

THE ANALYSIS OF DYNAMIC EFFECTS FROM THE TRAIN SET AT DIFFERENT DRIVING SPEEDS

ANALÝZA DYNAMICKÝCH ÚČINKŮ OD VLAKOVÉ SOUPRAVY PŘI RŮZNÝCH RYCHLOSTECH POJEZDU

SMUTNÝ J., PAZDERA L., JANOŠTÍK D., ŠTUKAVEC M.
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veveří 95, Brno

Abstract: The article is devoted to the problem of measuring selected dynamic parameters at a driving speed of 160 km/h to 200 km/h. The article contains a theoretical introduction to the issue, further describes the real measurement of dynamic-acoustic parameters with subsequent evaluation and comparison of measured data and parameters. The conclusion includes a presentation of the obtained results, recommendations for other similar measurements and, in particular, recommendations for railway infrastructure managers.

Keywords: Dynamic and vibration measurements, higher travel speed, analysis in the time and frequency plane

The introduction to the issue

The basic requirement placed on the individual parts of the rail track is their functional reliability and the related safety of railway traffic. The constant pressure to increase the transport speeds and the operating load of the tracks causes a massive development of new technologies in rail transport [1]. In connection with the modernization of railway corridors, this qualitative shift also applies to Czech railway lines. It is currently being considered that on some sections it will be possible to increase the maximum operating speed from 160 km/h to 200 km/h. And it is precisely the speed of train sets in railway transport that plays a key role in influencing the dynamic effects on the track and on the moving train sets.

This fact can have a significant impact on safety, passenger comfort, but also on track maintenance. The dynamic behaviour of train-sets changes with increasing running speed, which manifests itself in various aspects such

Abstrakt: Příspěvek je věnován problematice měření vybraných dynamických parametrů při rychlosti pojezdu od 160 km/h do 200 km/hod. Příspěvek obsahuje teoretický úvod do problematiky, dále popisuje reálné měření dynamicko-akustických parametrů s následným vyhodnocením a srovnáním naměřených dat a parametrů. Závěr zahrnuje prezentaci získaných výsledků, doporučení pro další obdobná měření a zejména doporučení pro správce drážní infrastruktury.

Klíčová slova: Dynamická a vibrační měření, vyšší rychlost pojezdu, analýza v časové a frekvenční rovině.

Úvod do problematiky

Základním požadavkem kladeným na jednotlivé části kolejové jízdní dráhy je jejich funkční spolehlivost a s ní související bezpečnost železničního provozu. Stálý tlak na zvyšování přepravních rychlostí a provozního zatížení tratí vyvolává u kolejové dopravy mohutný rozvoj nových technologií [1]. V souvislosti s modernizací železničních koridorů se tento kvalitativní posun týká také českých železničních tratí. V současné době se uvažuje o tom, že na některých úsecích bude možné zvýšit maximální provozní rychlost ze 160 km/h na 200 km/hod. A právě rychlost pojezdu vlakových souprav v železniční dopravě hraje klíčovou roli při ovlivňování dynamických účinků na kolejovou jízdní dráhu, tak i na jedoucí vlakové soupravy.

Tato skutečnost může mít významný dopad na bezpečnost, pohodlí cestujících, ale také na údržbu tratí. Dynamické chování vlakových souprav se mění s rostoucí rychlostí pojezdu,

as vibration, dynamic forces, track wear and wheels, vehicle stability and aerodynamic resistance [2].

At higher speeds, there are more pronounced vibrations spreading from the railway sets to the railway track and the surrounding area. Vibrations can be increased by rail irregularities (such as slip waves, rail head waviness or other rail defects), wheel-to-rail interaction (e.g. flat wheels) or the dynamic behaviour of the vehicle itself (e.g. resonance). Increased vibrations can cause passenger discomfort, increased wear and tear on train set components as well as railway tracks, which increases the risk of mechanical failures [3].

As the speed increases, the dynamic forces acting between the wheels and the rails increase. These forces include vertical forces (e.g. wheel bounce), lateral forces (e.g. cornering) and longitudinal forces (e.g. acceleration or braking). High dynamic forces can cause rail damage, excessive wheel wear and thus increase the risk of derailment.

At higher speeds, the rate of rail wear increases due to greater dynamic forces and frequency of contact between wheels and rails. Specific forms of wear include the formation of microscopic cracks, corrugation of rails and smoothing of profiles. Increased speed can also lead to higher wheel wear, especially if defects such as flat wheels are present. Driving fast increases friction and mechanical stress on the surface of the wheels, which can shorten their life.

All these events significantly affect the stability of railway trainsets. Or better said, as the speed increases, so do the demands on the stability of railway vehicles. Vehicles may face problems such as wheel bounce (in vertical vibrations), excessive lateral forces (in curves) or the risk of derailment. Vehicle stability depends on track quality, weight distribution, and wheel profile and chassis geometry [4, 5, and 6].

At higher speeds, aerodynamic resistance, which is the force acting against the movement of the train, plays an increasingly important role. At the same time, aerodynamic drag also increases exponentially with speed, meaning that at twice the speed, the drag can be much higher than double. Increased drag

což se projevuje v různých aspektech, jako jsou vibrace, dynamické síly, opotřebení kolejí a kol, stabilita vozidel a aerodynamický odpor [2].

Při vyšších rychlostech dochází k výraznějším vibracím šířícím se od železničních souprav do železniční tratě a okolí. Vibrace mohou být zvýšeny nepravidelnostmi na kolejnici (jako jsou skluzové vlny, vlnovitost na hlavě kolejnic nebo další kolejnicové defekty), interakcí kola s kolejnicí (např. plochá kola) nebo dynamickým chováním samotného vozidla (např. rezonance). Zvýšené vibrace mohou způsobit nepohodlí cestujících, zvýšené opotřebení komponentů vlakových souprav i železniční tratě, což zvyšuje riziko mechanických selhání [3].

S rostoucí rychlostí se zvyšují dynamické síly působící mezi koly a kolejnicemi. Tyto síly zahrnují vertikální síly (např. odskakování kola), laterální síly (např. při průjezdu obloukem) a podélné síly (např. zrychlení nebo brzdění). Vysoké dynamické síly mohou způsobit poškození kolejnic, nadměrné opotřebení kol a zvyšovat tak riziko vykolejení.

Při vyšších rychlostech se zvyšuje míra opotřebení kolejnic kvůli větším dynamickým silám a frekvenci kontaktu mezi koly a kolejnicemi. Specifické formy opotřebení zahrnují tvorbu mikroskopických trhlin, zvlnění kolejnic a vyhlazování profilů. Zvýšená rychlost může také vést k vyššímu opotřebení kol, zejména pokud jsou přítomny defekty jako plochá kola. Rychlá jízda zesiluje tření a mechanické napětí na povrchu kol, což může zkrátit jejich životnost.

Všechny tyto děje pak významně ovlivňují stabilitu železničních vlakových souprav. Nebo lépe řečeno, s rostoucí rychlostí se zvyšují nároky na stabilitu železničních vozidel. Vozidla mohou čelit problémům, jako je odskakování kol (při vertikálních vibracích), nadměrné boční síly (v obloucích) nebo riziko vykolejení. Stabilita vozidla závisí na kvalitě trati, rozložení hmotnosti, profilu kol a geometrie podvozku [4, 5, 6].

Při vyšších rychlostech hraje stále větší roli aerodynamický odpor, což je síla působící proti pohybu vlaku. Současně se také aerodynamický odpor zvyšuje exponenciálně s rychlostí, což znamená, že při dvojnásobné

requires more energy to drive the train, which can affect efficiency and operating costs [7, 8].

And another non-negligible fact is that at higher train speeds, the risk of accidents caused by obstacles on the track or technical defects of the vehicles or the rail track increases [9, 10].

The description of the measurement campaign

On the 23–26 In October 2023, an extensive measurement campaign took place in selected sections of IV. railway corridor. Test runs took place on the newly built track sections Soběslav – Doubí u Tábora and Sudoměřice u Tábora – Votice. At speeds in the range from 160 km/h to 200 km/h (by 10 km/h) the behaviour of bridge structures was measured and analysed, pressure changes inside and outside the test set when passing through the tunnel in order to monitor the effect on passenger comfort, aerodynamic changes on the platform with regard to ensuring safety, the effect on the ground body of the runway and its surroundings, as well as the dependence of the noise load at increasing speed. The tests were planned to have minimal impact on regular train services. In addition to the Railway Administration and the Research Institute of Rolling Stock, the two universities of Czech Technical University Prague and Brno University of Technology in Brno also took part in the tests. The goal was to create innovative approaches and technical conditions for increasing the speed on conventional lines of the Railway Administration, but also in preparation for the construction of high-speed lines in the Czech Republic.

The author's collective participated in this campaign by measuring and analyzing dynamic phenomena on the rail grid and on the platform. At the same time, measurements and analysis of the aerodynamic effects on people and things on the platform were carried out. The actual measurement was carried out at the Myslkovice stop with the measurement location at the station 67.860 km viz. Fig. 1. An L-type platform with a cantilever plate bent according to VL Ž8 4.3 is built here. The stop is in a slight notch. The length of the platform is 90 m. It should be noted that for the purposes of measurement, a train set consisting of a 383 Vectron locomotive from Siemens and two WRmz 817 and Bmz cars was used.

rychlosti může být odpor mnohem vyšší než dvojnásobný. Zvýšený aerodynamický odpor vyžaduje více energie pro pohon vlaku, což může ovlivnit účinnost a náklady na provoz [7, 8].

A dalším nezanedbatelným faktem je, že při vyšších rychlostech pojezdu vlakových souprav se zvyšuje riziko nehod způsobených překážkami na trati, případně technickými závadami vozidel nebo kolejové jízdná dráhy [9, 10].

Popis měřící kampaně

Ve dnech 23.–26. října 2023 probíhala rozsáhlá měřící kampaň na vybraných úsecích IV. železničního koridoru. Testovací jízdy se uskutečnily na nově vybudovaných traťových úsecích Soběslav – Doubí u Tábora a Sudoměřice u Tábora – Votice. Při rychlostech v rozsahu od 160 km/h do 200 km/h (po 10 km/h) bylo měřeno a analyzováno chování mostních konstrukcí, tlakové změny uvnitř a vně zkušební soupravy při průjezdu tunelem z důvodu sledování vlivu na komfort cestujících, aerodynamické změny na nástupišti s ohledem na zajištění bezpečnosti, působení na zemní těleso dráhy a jeho okolí i závislost hlukového zatížení při stoupající rychlosti. Zkoušky byly naplánovány tak, aby měly minimální vliv na jízdy pravidelných vlaků. Na zkouškách se podílely kromě správy železnic a Výzkumného ústavu kolejových vozidel také dvě vysoké školy ČVUT Praha a VUT v Brně. Cílem bylo vytvoření inovativních přístupů a technických podmínek pro zvyšování rychlosti na konvenčních tratích Správy železnic, ale také při přípravě stavby vysokorychlostních tratí v České republice.

Autorský kolektiv se na této kampani podílel měřením a analýzou dynamických jevů na kolejovém roštu a na nástupišti. Současně bylo provedeno měření a analýza aerodynamických účinků na osoby a věci na nástupišti. Vlastní měření se realizovalo v zastávce Myslkovice s místem měření ve staničení 67,860 km viz. obr. 1. Zde je vybudováno nástupiště typu L s konzolovou deskou lomenou dle VL Ž8 4.3. Zastávka je v mírném zářezu. Délka nástupiště je 90 m. Podotkněme, že pro potřeby měření byla použita vlaková souprava sestávající z lokomotivy řady 383 Vectron od firmy Siemens a dvou vozů WRmz 817 a Bmz.

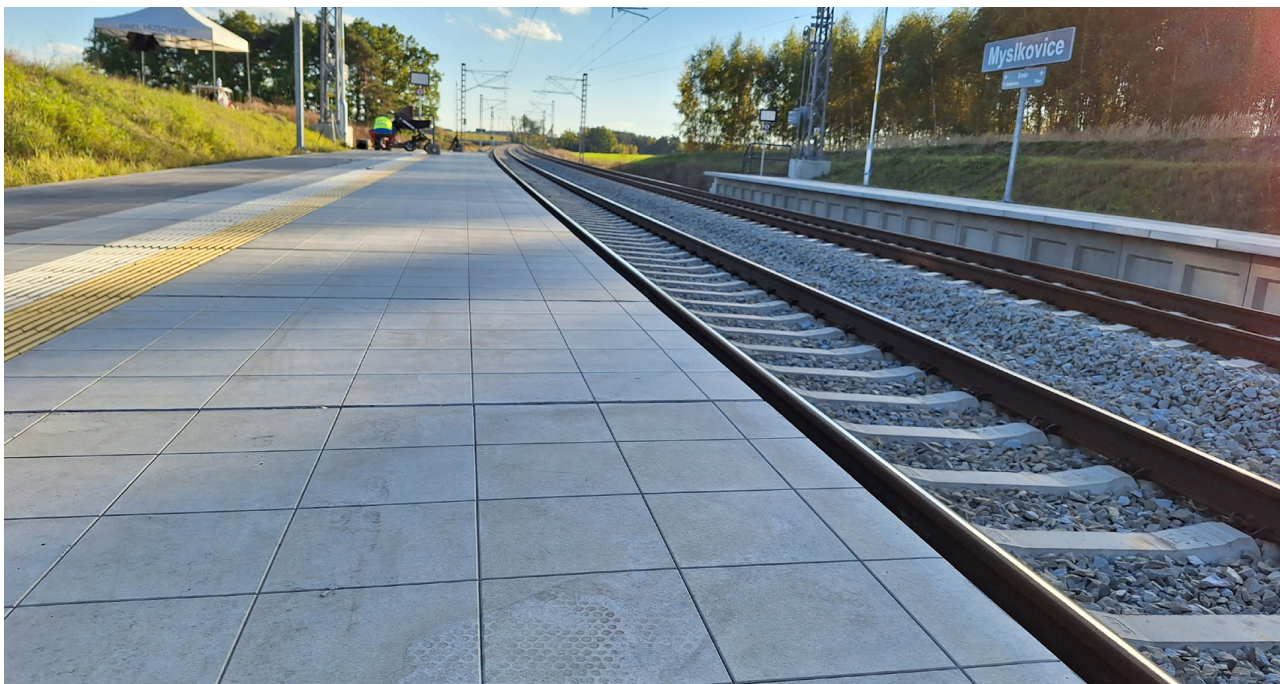


Fig. 1 View of the Myslkovice stop platform

Obr. 1 Pohled na nástupiště zastávky Myslkovice

The description of the measuring device

The 64-channel measuring unit Sirius from Dewesoft was used to record the signals. The measuring station was also equipped with a camping table and a chair. Its location was realized at a safe distance from the edge of the platform. At the same time, the movement of passengers on the platforms was also taken into account. The pressure sensors were placed outside the passage section in the safety belt of the platform. The position of pressure sensors P1 to P4 type M370 from Microtech GEFELL was chosen according to the ČSN EN 14067-4+A1 standard. The sensors were placed at a distance of 2.50 m from the track axis. A total of 4 sensors placed at heights of 1.50 m, 1.80 m, 2.10 m and 2.40 m above the top of the rail head were used. The sensors were mounted in a tripod, which was anchored against movement to a Tisher AZB 10-19 block. At the same time, the flow was measured using an ultrasonic anemometer.

Two three-axis vibration sensors of type 4524B001 were placed on the rail grid in positions on the rail (A1) and the sleeper near the rail attachment (A2). Another two three-axis sensors were placed on the platform of the stop. The first one was placed at a distance of 3 m from the track axis on the cantilevered plate of the given platform (A3). The second accelerometer was placed again at a distance of 3 m from

Popis měřícího zařízení

Pro záznam signálů byla použita 64 kanálová měřicí ústředna Sirius od společnosti Dewesoft. Měřicí stanoviště bylo dále vybaveno kempingovým stolem a židlí. Jeho umístění bylo realizováno v bezpečné vzdálenosti od hrany nástupiště. Současně byl zohledněn i pohyb cestujících na nástupištích. Tlakové snímače byly umístěny mimo průjezdný průřez v bezpečnostním pásu nástupiště. Poloha tlakových sensorů P1 až P4 typu M370 od společnosti Microtech GEFELL byla zvolena dle normy ČSN EN 14067-4+A1. Snímače byly umístěny ve vzdálenosti 2,50 m od osy koleje. Celkem byly použity 4 snímače umístěné ve výškách 1,50 m, 1,80 m, 2,10 m a 2,40 m nad temenem hlavy kolejnice. Snímače byly uchyteny ve stativu a ten byl ukotven proti pohybu k tvárnici Tisher AZB 10-19. Současně bylo provedeno měření proudění pomocí ultrazvukového anemometru.

Dva tříosé snímače vibrací typu 4524B001 byly umístěny na kolejovém roštu v pozicích na kolejnici (A1) a pražci v blízkosti kolejnicového upevnění (A2). Další dva tříosé snímače byly umístěny na nástupišti zastávky. První byl umístěn ve vzdálenosti 3 m od osy koleje na konzolové desce lomené daného nástupiště (A3) Druhý akcelerometr byl umístěn opět ve vzdálenosti 3 m od osy koleje na železo-

the track axis on a reinforced concrete wall (A4). The location of the accelerometers is based on the BUT internal methodology [11]. Both accelerometers were from Bruel&Kjaer and were type 4506B003. All accelerometers used were anchored in pads glued to the measured surface.

It should be noted that the passage of the test set was monitored by an Olympus high-speed camera. Its launch was synchronized with the launch of the measuring unit. For the purpose of studying the air flow, smokestacks located on the edge of the safety belt 3.0 m from the track axis were used. Meteorological conditions (air temperature, air pressure, air humidity, wind speed, wind direction) were recorded as part of the measurement campaign. The acquired data were recorded in accordance with the ISO 8756 standard.

Note that Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 document both the measuring station and the position of the individual sensors. In the picture Fig. 2 is a view of the measuring workplace. Image Fig. 3 then shows the location of the vibration sensors on the rail top, picture Fig. 4 document the position of the vibration sensors on the platform. Note that the direction of travel of the train is indicated by the symbol X, the transverse direction by the symbol Y and the direction perpendicular to the ground by Z.

betonové zídce (A4). Umístění akcelerometrů vychází z interní metodiky VUT [11]. Oba akcelerometry byly od společnosti Bruel&Kjaer a byly typu 4506B003. Všechny použité akcelerometry byly ukotveny v podložkách nalepených na měřený povrch.

Podotkněme, že průjezd zkušební soupravy byl monitorován rychloběžnou kamerou Olympus. Její spuštění bylo synchronizováno se spuštěním měřicí ústředny. Pro účely studia proudění vzduchu byly využity dýmovnice umístěných na hraně bezpečnostního pásu 3,0 m od osy koleje. V rámci měřicí kampaně byly zaznamenávány meteorologické podmínky (teplota vzduchu, tlak vzduchu, vzdušná vlhkost, rychlost větru, směr větru). Pořízené údaje byly zaznamenávány v souladu s normou ISO 8756.

Podotkněme, že Obr. 2, Obr. 3, Obr. 4 dokumentují jak měřicí stanoviště, tak polohu jednotlivých sensorů. Na obrázku Obr. 2 je pohled na měřicí pracoviště. Obrázek Obr. 3 pak ukazuje umístění snímačů vibrací na kolejovém svršku, obrázek Obr. 4 dokumentují polohu snímačů vibrací na nástupišti. Podotkněme, že směr pojezdu vlaku je označen symbolem X, příčný směr symbolem Y a směr kolmý k zemi Z.



Fig. 2 General view of the measuring workplace and pressure sensors

Obr. 2 Celkový pohled na měřicí pracoviště i snímače tlaku



Fig. 3 The location of vibration acceleration sensors on the rail grid

Obr. 3 Umístění snímačů zrychlení kmitání na kolejovém roštu



Fig. 4 The placement of vibration acceleration sensors on the platform

Obr. 4 Umístění snímačů zrychlení kmitání na nástupišti

The selection of methods and quantities to evaluate measurements

The analysis of the measured data obtained as part of the measurement campaign was carried out in accordance with the terms of reference and the measurement objectives using the following methods and parameters [12]:

Výběr metod a veličin k hodnocení měření

Analýza naměřených dat získaných v rámci měřicí kampaně byla provedena v souladu s podmínkami zadání i cíli měření následujícími metodami a parametry [12]:

1. Time display of vibration acceleration and pressure wave, including calculation of minimum and maximum values
2. The level of the RMS value of the oscillation acceleration
3. Frequency analysis of the measured data in the form of an amplitude spectrum (for the transition from the time domain to the frequency domain, the fast Fourier transformation algorithm was used)

The passage of each train set was also captured by an attached high-speed camera for easier definition of the time interval for calculating the RMS acceleration level. Its location was in the axis of the accelerometers and it was systemically connected to the measuring hardware and software. It should be noted that at the same time, the motion behaviour of the baby carriage and other objects located on the platform of the stop near the safety lane was analysed from the recording from the high-speed camera. At the same time, the course of the pressure waves from the tested set was monitored from the records obtained when the smokestacks was lit.

Next, the mathematical definitions of the individual parameters used to compare both constructions are briefly summarized. The effective value of the acceleration is defined by the relation

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a^2(t) \cdot dt} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-2}] \quad (1)$$

where $a(t)$ is the instantaneous value of the acceleration and T is the time for which the effective value of the acceleration needs to be determined, i.e. the time of passage of the train set in front of the evaluated construction. From the effective value of the acceleration, it is possible to calculate the level of the effective value of the acceleration according to the relationship

$$L_{a,ef} = 20 \log \frac{a_{ef}}{a_0} \quad [\text{dB}], \quad (2)$$

where a_{ef} is the effective value of acceleration and a_0 is the reference level of acceleration ($10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). For the purpose of comparing the measured data in this article, the total a_{ef} value was calculated as the sum of the resulting

1. Časové zobrazení zrychlení kmitání a tlakové vlny včetně odpočtu minimálních a maximálních hodnot
2. Hladina efektivní hodnoty zrychlení kmitání
3. Frekvenční analýza naměřených dat formou amplitudového spektra (pro přechod z časové do frekvenční oblasti byl použit algoritmus rychlé Fourierovy transformace)

Průjezd každé vlakové soupravy byl také snímán připojenou rychloběžnou kamerou pro snazší definici časového intervalu pro výpočet hladiny efektivní hodnoty zrychlení. Její umístění bylo v ose akcelerometrů a systémově byla propojena s měřícím hardware a software. Podotkněme, že zároveň bylo ze záznamu z rychloběžné kamery analyzováno pohybové chování dětského kočárku a dalších předmětů umístěných na nástupišti zastávky v blízkosti bezpečnostního pruhu. Současně byly ze získaných záznamů při zapálené dýmovnici sledovány průběhy tlakových vln od testované soupravy.

Dále jsou stručně shrnuty matematické definice jednotlivých parametrů použitých ke srovnání obou konstrukcí. Efektivní hodnota zrychlení je definována vztahem

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a^2(t) \cdot dt} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-2}] \quad (1)$$

kde $a(t)$ je okamžitá hodnota zrychlení a T je doba, pro kterou je potřeba určit efektivní hodnotu zrychlení, tedy doba průjezdu vlakové soupravy před hodnocenou stavbou. Z efektivní hodnoty zrychlení je možné vypočítat hladinu efektivní hodnoty zrychlení dle vztahu

$$L_{a,ef} = 20 \log \frac{a_{ef}}{a_0} \quad [\text{dB}], \quad (2)$$

kde a_{ef} je efektivní hodnota zrychlení a a_0 je referenční hladina zrychlení ($10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Pro potřeby srovnání naměřených dat v tomto příspěvku byla celková hodnota a_{ef} vypočtena jako součet výsledných efektivních hodnot zrychlení naměřených v jednotlivých směrech X, Y a Z dle vzorce.

effective acceleration values measured in the individual X, Y and Z directions according to the formula

$$a_{ef} = \sqrt{a_{ef,x}^2 + a_{ef,y}^2 + a_{ef,z}^2} \quad (3)$$

The acceleration frequency spectra were calculated by applying the Fourier transform according to the relation,

$$AS_a(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot dt, \quad (4)$$

where f is the frequency, t the time, $a(t)$ the acceleration course in the time domain and $AS_a(f)$ its representation in the frequency domain, j represents an imaginary unit.

$$a_{ef} = \sqrt{a_{ef,x}^2 + a_{ef,y}^2 + a_{ef,z}^2} \quad (3)$$

Frekvenční spektra zrychlení byla vypočítána aplikací Fourierovy transformace dle vztahu,

$$AS_a(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot dt, \quad (4)$$

kde f je frekvence, t čas, $a(t)$ průběh zrychlení v časové oblasti a $AS_a(f)$ jeho reprezentace ve frekvenční oblasti, j představuje imaginární jednotku.

The evaluation of measurements

For the needs of this contribution, the measured data were processed into table and graphs. It should be noted that due to the limitation of the scope of the article, the graphs were made only from data obtained from the passage of the train set at speeds of 160 km/h and 200 km/h.

Vyhodnocení měření

Pro potřeby tohoto příspěvku byly zpracovány naměřená data do tabulek a grafů. Podotkneme, že z důvodu omezení rozsahu článku byly grafy vyhotoveny pouze z dat získaných z průjezdu vlakové soupravy rychlostmi 160 km/h a 200 km/h.

Travel speed/ Rychlost pojezdu [km/h]	L_{aef} [dB]			
	Rail/Kolejnice	Sleeper/Pražec	Platform 1/Nástupiště 1	Platform 2/ Nástupiště 2
160	137	129	100	100
180	143	135	102	100
190	145	135	104	102
200	146	136	105	102

Tab. 1 The acceleration level at different sensor positions and at different train speeds

From the attached table, it is clear that, according to the assumption, the highest values of the acceleration level L_{aef} were achieved on the superstructure. And the calculated values for the sensor on the rail compared to the sleeper are about 8 dB to 10 dB higher. This fact is evident at all driving speeds. Let's note that the calculated values on the track surface are not extreme.

Tab. 1 Hladina zrychlení na různých pozicích snímačů a při různých rychlostech vlaků.

Z přiložené tabulky je zřejmé, že dle předpokladu nejvyšších hodnot hladiny zrychlení L_{aef} bylo dosaženo na kolejovém svršku. Přičemž vypočtené hodnoty pro senzor na kolejnici oproti pražci jsou o cca 8 dB až 10 dB vyšší. Tato skutečnost je zřejmá při všech rychlostech pojezdu. Poznamenejme, že vypočtené hodnoty na kolejovém svršku nejsou nijak extrémní.

The calculated values on the platform are significantly lower compared to the track surface. At the same time, the fact that the values on the platform are almost comparable for the individual travel speeds of the train also applies. There is no need to worry about significant extremes and therefore increased damage to the platform of the stop for higher travel speeds.

A moving train set causes pressure changes near the track that affect nearby objects and people. The pressure field moves along with the train. Therefore, the pressure p will vary with time at a stationary point next to the track. The largest pressure change is usually caused by the passage of the front of the train set. We can see this fact from the graph in Fig. 5 and Fig. 6 in all four sensor positions. Other places where significant pressure changes occur are at the end of the train set and at the coupling level of individual cars. During the passage, the pressure first increases to a positive peak value and quickly drops to a negative peak value. A very important parameter is the pressure difference between peak values. It depends on the shape of the face of the set. The time between peak pressure values corresponds to the passage of the front of the train along the given track.

Vypočtené hodnoty na nástupišti jsou podstatně nižší oproti kolejovému svršku. Zároveň platí skutečnost, že hodnoty na nástupišti jsou téměř srovnatelné pro jednotlivé rychlosti pojezdu soupravy. Není třeba se obávat výrazných extrémů a tedy i zvýšeného poškození nástupiště zastávky pro vyšší rychlost pojezdu.

Pohybující se vlaková souprava vyvolává tlakové změny v blízkosti koleje, které působí na blízké objekty a osoby. Tlakové pole postupuje spolu s vlakem. Proto se bude tlak p měnit v čase ve stacionárním bodě vedle koleje. Největší tlaková změna je obvykle vyvolána průjezdem čela vlakové soupravy. Tuto skutečnost můžeme vidět z grafu na obrázcích Obr. 5 a Obr. 6 ve všech čtyřech pozicích snímačů. Další místa, kde se vyskytují významné tlakové změny, jsou na konci vlakové soupravy a na úrovni spřažení jednotlivých vozů. Při průjezdu se nejdříve tlak zvýší na kladnou špičkovou hodnotu a rychle klesne na zápornou špičkovou hodnotu. Velmi důležitým parametrem je rozdíl tlaku mezi špičkovými hodnotami. Ten závisí na tvaru čela soupravy. Doba mezi špičkovými hodnotami tlaku odpovídá průjezdu čela vlaku po dané dráze.

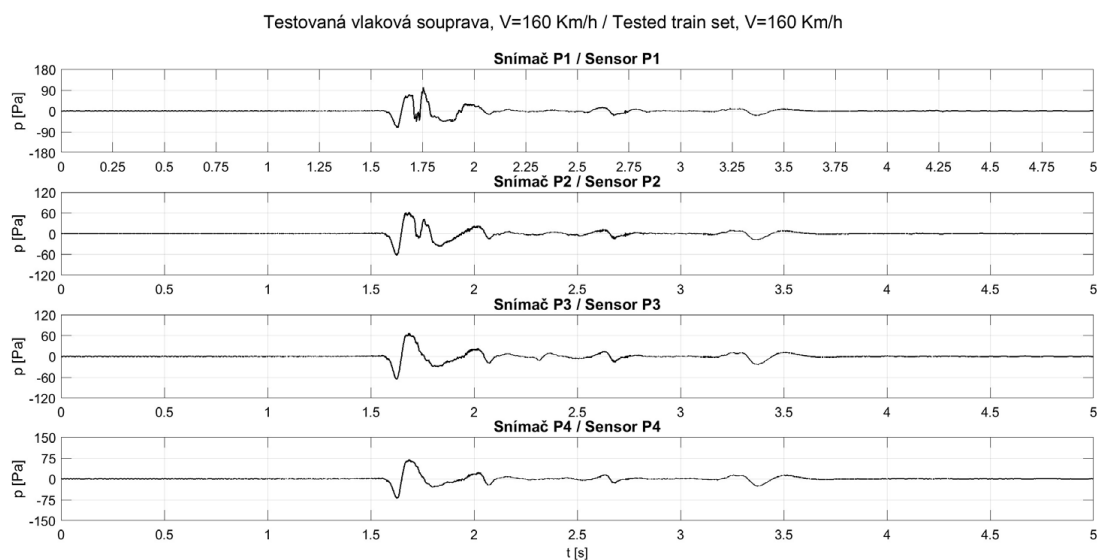


Fig. 5 Time characteristics of pressure, passage of a train set at a speed of 160 km/h

Obr. 5 Časové charakteristiky tlaku, průjezd vlakové soupravy rychlostí 160 km/h

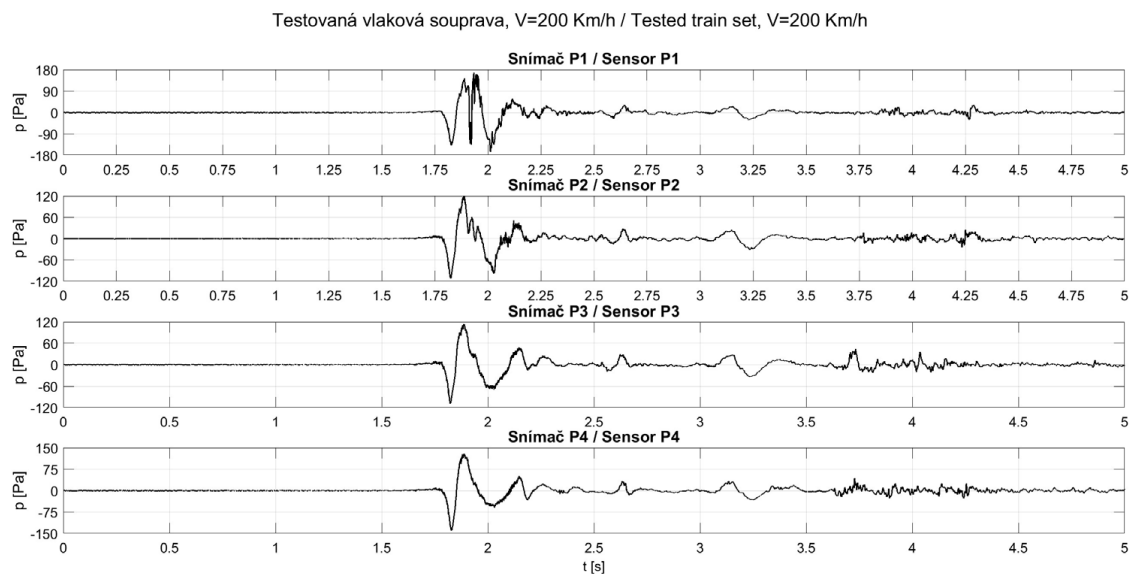


Fig. 6 Time characteristics of pressure, passage of a train set at a speed of 200 km/h

Obr. 6 Časové charakteristiky tlaku, průjezd vlakové soupravy rychlostí 200 km/h

Note that the pressure difference between the peaks is approximately proportional to the square of the train speed. From the picture Fig. 5 and Fig. 6, it can be seen that higher pressure changes were achieved for all sensors at the speed of the train set moving at a speed of 200 Km/h. Let us note, however, that even if the pressure values from the train set at a speed of 200 km/h are sometimes significantly higher, the evaluation of all the tests performed has shown that it is safe behind the safety strip for both standing objects and passengers.

Podotkněme, že rozdíl tlaku mezi špičkami je přibližně úměrný druhé mocnině rychlosti vlaku. Z obrázku Obr. 5 a Obr. 6 je patrné, že vyšších změn tlaku bylo dosaženo u všech snímačů při rychlosti vlakové soupravy jedoucí rychlostí 200 Km/h. Poznamenejme však, že i když jsou hodnoty tlaku od vlakové soupravy při rychlosti 200 Km/h někdy výrazně vyšší, vyhodnocení všech provedených testů prokázalo, že za bezpečnostním pruhem je jak pro stojící předměty, tak pro cestující bezpečno.

In the next part, a comparison of the acceleration time courses at the individual measured locations and their frequency spectra for two travel speeds of the test train transport is presented. Note that the vertical direction (Z) was chosen due to the limited number of pages. For the longitudinal direction X and the transverse direction Y, lower values were achieved in the case of both presented travel speeds. Both two images are made up of two types of graphs. On the left side are the time courses of oscillation acceleration obtained from individual sensors, on the right side are the corresponding courses of their amplitude spectra.

V další části je uvedeno srovnání časových průběhů zrychlení na jednotlivých měřených místech a jejich frekvenčních spekter pro dvě rychlosti pojezdu zkušební vlakové dopravy. Podotkněme, že byl vybrán svislý směr (Z) z důvodu omezeného počtu stran. U podélného směru X a příčného směru Y bylo v případě obou prezentovaných rychlostí pojezdu dosaženo nižších hodnot. Oba dva obrázky jsou tvořeny dvěma typy grafů. Na levé straně jsou časové průběhy zrychlení kmitání získané od jednotlivých snímačů, na pravé straně pak jsou odpovídající průběhy jejich amplitudových spekter.

It can be seen from the left graphs that the maximum acceleration values on the rail and sleeper are higher when traveling at a speed of 200 km/h (Fig. 8) than at a speed of 160 km/h (Fig. 7). However, the vibrations at both points of the platform are essentially comparable at both travel speeds. Thus, the transmission of waves

Z levých grafů je patrné, že maximální hodnoty zrychlení na kolejnici a pražci jsou při pojezdu rychlostí 200 km/h (Obr. 8) vyšší než u rychlosti 160 km/h (obr. 7). Ovšem vibrace v obou bodech nástupiště jsou v obou pojezdových rychlostech v podstatě srovnatelné. Tedy, přenos vlnění z tratě na plochu nástupiště

from the track to the platform surface is equally damped in both cases of travel. The amplitude spectra have a similar course for both speeds. Higher values of the spectrum, as expected, were achieved again in the case of the track top at a speed of 200 km/h. It should be noted that the comparison shows that there was no significant increase in the vibration level.

je v obou případech pojezdu stejně tlumen. Amplitudová spektra mají pro obě rychlosti podobný průběh. Vyšších hodnot spektra dle předpokladu bylo dosaženo opět v případě kolejového svršku při rychlosti 200 Km/h. Podotkněme, že ze srovnání vyplývá, že nedošlo k nijak výraznému nárůstu úrovně vibrací.

Testovaná vlaková souprava, V=160 Km/h / Tested train set, V=160 Km/h

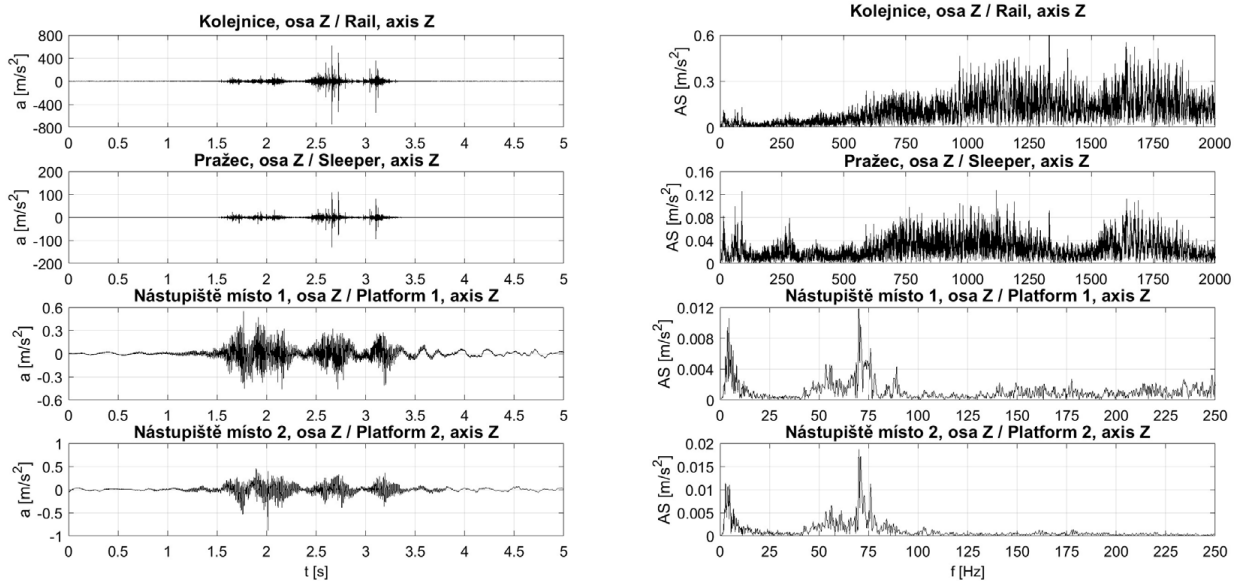


Fig. 7 Time and frequency characteristics of acceleration, passage of a train set at a speed of 160 km/h, direction Z

Obr. 7 Časové a frekvenční charakteristiky zrychlení, průjezd vlakové soupravy rychlostí 160 km/h, směr Z

Testovaná vlaková souprava, V=200 Km/h / Tested train set, V=200 Km/h

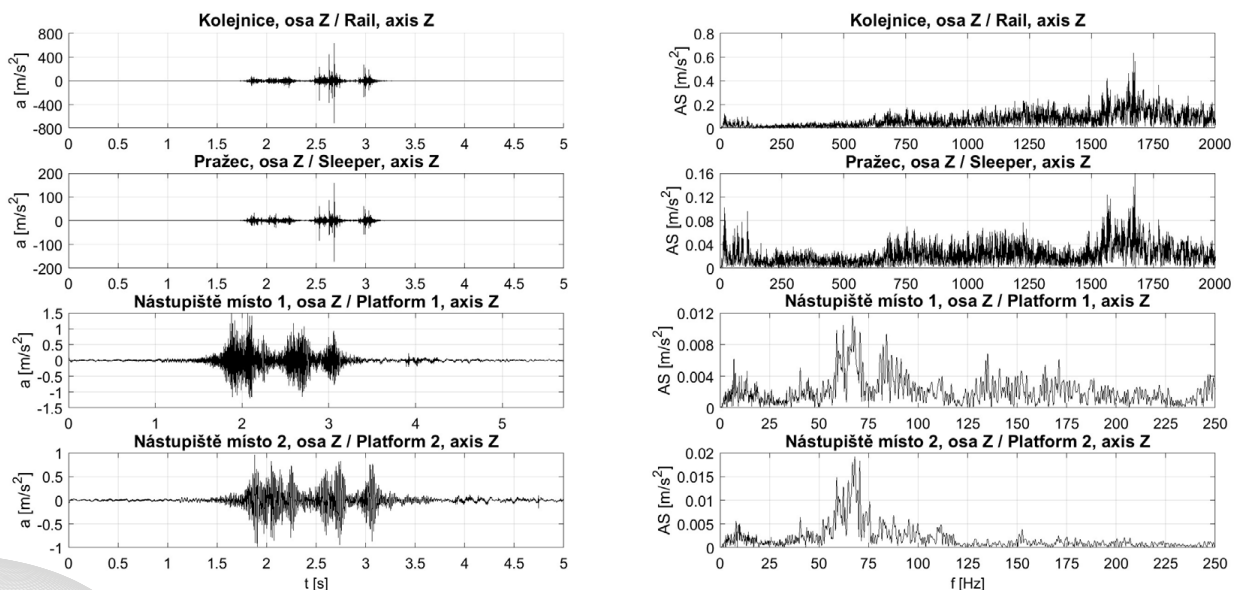


Fig. 8 Time and frequency characteristics of acceleration, passage of a train set at a speed of 200 km/h, direction Z

Obr. 8 Časové a frekvenční charakteristiky zrychlení, průjezd vlakové soupravy rychlostí 200 km/h, směr Z

The conclusions

Dynamic effects acting on the superstructure of railway tracks are a key aspect not only for the design and construction of railway infrastructure, but also play an important role in their maintenance. These events include the interaction between train sets with the railway track, further vibration and dynamic loads caused by different types of train sets. The operation of trains at speeds above 160 km/h requires a thorough understanding of the dynamic phenomena taking place on the tracks of the railway network. The paper presents the conclusions from the measurements and analyses carried out, especially for researchers and experts involved in the design, maintenance and operation of railway infrastructure at speeds above 160 km/h.

On the basis of the performed analyses, it is possible to state that the used methodology provides good results and conclusions. Measured and calculated quantities are characterized by sufficient accuracy and telling ability. The used means of time and frequency signal analysis contributed very well to the high-quality processing of the measured data.

The obtained results proved that in the tested section, which was previously reconstructed, an increase in travel speed from the current maximum operating speed of 160 km/h to 200 km/h is possible without any problem on the given railway track and its surroundings. It should be noted that thanks to this measurement campaign, important information was obtained for the further development of our railway network for gradually increasing the operating speed of selected train sets up to a speed of 200 km/h. The obtained results will be further used to build and calibrate dynamic and aerodynamic models.

References/ Literatura

1. Wanming Zhai: Vehicle-Track Coupled Dynamics: Theory and Application, Springer, 2020, ISBN: 978-981-15-3007-7
2. Maksym Spiryagin, Colin Cole, Timothy McSweeney: High-Speed Rail Track Dynamics, CRC Press, 2019, ISBN: 978-1-138-54578-3
3. Simon Iwnicki: Railway Dynamics and Track-Train Interaction, CRC Press, 2006, ISBN: 978-0-8493-3321-7

Závěry

Dynamické účinky působící na svršek železničních tratí jsou klíčovým aspektem nejen pro projektování a výstavbu železniční infrastruktury, ale také hrají důležitou roli při jejich údržbě. Tyto děje zahrnují interakci mezi vlakovými soupravami s železniční tratí, dále vibrační a dynamické zatížení způsobené různými typy vlakových souprav. Provoz vlaků při rychlostech nad 160 km/h vyžaduje důkladné pochopení dynamických jevů probíhajících na tratích železniční sítě. Příspěvek prezentuje závěry z provedených měření a analýz zejména pro výzkumníky a odborníky zabývající se projektováním, údržbou a provozem železniční infrastruktury při rychlostech nad 160 km/h.

Na základě provedených analýz je možné konstatovat, že použitá metodika poskytuje dobré výsledky a závěry. Měření 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.

Získané výsledky prokázaly, že v testovaném úseku, který byl dříve rekonstruován, je zvýšení rychlosti pojezdu ze současné maximální provozní rychlosti 160 km/h na 200 km/h na daném železničním svršku i v jeho okolí bez problému možné. Podotkneme, že díky této měřicí kampani byly získány důležité informace pro další rozvoj naší železniční sítě pro postupné zvyšování provozní rychlosti vybraných vlakových souprav až do rychlosti 200 km/h. Získané výsledky budou dále využity k sestavení a kalibraci dynamických a aerodynamických modelů.

4. Anestis Terzi, Fredrik Olsson: Dynamic Analysis of High-Speed Trains Passing through Sharp Curves, *Journal of Rail and Rapid Transit*, Volume 229, Issue 6, 2015, DOI: 10.1177/0954409714561602
5. Xiaoxuan Sun, Jinwu Xiao, Weiqun Wang: Impact of High-Speed Trains on Track Structures and Their Surroundings, *Transportation Geotechnics*, Volume 5, 2015, DOI: 10.1016/j.trgeo.2015.08.001
6. Yong Deng, Zhengqing Chen, Shaowen Hu: Vibration and Settlement Analysis of High-Speed Railway Track due to Train Moving Loads, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 125, 2019, DOI: 10.1016/j.soildyn.2019.105734
7. J. M. Goicolea, M. Gil-Negrete, A. Galvín: Numerical Analysis of the Effects of Track Irregularities on the Dynamics of High-Speed Railway Trains, *Vehicle System Dynamics*, Volume 47, Issue 2, 2009, DOI: 10.1080/00423110802420496
8. VEIT, P.; MARSCHNIG, S.: Towards a more sustainable track. *Railway Gazette International*, January 2011, p. 42-44
9. Wai-Fah Chen, Lian Duan: *Bridge Engineering Handbook, Second Edition: Fundamentals*, CRC Press, 2014, ISBN: 978-1-4398-7887-6
10. Mark Robinson: *Damping in High-Speed Rail Tracks*, Springer, 2017, ISBN: 978-3-319-52385-7
11. Smutný J.: Measurement and Analysis of Dynamic and Acoustic Parameters of Rail Fastening, *NDT & E International – Independent Nondestructive Testing and Evaluation*, 2004, Volume 37, Issues 8, ELSEVIER, pp. 119-129, ISSN 0963-8695
12. 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

Acknowledgments

This contribution was supported by the project FAST-S-24-8595, Railway infrastructure for high-speed lines”.

Thanks also go to the employees of the Railway Administration for allowing participation in the measurement campaign.

Poděkování

Tento příspěvek byl podpořen projektem FAST-S-24-8595, Drážní infrastruktura pro vysokorychlostní trati”.

Poděkování také náleží pracovníkům Správy železnic za umožnění účasti na měřicí kampani.



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



Dušan Janošík

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.



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 non-destructive testing, noise and vibrations.



M. 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.