

THE LABORATORY TESTING OF RAIL FASTENING BY INERTIAL ELECTRODYNAMIC EXCITER METHOD

LABORATORNÍ TESTOVÁNÍ KOLEJNICOVÉHO UPEVNĚNÍ METODOU INERCIÁLNÍHO ELEKTRODYNAMICKÉHO BUDIČE

Jaroslav Smutný, Lubos Pazdera, Dusan Janostik, Radovan Rimsky, Iunishchenko Petr

Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering
Institute of Railway Structures and Constructions, Veveří 95, 602 00 Brno

Abstract: The paper is devoted to the use of an inertial electrodynamic exciter in laboratory testing of a rail fastening sample. The exciter of Tira Company was integrated into a control system from Vibration Research Company for testing purposes. The paper includes a discussion of the motivation for using the excitation system in laboratory testing, as well as a description of the characteristics and capabilities of dynamic excitation of structures, including a proposal of methods of analysing measured data. The Vossloh rail fastening sample was used for the purpose of the article. The contribution also includes a comparison of the vibration parameters of the tested structure and recommendations for other workplaces that would like to use a similar excitation system in their vibration experiments.

Keywords: Vibration, vibration acceleration, electrodynamic exciter, excitation of rail fastening structures, time and frequency domain analysis, time-frequency methods

DOI:

1. INTRODUCTION

The basic requirement imposed on individual parts of the railway track is their functional reliability and the related safety of railway traffic [1,2]. The assessment of the properties of a new structure usually takes place in three phases - theoretical work and calculations, laboratory measurements and measurements in real conditions, i.e., on the track. Theoretical work and calculations analyse the properties of the dynamic vehicle-track system, explain, and evaluate the role of system elements and provide important information for subsequent application in the track. The vehicle-track dynamic system has a strongly non-linear character. Dynamic properties are valued mainly using calculated frequency spectra, transfer functions and frequency response functions.

Laboratory measurements enable the evaluation of static and dynamic properties of structural components. They are especially effective for examining individual elements and their assemblies. Various methods [3,4,5] and different criteria have been and are being applied to test the superstructure design. Often the method of excitation of the structure by mechanical shock is used in dynamic tests [6]. Impact excitation is advantageous for determining the natural frequencies of the system. Another possibility is to load the specimens by continuous excitation with exciters. This makes it possible to focus on certain frequencies or an interval of frequencies. In the evaluation, frequency spectra of the transfer function or frequency response function are constructed.

From the above, it follows that an important aspect in the decision to select and use a new structural element is a theo-

1. ÚVOD

Základním požadavkem kladeným na jednotlivé části kolejové jízdní dráhy je jejich funkční spolehlivost a s ní související bezpečnost železničního provozu [1,2]. Posouzení vlastností nové konstrukce obvykle probíhá ve třech fázích – teoretické práce a výpočty, laboratorní měření a měření v reálných podmínkách, tedy v koleji. Teoretické práce a výpočty analyzují vlastnosti dynamické soustavy vozidlo – kolej, vysvětlují a oceňují roli prvků soustavy a poskytují důležité informace pro následnou aplikaci v koleji. Dynamická soustava vozidlo – kolej má silně nelineární charakter. Dynamické vlastnosti se oceňují zejména pomocí vypočtených frekvenčních spekter, přenosových funkcí a funkcí frekvenční odezvy.

Laboratorní měření umožňují hodnocení statických a dynamických vlastností konstrukčních součástí. Jsou efektivní zejména pro zkoumání jednotlivých prvků a jejich sestav. K testování konstrukce železničního svršku byly a jsou uplatňovány různé metody a různá kritéria [3,4,5]. Často bývá při dynamických zkouškách použita metoda buzení konstrukce mechanickým rázem [6]. Buzení rázem je výhodné pro určení vlastních frekvencí dané soustavy. Další možností je zatížení vzorků konstrukcí spojitým buzením vibrátory. To umožňuje zaměřit se na určité frekvence, případně interval frekvencí. Při vyhodnocení se sestavují frekvenční spektra přenosové funkce nebo funkce frekvenční odezvy.

Z výše uvedeného vyplývá, že důležitým aspektem při rozhodování o výběru a použití nového konstrukčního prvku, je

retical analysis supported by laboratory tests on the finished product. However, even laboratory analysis may not yield conclusive results for selected railway superstructures. Then it is necessary to supplement the product validation process with in-situ measurements (in the case of a rail grate, i.e. directly on the track) [7].

In this case, European legislation requires long-term monitoring of the tested structure. During this period, it recommends continuous monitoring of selected parameters and subsequent comparison with a reference assembly that has been placed on the same track and within the same time period as the assembly under test. Measurements on the track consider the stochastic nature of the action of rolling stock and the characteristics of the track structure. Frequency spectra of selected variables, octave, third-octave analyses [8,9], etc. are compiled. Advanced analyses include time-frequency methods with the incorporation of machine learning methods and recognition of the current track condition.

2. INTRODUCTION TO THE ISSUES OF LABORATORY TESTS

A variety of tests and evaluation methods are used to determine the characteristics of structures and structural parts (samples) [9,10]. These include static and low frequency tests, or fatigue tests. Different types of excitation systems are used. Among the best known of these are hydraulic and mechanical systems. Their greatest advantage is the large range of excitation forces. Some limitations can be seen in the small frequency range of the excitation signal (usually around up to tens of Hz).

Impact excitation is very often used to determine the dynamic parameters of structures, samples and assemblies. It is a simple excitation method that can excite the structure with a wide range of frequency components, including resonant ones (in the order of kHz). However, it is a type of excitation where the frequency content of the excitation signal is quite different from the real one.

The electrodynamic excitation system offers further options for excitation of the structure [11]. This consists of its own exciter, which is mechanically attached to the tested structure. It is an exciter in which the excitation signal is generated by the oscillation of the additional load mass. This is represented in the case of an inertial exciter by its own body and technology. The excitation signal is generated in a special controller, then amplified in a power amplifier.

Note that the optimal use of a vibration exciter presupposes a constant level of vibration at different types of excitation signals. The frequency response is not flat, it contains resonant maxima and other resonances are clogged by the tested object mounted on the exciter. Therefore, within the frequency band, the gain of the amplifier must vary with frequency. This gain is set by a controller that receives feedback information from sensors (usually accelerometers) located on the test object or driver.

The main control elements of the exciter therefore include a signal generator, a vibration measuring system and a circuit that sets the level of the excitation signal. The digital exciter control system is therefore a powerful and cost-effective solution for a wide range of shock and vibration tests. In combination with an electrodynamic exciter, it makes it possible

teoretická analýza podpořená laboratorními zkouškami na hotovém výrobku. U vybraných konstrukcí železničního svršku však ani laboratorní analýza nemusí přinést průkazné výsledky. Tehdy je nezbytné doplnit validační proces výrobku o měření in-situ (v případě kolejového roštu tedy přímo na trati) [7].

Evropská legislativa v takovém případě vyžaduje dlouhodobé sledování testované konstrukce. Během této doby doporučuje průběžné sledování vybraných parametrů a následné porovnání s referenční sestavou, která byla vložena do stejné koleje a ve stejném časovém období jako sestava testovaná. Měření v koleji zohledňují stochastický charakter působení kolejových vozidel a vlastností konstrukce kolejové jízdní dráhy. Sestavují se frekvenční spektra vybraných veličin, oktávové, třetino-oktávové analýzy [8,9] apod. K pokročilým analýzám pak náleží časové frekvenční metody se zahrnutím metod strojového učení a rozpoznávání aktuálního stavu tratí.

2. ÚVOD DO PROBLEMATIKY LABORATORNÍCH TESTŮ

Pro zjišťování charakteristik konstrukcí a konstrukčních dílů (vzorků) se používá celá řada testů i metod hodnocení [9,10]. Jedná se o statické a nízko frekvenční zkoušky, případně únavové zkoušky. Využívají se různé typy budících systémů. K nejznámějším patří hydraulické a mechanické systémy. Jejich největší výhodou je velký rozsah budících sil. Určité omezení lze vidět v malém frekvenčním rozsahu budícího signálu (obvykle kolem jednotek až desítek Hz).

Velmi často se pro zjišťování dynamických parametrů konstrukcí, vzorků a sestav používá buzení rázem. Jde o jednoduchou metodu buzení, která umí vybudit konstrukci širokým spektrem frekvenčních složek včetně rezonančních (řádově jednotek kHz). Nicméně se jedná o typ buzení, kde frekvenční obsah budícího signálu je zcela odlišný od reálného.

Další možnosti buzení konstrukce nabízí elektrodynamický budící systém [11]. Tento sestává z vlastního budiče, který je mechanicky připevněn na testovanou konstrukci. Jedná se o budič, při kterém budící signál vzniká kmitáním přídavné zatěžovací hmoty. Tu představuje u inerciálního budiče jeho vlastní těleso a technologie. Budící signál je generován ve speciálním kontroléru, následně je zesílen ve výkonovém zesilovači.

Podotkneme, že optimální použití vibračního budiče předpokládá konstantní úroveň vibrací při různém druhu budících signálů. Kmitočtová charakteristika není plochá, obsahuje rezonanční maxima a další rezonance zanáší testovaný objekt namontovaný na budiči. V rámci frekvenčního pásma se tedy zisk zesilovače musí měnit s kmitočtem. Tento zisk je nastaven kontrolérem, jenž dostává zpětnovazební informaci ze snímačů (většinou akcelerometrů) umístěných na testovaném objektu nebo budiči.

K hlavním řídicím prvkům budiče tedy patří generátor signálů, měřicí systém vibrací a obvod, který nastavuje úroveň budícího signálu. Digitální řídicí systém budiče tedy představuje výkonné a ekonomické řešení pro široké spektrum otřesových a vibračních testů. Ve spojení s elektrodynamickým budičem umožňuje reprodukovat vlivy skutečného prostředí v laboratorních podmínkách.

to reproduce the effects of the real environment in laboratory conditions.

For structural testing, it is possible to use the classic industrial method of tests by random vibrations, individual sine oscillations, swept sine oscillations, shocks, etc. Some excitation systems also allow the excitation of the structure by replicating the measured signal from real conditions. Note that the control software provides the possibility of fully automatic testing, including automatic generation of test reports.

A suitable method in the time, frequency, or time-frequency domain can be used to evaluate the measured parameters [12].

3. CASE STUDY

For the purposes of the article, a laboratory experiment focused on the study of the propagation of vibration waves from the bottom of the rail through the sleeper into the gravel layer was set up. For this purpose, the Vossloh W14 rail fastening sample was selected. It should be noted that this is the most used flexible baseless fastenings in the Czech Republic. It can be found in all modernized sections of transit railway corridors and railways of national importance. A part of the sleeper with a fastening node and a UIC60 rail was used as a test specimen. The sleeper was placed in a gravel bed in the shape of a truncated cone, which was set up in the test area at the authors' workplace in the form of a test box with dimensions of 2.0 x 2.0 m. The test box was isolated from the base plate with a layer of cork. It should be noted that the basic parameters (thickness, flatness and degree of compaction of the track bed) were comparable to the parameters of a real railway line. The arrangement of the test can be seen in Figs. 1a and 1b [13, 14].

An excitation system composed of products from Tira and Vibration research was used to dynamically excite the sample (Fig. 1). A Tira type S 51144-M inertial exciter with a TIRA BAA 1000 amplifier and a VibrationVIEW VR 8500 controller was used. In the case of long-term testing or the use of limit values of the excitation signal, the entire system must be supplemented with air cooling (fan).

The operative controller was also equipped with software type VR681 (the module provides the possibility of realizing tests in the form of sinusoidal loading, as well as random signal and excitation pulse) and VR621 (it allows the excitation of the structure by user-defined time signals as well as by replication of real signals). The excitation system also included a 4507 B005 feedback accelerometer from Brüel & Kjær. To attach the exciter to the test structure, a special fixture (Fig. 1) was created consisting of a special spreader plate to which the exciter was attached. The spreader plate included two side rails attached to the rail. These were laser machined to fit the profile of the rail head.

Pro testování konstrukcí je možné použít klasickou průmyslovou metodu testů náhodnými vibracemi, jednotlivými sinusovými kmity, rozmítanými sinusovými kmity, rázy apod. Některé budící systémy umožňují také buzení konstrukce formou replikace naměřeného signálu z reálných podmínek. Podotkneme, že řídicí software poskytuje možnost plně automatického provádění zkoušek včetně automatického generování protokolů zkoušek.

K vyhodnocení naměřených parametrů může být použita vhodná metoda v časové, frekvenční, případně časově frekvenční oblasti [12].

3. PŘÍPADOVÁ STUDIE

Pro potřeby článku byl sestaven laboratorní experiment zaměřený na studium šíření vibračních vln od paty kolejnice přes pražec do šterkové vrstvy. K tomu účelu byl vybrán vzorek kolejnicového upevnění Vossloh W14. Podotkneme, že se jedná o nejběžněji používaná pružná bezpodkladnicová upevnění v České republice. Lze se s ním setkat ve všech modernizovaných úsecích tranzitních železničních koridorů a drah celostátního významu. Jako zkušební vzorek byla použita část pražce s uzlem upevnění a kolejnicí konstrukčního tvaru UIC60. Pražec byl uložen do šterkového lože tvaru komolého jehlanu, které bylo zřízeno ve zkušebním prostoru na pracovišti autorů formou zkušební vany o rozměrech 2,0 x 2,0 m. Zkušební vana byla od základové desky odizolována korkovou vrstvou. Podotkneme, že základní parametry (tloušťka, ulehlost a stupeň zhutnění kolejového lože) byly srovnatelné s parametry reálné železniční trati. Uspořádání zkoušky je patrné z obrázků Obr. 1a a Obr. 1b [13,14].

K dynamickému buzení vzorku byl použit budící systém sestavený z produktů firmy Tira a společnosti Vibration research (Obr. 1). Byl použit inerciální budič Tira typ S 51144-M se zesilovačem TIRA BAA 1000 a s řídicím kontrolérem VibrationVIEW VR 8500. V případě dlouhodobého zkoušení nebo použití limitních hodnot budícího signálu musí být celý systém dále doplněn vzduchovým chlazením (ventilátorem).

Řídicí kontrolér byl dále vybaven softwarem typu VR681 (modul poskytuje možnost realizace zkoušek formou sinusového zatížení, dále náhodným signálem a budícím impulsem) a VR621 (umožňuje buzení konstrukce uživatelsky nadefinovanými časovými signály i formou replikace reálných signálů). Součástí budícího systému byl současně také zpětnovazební akcelerometr piezoelektrický akcelerometr Brüel & Kjær 4507 B 005. K připevnění budiče na testovanou konstrukci byl vytvořen speciální přípravek (Obr. 1) tvořený speciální roznášecí deskou na kterou byl připevněn budič. Součástí roznášecí desky byly dvě postranice připevněné ke kolejnici. Tyto byly obrobena laserem tak, aby doléhaly k profilu hlavy kolejnice.

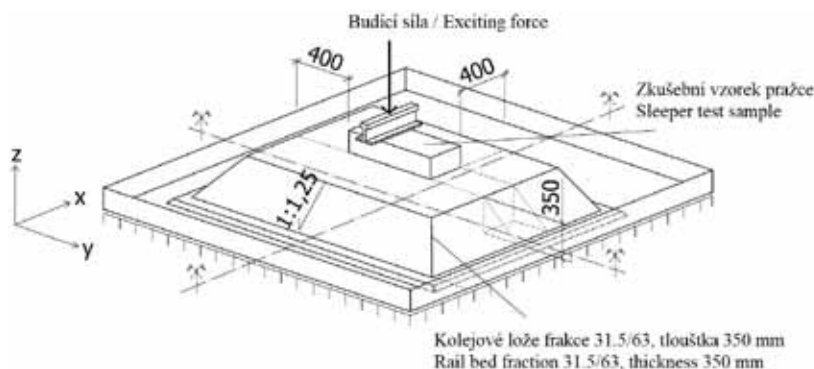


Fig. 1a: The test sample of railway superstructure in the laboratory - scheme

Obr. 1a: Zkušební vzorek železničního svršku v laboratoři - schéma



Fig. 1b: The view of the exam workplace

Obr. 1b: Pohled na pracoviště zkoušky

The response to the dynamic load was measured in the vertical direction by three accelerometers, the first one was placed at the foot of the rail, 30 mm from the rail stand, the second one at the head of the sleeper, 185 mm from the rail stand. In both cases these were single-axis transducers of type 4507 B 004 from Brüel Kjær. A special sensor - measuring stone [15] - developed at the workplace was used to measure the response in the track bed under the sleeper. This was inserted into the gravel bed 100 mm below the loading surface of the sleeper at the point of intersection with the vertical axis of the rail. The location of the sensors was the same for all types of excitation.

The measurement data were measured using a 9-channel modular analyser PULSE 3560D from Brüel & Kjær. This was automatically triggered via the digital output port from the operative controller during the tests. Sensors and measuring paths were calibrated before use. For each test, it is necessary to set the basic parameters of the experiment. These include measurement parameters (number of measurement feedback channels, sampling frequency, number of spectral lines, averaging method and its settings, etc.) and excitation signal generation parameters (number of spectral lines, filtering range, excitation limits, possibly other options - generation of protocols, transition to a different test type or mode, generation of an external trigger pulse, etc.). It should be noted that it is also very important to set the limits within which we consider the excitation signal to be correct, i.e. a good match with the desired signal. If the excitation signal goes outside the set limits, it is advisable to stop the test.

Odezva na dynamické zatížení byla měřena ve svislém směru třemi akcelerometry, první byl umístěn na patě kolejnice 30 mm od její stojiny, druhý na hlavě pražce 185 mm od stojiny kolejnice. V obou případech se jednalo o jednoosé snímače typu 4507 B 004 od společnosti Brüel Kjær. Pro měření odezvy v kolejovém loži pod pražcem byl použit na pracovišti vyvinutý speciální snímač - měřící kámen [15]. Tento byl vložen do šterkového lože 100 mm pod ložnou plochu pražce v místě průsečnice se svislou osou kolejnice. Umístění snímačů bylo stejné pro všechny typy buzení.

Data z měření byla měřena pomocí 9 kanálového moduluárního analyzátoru PULSE 3560D od společnosti Brüel&Kjær. Tento byl v rámci zkoušek automaticky spouštěn přes digitální výstupní port z řídicího kontroléru. Čidla a měřicí cesty byly před použitím kalibrovány. Pro každou zkoušku je potřeba nastavit základní parametry experimentu. K těm náleží parametry měření (počet měřících zpětnovazebních kanálů, vzorkovací frekvence, počet spektrálních čar, metoda průměrování a její nastavení atd.) a parametry generování budícího signálu (počet spektrálních čar, rozsah filtrace, limity buzení, případně další volby - generace protokolů, přechod do jiného typu nebo režimu zkoušky, generace externího spouštěcího impulsu atd.). Podotkneme, že velmi důležité je také nastavení mezí v rámci, kterých považujeme budící signál za korektní, tedy dobře se shodující s požadovaným signálem. Pokud se budící signál dostane mimo nastavené meze, je vhodné zkoušku zastavit.

The following three excitation methods were successively tested for experimental investigation of the dynamic properties of test specimens:

- Excitation by a swept sine signal with a set acceleration amplitude of $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. This is the maximum acceleration that allowed stable control of the vibration exciter. The frequency range of the measurement was chosen in the interval $0 \text{ Hz} \div 1000 \text{ Hz}$. Frequencies higher than 1 kHz are of particular interest from an acoustic point of view, which was not the subject of the laboratory tests. The rate of frequency change (frequency sweep) was chosen to be 10 Hz/s . The output was the averaged spectra of the frequency transfer function. The working window of the software of this test is shown in the image Fig. 2. The basic parameters of the test are displayed in the left part (requested acceleration value, controller-controlled value, current frequency, etc.). The middle part shows two basic graphs, the upper part shows the course of acceleration depending on the excitation frequency. It should be noted that up to a value of approx. 10 Hz , the controller gradually starts up to the desired level of oscillation acceleration. The lower graph shows the course of the electric excitation voltage on the frequency. This voltage changes depending on the intrinsic shapes of the excited system.
- Excitation by a series of shock pulses. The pulse amplitude was set to $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. It should be noted that the mentioned setting was made due to the limiting properties of the used inertial exciter. The number of excitation shocks within one test was set to 20. The output was the averaged spectra of the frequency transfer function. The working window of the software of this test is shown in the image Fig. 3. The basic parameters of the test are again displayed in the left part (number of pulses, desired acceleration value, value controlled by the regulator, etc.). The middle picture shows the course of the excitation pulse including the set limits. Let us note that there are two waveforms in the figure – the required impulse and the actually measured impulse.
- Excitation by a replicated signal with real frequency content. Oscillation acceleration signals (acceleration sensor under the rail head) obtained during measurements on the certified track of the test circuit in Velimi and test sections of the corridor tracks were used for the laboratory tests. As a part of signal replication, the amplitude of the excitation signal was adjusted for the needs of a specific vibration exciter (in this case, the maximum acceleration value was set to $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). The frequency range of the measurements was chosen in the interval $0 \text{ Hz} \div 1000 \text{ Hz}$. At the same time, the number of exposures of the replicated signal was set to 20 runs with a delay of approx. 2 seconds. The working window of the software of this test is shown in the image Fig. 4. From this figure, a good agreement can be seen in both graphs, that is, the desired (red color) and actual (blue color) spectral frequency density. Image Fig. 5 then shows the course of the used excitation signal and other settings. Time domain and frequency domain were used to evaluate the measured data. The Multi-taper method was proposed for the analysis in the frequency plane [16].

Pro experimentální vyšetřování dynamických vlastností zkušebních vzorků byly postupně vyzkoušeny následující tři metody buzení:

- Buzení rozmitaným sinusovým signálem s nastavenou amplitudou zrychlení $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Jedná se o maximální zrychlení, které umožňovalo stabilní řízení vibračního budiče. Frekvenční rozsah měření byl zvolen v intervalu $0 \text{ Hz} \div 1000 \text{ Hz}$. Frekvence vyšší než 1 kHz jsou zajímavé zejména z akustického hlediska, což nebylo předmětem laboratorních testů. Rychlost změny frekvence (frekvenční rozmitání) byla zvolena na 10 Hz/s . Výstupem byla průměrná spektra frekvenční přenosové funkce. Pracovní okno software této zkoušky ukazuje obrázek Obr. 2. V levé části jsou zobrazeny základní parametry zkoušky (požadovaná hodnota zrychlení, regulátorem řízená hodnota, aktuální frekvence apod.). V prostřední část ukazuje dva základní grafy, v horním je zobrazen průběh zrychlení v závislosti na budící frekvenci. Podotkneme, že až do hodnoty cca 10 Hz regulátor postupně nabíhá na požadovanou úroveň zrychlení kmitání. Dolní graf ukazuje průběh elektrického budícího napětí na frekvenci. Toto napětí se mění v závislosti na vlastních tvarech buzené soustavy.
- Buzení sérií rázových impulsů. Amplituda pulsu byla nastavena na hodnotu $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Podotkneme, že toto nastavení bylo provedeno z důvodů limitních vlastností použitého inerciálního budiče. Počet budících rázů v rámci jedné zkoušky byl nastaven na hodnotu 100. Výstupem byla průměrovaná spektra frekvenční přenosové funkce. Pracovní okno software této zkoušky ukazuje obrázek Obr. 3. V levé části jsou opět zobrazeny základní parametry zkoušky (počet pulsů, požadovaná hodnota zrychlení, regulátorem řízená hodnota apod.). Prostřední obrázek ukazuje průběh budícího pulsu včetně nastavených mezí. Podotkneme, že v obrázku jsou dva průběhy – požadovaného impulsu a skutečně naměřeného impulsu.
- Buzení replikovaným signálem s reálným frekvenčním obsahem. Pro laboratorní zkoušky byly použity signály zrychlení kmitání (snímač zrychlení pod hlavou kolejnice) získané v rámci měření na certifikované trati zkušebního okruhu ve Velimi a zkušebních úsecích koridorových tratí. V rámci replikace signálů byla provedena úprava amplitudy budícího signálu pro potřeby konkrétního inerciálního budiče (v případě použitého budiče se jednalo o maximální hodnotu zrychlení cca $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Frekvenční rozsah měření byl zvolen v intervalu $0 \text{ Hz} \div 1000 \text{ Hz}$. Současně byl nastaven počet působení replikovaného signálu na 20 běhů s cca 2 sekundovou prodlevou. Pracovní okno software této zkoušky ukazuje obrázek Obr. 4. Z tohoto obrázku je patrná dobrá shoda v obou grafech, tedy požadované (červená barva) a skutečné (modrá barva) spektrální frekvenční hustoty. Obrázek Obr. 5 pak ukazuje průběh použitého budícího signálu a další nastavení. K hodnocení naměřených dat byla použita analýza naměřených dat v časové a frekvenční oblasti. Pro analýzu ve frekvenční rovině byla navržena metoda Multi-taper [16].

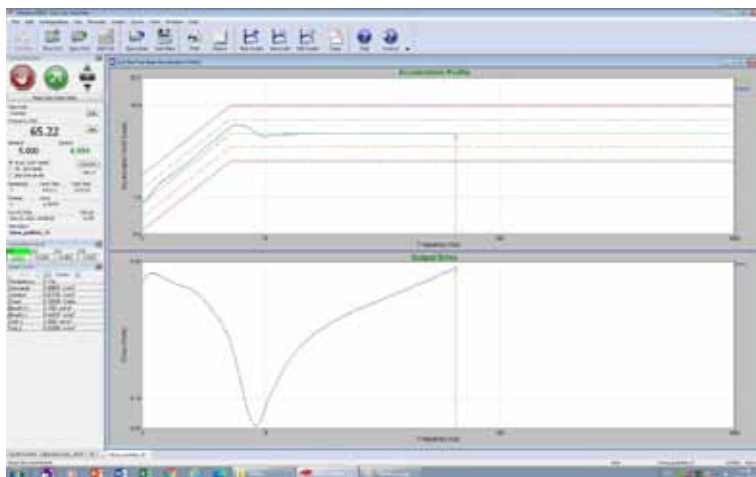


Fig. 2: The view of the working window and the setting of the sine wave excitation method

Obr. 2: Pohled na pracovní okno a nastavení metody buzení sinusovým signálem

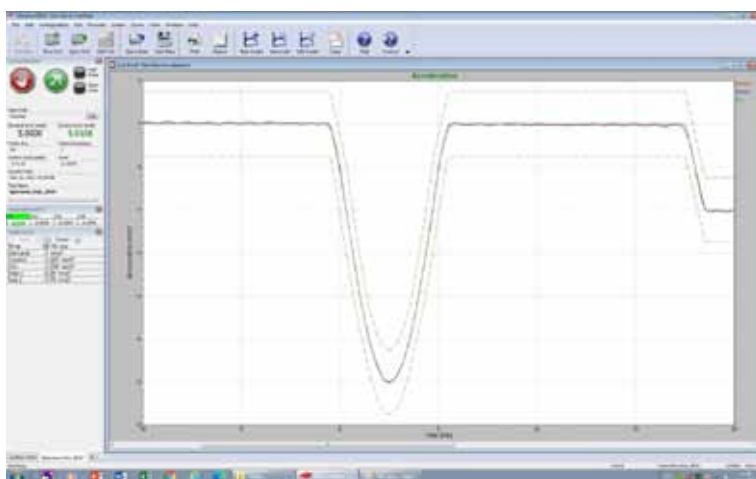


Fig. 3: The view of the working window and the setting of the pulse series excitation method

Obr. 3: Pohled na pracovní okno a nastavení metody buzení sérií pulsů

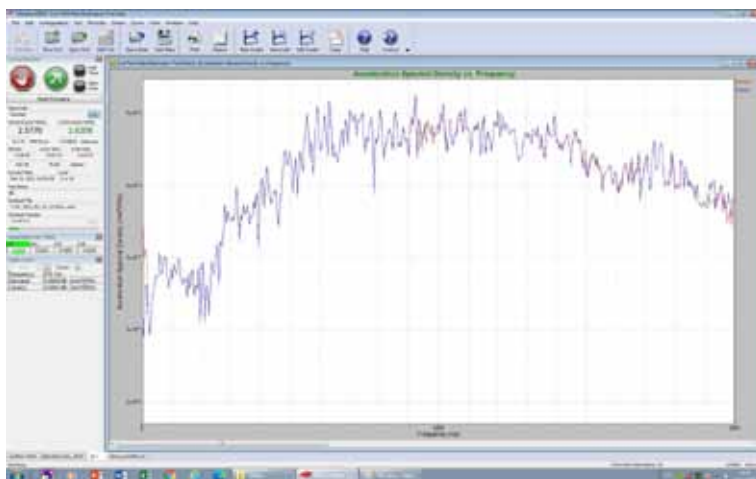


Fig. 4: The view of the working window and the setting of the excitation method by replicating the real signal

Obr. 4: Pohled na pracovní okno a nastavení metody buzení replikací reálného signálu

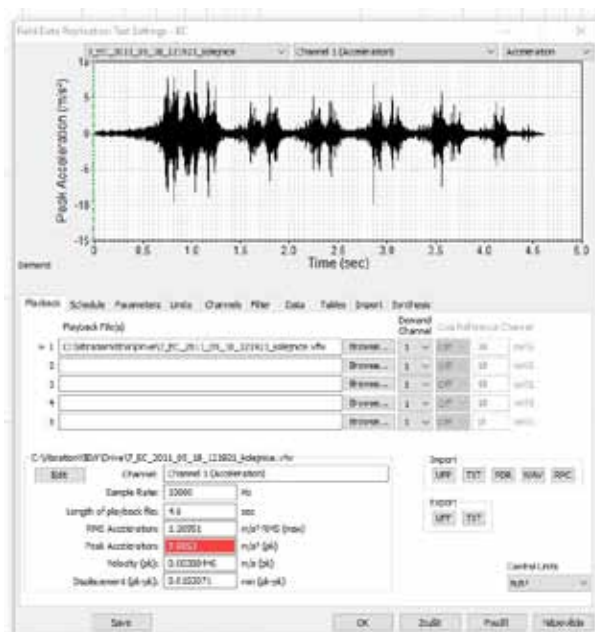


Fig. 5: The Setting the replicated signal

Obr. 5: Nastavení replikovaného signálu

4. THE EVALUATION OF MEASUREMENTS

4. HODNOCENÍ EXPERIMENTU



Fig. 6: Frequency transfer functions, excitation of the sample with a series of pulses

Obr. 6: Frekvenční přenosové funkce, buzení vzorku sérií pulsů

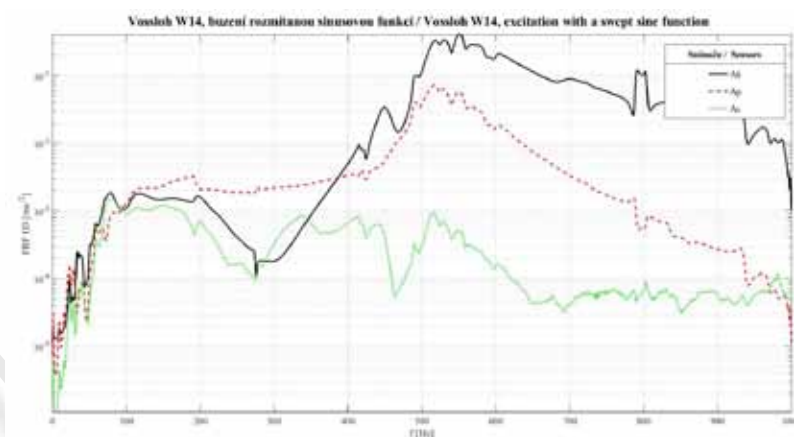


Fig. 7: Frequency transfer functions, sample excitation with a swept sinusoidal function

Obr. 7: Frekvenční přenosové funkce, buzení vzorku rozmlitanou sinusovou funkcí

Fig. 6 presents a graph of frequency transfer functions (rail Ak, sleeper Ap, rail bed As) obtained when a sample of rail fastening was excited by an inertial exciter in the form of a series of pulses. Figure No. 7 contains the frequency transfer functions (with the same designation of the sensors as in the previous picture) obtained by the excitation method with a swept sine function in the range of 10 Hz to 1000 Hz. The analysis also included subtraction of significant frequency components and their proportional damping. The individual waveforms of the frequency transfer functions correspond to the results presented in the literature [13, 14]. So, it is clear that it is possible to use both excitation methods in the analysis of fasteners without problems. In general, it is possible to say that the method of excitation with a swept sinusoidal function is more advantageous in the analysis of strongly non-linear structures and samples. The method can be used to search for key resonances and control the excitation so that the system works under normal conditions at selected resonance frequencies, or investigation of resonances based on increased signal amplification, investigation of resonances based on a change in the signal phase. For the analysis of fastening, which represents a multi-layered structure of metal, rubber, concrete, its use is more advantageous. The main disadvantage compared to others presented is the longer time of the test implementation.

The next part of the contribution is focused on the measurement of the response under dynamic loading in the form of replication of a real signal with a real frequency content. The signal for replication was obtained from the measurement during the passage of the EC train set on a straight section of the railway track with the Vossloh W14 fastening (Obr. 5). The signal from the rail, which was adjusted for the needs of the used exciter (signal amplitude reduction for the given exciter type), was inserted into the excitation recipe in the software application of the VibrationVIEW VR 8500 control system.

Image Fig. 8 shows the real response measured during the passage of an EC train set on a straight section of railway track with Vossloh W14 fastening. It consists of two types of charts. On the left side of the figure there are two-time courses of vibration acceleration measured on the rail head and sleeper near the rail fastening, on the right side the corresponding amplitude spectra are shown.

The following image Fig. 9 shows the outputs from measurements in the laboratory in the form of an inertial exciter with signal replication with real frequency content. Compared to the previous figure, Fig. 9 also has a graph showing the time course and frequency spectrum in the gravel bed. It should be noted that on a real track it is not always possible to embed the acceleration sensor in the gravel bed under the sleeper. On the other hand, it is important from the point of view of dynamic behaviour to know how the given fastening dampens the vibration waves passing from the rail to the gravel bed. The presented laboratory test provides the possibility of monitoring and analysing the transmission of vibrations in structures relatively simply.

By comparing the graphs in Fig. 8 and 9, it can be seen that the frequency content from both the real measurement and the laboratory measurement is almost identical. Thus, it turns out that it is possible to use artificial excitation based on the replication of a signal with real frequency content to estimate the properties of fastening in the field. It should be noted that in a given application, it may be common to monitor the behaviour of fasteners during the development of under-rail

Na obr. 6 je prezentovaný graf frekvenčních přenosových funkcí (kolejnice Ak, pražec Ap, kolejové lože As) získaných při buzení vzorku kolejnicového upevnění inerciálním budičem formou série pulsů. Obrázek č. 7 obsahuje frekvenční přenosové funkce (se stejným označením snímačů jako v předchozím obrázku) získané metodou buzení rozmítanou sinusovou funkcí v rozsahu 10 Hz až 1 000 Hz. Součástí analýzy byl i odpočet významných frekvenčních složek a jejich poměrný útlum. Jednotlivé průběhy frekvenčních přenosových funkcí odpovídají výsledkům prezentovaným v literatuře [13, 14]. Tedy je zřejmé, že je možné bez problému použít obě metody buzení při analýze upevňovadel. Obecně je možné říci, že metoda buzení rozmítanou sinusovou funkcí je výhodnější při analýze silně nelineárních konstrukcí a vzorků. Pomocí této metody lze hledat klíčové rezonance a řídit buzení tak, aby systém pracoval za stanových podmínek na zvolených rezonančních frekvencích, případně zkoumání rezonancí na základě zvýšeného zesílení signálu, zkoumání rezonancí na základě změny fáze signálu. Pro analýzu upevnění, které představuje vícevrstvou strukturu kov, pryž, beton, je její použití výhodnější. Hlavní nevýhodou oproti jiným je delší čas realizace zkoušky.

Další část příspěvku je soustředěna na měření odezvy při dynamickém zatížení formou replikace skutečného signálu s reálným frekvenčním obsahem. Signál pro replikaci byl získán z měření při průjezdu vlakové soupravy EC po přímém úseku železniční tratě s upevněním Vossloh W14 (Obr. 5). Signál z kolejnice, který byl upraven pro potřeby použitého budiče (snížení amplitudy signálu pro daný typ budiče) byl vložen do předpisu buzení do softwarové aplikace řídicího systému VibrationVIEW VR 8500.

Obr. 8 ukazuje reálnou odezvu naměřenou při průjezdu vlakové soupravy EC po přímém úseku železniční tratě s upevněním Vossloh W14. Sestává ze dvou typů grafů. Na levé straně obrázku je časový průběh zrychlení kmitání naměřený na pražci v blízkosti kolejnicového upevnění, na pravé straně je zobrazeno odpovídající amplitudové spektrum.

Následující obrázek Obr. 9 zobrazuje výstupy z měření v laboratoři formou inerciálního budiče s replikací signálu s reálným frekvenčním obsahem. Oproti předchozímu obrázku je u obr. 9 navíc graf ukazující časový průběh a frekvenční spektrum ve šterkovém loži. Podotkněme, že v reálné trati není vždy možné zapustit snímač zrychlení do šterkového lože pod pražec. Na druhou stranu je důležité z hlediska dynamického chování vědět, jak dané upevnění tlumí vibrační vlny procházející od kolejnice do šterkového lože. Presentovaná laboratorní zkouška poskytuje možnost sledování a analýzu přenosu vibrací konstrukcí poměrně jednoduše.

Porovnáním grafů na obr. 8 a 9 lze zjistit, že frekvenční obsah jak z reálného měření, tak z laboratorního měření je téměř identický. Ukazuje se tedy, že pro odhad vlastností upevnění v terénu je možné použít umělé buzení založené na replikaci signálu s reálným frekvenčním obsahem. Podotkněme, že v dané aplikaci může být běžné sledování chování upevnění při vývoji podložek pod kolejnici se zahrnutím různých typů, materiálů, stárí apod. Rovněž lze takto testovat chování upev-

pads with the inclusion of different types, materials, ages, etc. It is also possible to test the behaviour of fasteners in the event of improper tightening of fasteners, operational defects, etc.

ňovadel při nevhodném dotažení upevnění, provozní vady apod.

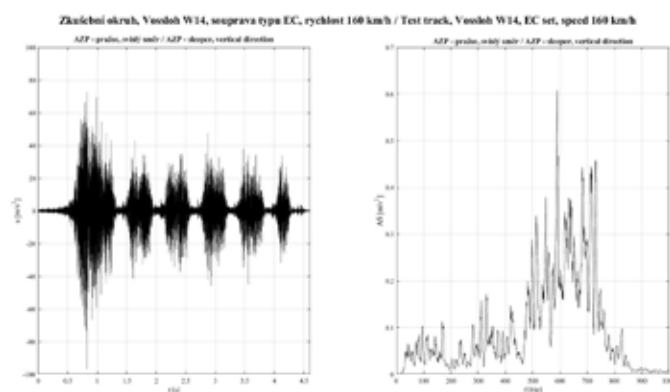


Fig. 8: The time course of the vibration acceleration on the sleeper and its frequency spectrum, the grid of the real track

Obr. 8: Časový průběh zrychlení kmitání na pražci a jeho frekvenční spektrum, kolejový rošt reálné trati

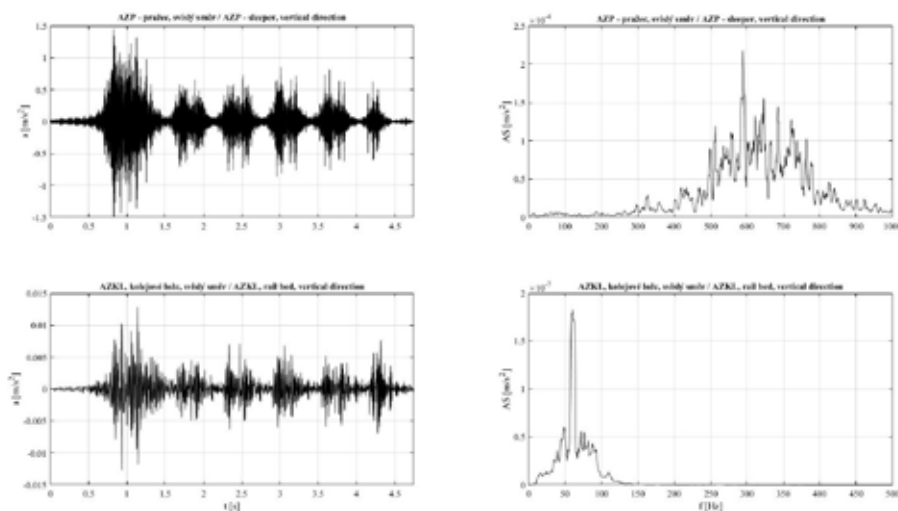


Fig. 9: Time and frequency characteristics on the sleeper and in the gravel bed of the test specimen, excitation by the replicated signal

Obr. 9: Časové a frekvenční charakteristiky na pražci a ve šterkovém loži zkušební vzorku, buzení replikovaným signálem

4. CONCLUSIONS

The aim of the presented contribution was to show the possibilities of using an inertial exciter in monitoring the dynamic properties of a structure/sample. The described methodology makes it possible to carry out dynamic tests that are very close to measurements in real conditions.

The fastest and easiest way to excite the dynamic response of the tested structure is to use an impact hammer. The frequency range that is effectively excited is determined by the stiffness of the contacting surfaces and the weight of the hammer head. A force impulse is induced by hitting the tip into the tested structure. In terms of frequency content, this pulse is essentially flat up to a certain frequency. This gives the frequency range of the hammer. It can be changed using different types of tips and possibly hammer heads. The stiffer the materials, the shorter the pulse duration and the higher the

4. ZÁVĚRY

Cílem prezentovaného příspěvku bylo ukázat možnosti použití inerciálního budiče při sledování dynamických vlastností konstrukce/vzorku. Popsaná metodika umožňuje realizovat dynamické zkoušky, které se velmi blíží měřením v reálných podmínkách.

Nejrychlejším a nejjednodušším způsobem, jak vybudit dynamickou odezvu testované struktury je použití rázového kladiva. Rozsah frekvencí, který je účinně vybuděn, je dán tuhostí dotýkajících se povrchů a hmotností hlavy kladiva. Úderem hrotu do testované struktury je vyvolán silový impuls. Z hlediska frekvenčního obsahu je tento impuls do určité frekvence v podstatě plochý. Tím je dán frekvenční rozsah kladiva. Ten je možné měnit použitím různých typů hrotů a příp. hlav kladiva. Čím jsou materiály tužší, tím kratší je délka trvání pulsu a tím vyšší je frekvenční rozsah. Mezi hmotností kladiva

frequency range. An indirect ratio then applies between the weight of the hammer and the frequency range. The advantages of this method are easy applicability in both laboratory and operating conditions and the speed given by the small scope of preparatory work. The disadvantage of hammer excitation lies in the large amplitude factor A_{max}/A_{ef} . For some structures, a high amplitude factor can cause a nonlinear response.

Another option is excitation by an electrodynamic (in this case inertial) exciter. Its main advantage is that the exciter is directly mounted on the structure under test via a fixture (connection plate or rod). At the same time, it allows the use of different excitation methods, including the application of excitation signals obtained from (real) field measurements characterised by real frequency content. This fact also applies to the simulation of harmful phenomena acting on the rail, etc. The fact that the tests can be carried out fully automatically, in the form of several tests in succession, is also not negligible.

The applied methodology has proven its suitability for use in the determination of dynamic properties of rail fastening in laboratory conditions. It is a very good complement to, or even a complete replacement for, impact excitation methods. Thanks to the excitation of the structure by a signal with a real frequency content, this methodology makes it possible to better predict the properties of a given rail fastening in a real track. The described measurement method can also be used very well in the development of new fastening systems and their parts, as well as for comparison of different types of rail fastenings, etc. At the same time, the methodology using the inertial exciter can be used in a wide range of other applications not only in technical fields.

Certainly, this methodology will find application wherever it is necessary to deal with the propagation of vibration waves and shocks through a multi-layer structure and where it is not easy to carry out in-situ measurements, but testing needs to be carried out mainly on test samples. Let us emphasize that the presented methodology finds its application in the calibration of mathematical models, etc.

Based on the analyses performed, it can be concluded that the methodology used provides good results and conclusions. The measured and calculated quantities are characterized by sufficient accuracy and indicative. The quality of the processing of the measured data was very well supported by the time and frequency signal analysis tools used.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper was supported by the projects FAST-S-21-7401, "Evaluation of dynamic effects acting on a structure by advanced mathematical analysis methods" and FAST-S-22-8011, "Diagnostic system for automatic identification of selected harmful phenomena in the railway".

a frekvenčním rozsahem pak platí nepřímá úměra. Výhodami této metody jsou snadná použitelnost jak v laboratorních, tak v provozních podmínkách a rychlost daná malým rozsahem přípravných prací. Nevýhoda buzení rázovým kladívkem spočívá ve velkém činiteli amplitudy A_{max}/A_{ef} . V případě některých struktur může vysoký činitel amplitudy způsobit nelineární odezvu.

Další možností je buzení elektrodynamickým (v daném případě inerciálním) budičem. Jeho hlavní výhodou je, že se budič přímo prostřednictvím přípravku (připojovací desky nebo tyče) montuje na zkoušenou strukturu. Zároveň umožňuje použít různé způsoby buzení včetně aplikace budících signálů získaných v rámci (reálných) měření v terénu, jež jsou charakterizovány reálným frekvenčním obsahem. Tato skutečnost platí i pro simulaci škodlivých jevů působících na kolejnici apod. Nezanedbatelná je také skutečnost, že zkušební testy mohou být prováděny zcela automaticky, ve formě více zkoušek za sebou.

Použitá metodika prokázala svou vhodnost použití v rámci zjišťování dynamických vlastností upevnění kolejnic v laboratorních podmínkách. Umožňuje velmi dobře doplnit, případně zcela nahradit metody buzení konstrukce rázem. Díky buzení konstrukce signálem s reálným frekvenčním obsahem umožňuje tato metodika lépe predikovat vlastnosti daného upevnění kolejnic v reálné koleji. Popsaná metoda měření může být také velmi dobře použita při vývoji nových upevňovacích systémů a jejich částí, dále pro srovnání různých typů kolejnicových upevnění v různých podmínkách apod. Současně metodika s využitím inerciálního budiče může být použita v širokém spektru dalších aplikací nejen technických oborů.

Určitě tato metodika najde uplatnění všude tam, kde je nutné se zabývat šířením vibračních vln a rázů přes vícevrstvou skladbu konstrukce a kde není snadné zrealizovat měření in-situ, ale testování je potřeba realizovat zejména na zkušebních vzorcích. Podotkneme, že presentovaná metodika najde své uplatnění při kalibraci matematických modelů atd.

Na základě provedených analýz je možné konstatovat, že použitá metodika poskytuje dobré výsledky a závěry. Měřené a vypočítané veličiny se vyznačují dostatečnou přesností a vypovídající schopností. Ke kvalitnímu zpracování naměřených dat velmi dobře přispěly použité prostředky časové a frekvenční signálové analýzy.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek byl podpořen projekty FAST-S-21-7401, „Hodnocení dynamických účinků působících na konstrukci pokročilými metodami matematické analýzy“ a FAST-S-22-8011, „Diagnostic system for automatic identification of selected harmful phenomena in the railway“.

REFERENCES

- [1.] Česká technická norma ČSN 73 6360-2. Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba, 2009.
- [2.] Příloha rozhodnutí komise 2011/275/EU. Technická specifikace pro interoperabilitu, subsystém Infrastruktura transevropského konvenčního železničního systému, 2011.
- [3.] České technické normy řady ČSN EN 13481-1 až 5 a ČSN EN 13481-7. Železniční aplikace – Kolej – Požadavky na vlastnosti systémů upevnění, 2013.
- [4.] Česká technická norma ČSN EN 13481-8. Železniční aplikace – Kolej – Požadavky na vlastnosti systémů upevnění – Část 8: Systémy upevnění kolejí pro vysoká nápravová zatížení, 2013.
- [5.] Česká technická norma ČSN EN 13146-9. Železniční aplikace – Trať – Metody zkoušení systémů upevnění – Část 9: Stanovení tuhosti, 2012.
- [6.] BILŠOVÁ, A. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Modální zkoušky. VŠB – Technická univerzita Ostrava. 2012.
- [7.] Česká technická norma ČSN EN 13146-8. Železniční aplikace – Trať – Metody zkoušení systémů upevnění – Část 8: Provozní ověřování, 2013.
- [8.] ESVELD C.: Modern Railway Track, Second edition. MRT Production, Delft. 2001. 654 stran, ISBN 90-800324-3-3.
- [9.] Sun L., Yan Z., Xiao J.: Experimental analysis of the modal characteristics of rail fastening clips, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol 234, Issue 2, 2020, ISSN 0954-4097.
- [10.] MAN A. P. DE: Dynatrack, A Survey of Dynamic Railway Track Properties and their Quality. Disertační práce. TU Delft. DUP-Science. Delft, Prosinec 2002. ISBN 9 406 2355-9.
- [11.] SMUTNY, J., PAZDERA, L.: The Experimental Analysis of Dynamic Processes Related to Railway Transport, Monography, ISBN 978-80-7204-827-4, Academic publisher CERM: Brno, 2012.
- [12.] SMUTNY, J., PAZDERA, L.: New Techniques in Analysis of Dynamic Parameters Rail Fastening, INSIGHT, ISSN 1354-2575, 2004.
- [13.] SMUTNÝ J., TOMANDL V., VUKUŠIČ I., PAZDERA L.: Vybrané metody modální analýzy uplatňované na železniční Vybrané metody modální analýzy uplatňované na železniční Vybrané metody modální analýzy uplatňované na železniční infrastrukturu. Vědeckotechnický sborník Českých drah, 2013, roč. 10, č. 35, s. 25-45. ISSN: 1214- 9047.
- [14.] SMUTNY J., PAZDERA L., TOMANDL V.: Assessment of dynamic parameters of rail fastenings, Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, ISSN 1335-4205, 3/2016.
- [15.] SMUTNY J., NOHAL V.: Vibration analysis in the gravel ballast by measuring stone method, Akustika, 2016, roč. 25, č. 1, s. 22-28, ISSN 1801-9064.
- [16.] SMUTNY J., JANOŠTIK D., NOHAL V.: Application of Unconventional methods for frequency analysis in acoustics. Akustika, 2020, roč. 36, č. 2, s. 26-33, ISSN 1801-9064..



Jaroslav Smutný 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.



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



Dušan Janoščík was born on the 26nd august 1972 in Hranice na Moravě, Czech Republic. He graduated from his master degrees at the Faculty of Civil Engineering, Brno University of technology in 1998 and specialization was railway construction. For a long time he worked in the field of automated data processing and computer technology. He was also a computer network administrator. Currently he is studying doctoral program Civil engineering. Within his studies he focuses on the problems of railway structures, geographic information systems, methods of data analysis by selected methods of artificial intelligence and wireless data transmission.



Radovan Rímský is a graduate of the mechanical engineering faculty of the Technical University in Košice and the Slovak Medical University in Bratislava. He currently works in the private sector in the field of noise and vibration measurement, environmental monitoring. At the same time, he deals with the issue of reducing the level of noise and vibrations from transport and industrial sources. At the same time, he is a doctoral student at the Faculty of Civil Engineering BUT in Brno. Here he deals with the issue of traffic acoustics.



Petr Iunishchenko is a graduate of Donsk State Technical University, Faculty of Civil Engineering, specialization in Construction of unique buildings and structures, construction of highways, airports and special objects. He currently works at OHLA ŽS, a.s. Brno as a BIM coordinator. As part of his profession, he mainly deals with the issue of compiling and updating the BIM implementation plan for transport constructions. He is also an expert in database systems and processes for storing various types of measured data. At the same time, he is a doctoral student at the Faculty of Civil Engineering BUT in Brno. As part of his doctoral studies, he deals with the issue of BIM for linear constructions.