekává se, že kombinace moderních metod signálové analýzy s algoritmy umělé inteligence umožní výrazně zvýšit přesnost hodnocení stavu konstrukcí, zefektivnit proces diagnostiky a vytvořit předpoklady pro zavedení systémů prediktivní údržby železniční infrastruktury. Výsledkem by měly být nástroje schopné automaticky vyhodnocovat rozsáhlé objemy měřených dat, identifikovat počínající degradační procesy a poskytovat podporu při rozhodování o optimálním načasování údržby a oprav. Daný proces bude zakončen zakončen certifikovanou metodikou.

REFERENCES/ POUŽITÁ LITERATURA

1. THOMPSON, D. J. Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control. Oxford: Elsevier, 2009. ISBN 978-0-08-045147-3.
2. THOMPSON, D. J. Railway Noise and Vibration. Amsterdam: Elsevier, 2009.
3. DUMITRIU, M.; CRUCEANU, I. C. On the Rolling Noise Reduction by Using the Rail Damper. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2017, 10(6), s. 87–95.
4. HANSSEN, B.; JONES, C.; CROFT, J. Laboratory Methods for Testing the Performance of Acoustic Rail Dampers. In: Internoise Proceedings, 2013.
5. KUCHAR, A. J. T.; MARINKOVIC, D.; ZEHN, M. Parametric Investigation of a Rail Damper Design Based on a Lab-Scaled Model. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2021, 9(5), s. 1009–1024.
6. ZOONTJENS, L.; WELSH, A.; CROFT, J. Predicting and Managing Rolling Noise Emissions from Trains Using Rail Dampers. Proceedings of Acoustics Australia, 2017.
7. SUN, F. et al. Experimental Study on the Rail Damper for Vibration and Noise Reduction. Railway Engineering Science, 2025.
8. ISO 3095. Railway Applications – Acoustics – Measurement of Noise Emitted by Railbound Vehicles. Geneva: International Organization for Standardization.
9. EN 15461. Railway Applications – Noise Emission – Characterisation of the Dynamic Properties of Track Sections for Pass-By Noise Measurements.
10. SMUTNÝ J., PAZDERA L.: New Techniques in Analysis of Dynamic Parameters Rail

Fastening, InSight, The Journal of The British Institute of Non-Destructive Testing. Vol 46. No 10. October. 2004. pp. 612-615. ISSN 13542575.

Acknowledgements/ Poděkování

This contribution was supported by the project FAST-S-26-9099, Development of multimodal diagnostics of railway infrastructure using vibration analysis and visual identification of train-sets.

Tento příspěvek byl podpořen projektem FAST-S-26-9099, Rozvoj multimodální diagnostiky železniční infrastruktury využívající vibrační analýzu a vizuální identifikaci vlakových souprav.



Prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

He graduated from the Faculty of Electrical Engineering, TU Brno, specialisation technology of radio and communication devices. He works as a researcher-teacher at the Department of railway constructions and structures. He was graduated Ph.D. at the specialisation Theory of structures (Ph.D. thesis Modern Method of Noise and Vibration Analysis Applied on Railway Structures). College lecturer – 2002 (“Time Frequency Analysis of Constructional Structures and Materials”). 2009 – Professor – Constructions and Transport Structures. He is member of Czech association for geo-information, Czech acoustic society and Time frequency user club. Within the framework of the scientific and research and pedagogical activities he devotes his activities especially to the problems of geographical information systems, the experimental analysis of structures, the analysis of noise and vibrations, the problems of applying the methods of the artificial intelligence in experimental analysis of structures, the modelling of structures etc.

e-mail: smutny.j@fce.vutbr.cz



Prof. Ing. Pazdera, CSc.

He graduated from Technical University of Brno. Since 2009 he is a professor. He is the Member of the Czech Association for Non-Destructive Testing – a professional group for Acoustic Emission and the member of the RS 07 regional group committee. Since 1988, he is on The Department of Physics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology. He is in charge of theoretical exercises and laboratory sessions in Physics. He is conducting research and development in the field of physical phenomenon measurement and measurement automation, with particular focus on the application of computers in measurements and evaluation. His research is focused on the acoustic and vibration areas.

He published over 40 papers in foreign periodicals, in the field of engineering source signal measurement and analysis, dealing above all, with nondestructive testing, noise and vibrations.

e-mail: pazdera.l@fce.vutbr.cz



Milan Štukavec

He graduated from the Faculty of Civil Engineering, TU Brno, specialisation Structural design. He gained his Ph.D. in the specialisation Theory of structures (Ph.D. thesis Mitigating Noise and Vibrations Using Recycled Elastomers). Certified Engineer in the field of Statics and Dynamics of Structures. Court expert in the field of Structural Engineering. A member of the Czech Chamber of Authorized Engineers and Technicians. He has been working as a structural engineer at Manhire Associates, K2 project and ZIPP Brno. Several projects of concrete railway structures with strong interest in experimental analysis and measuring real behaviour and response of the structures.