

Milan Moravčík *

DYNAMICKÉ CHOVANIE ŽELEZNIČNEJ TRATE – EXPERIMENTÁLNE MERANIA

DYNAMIC BEHAVIOUR OF RAILWAY TRACK – EXPERIMENTAL MEASUREMENTS

Príspevok je venovaný dynamickým meraniam konštrukcie trate zataženej prevádzkovým zaťažením a stručne prezentuje niektoré experimentálne postupy hodnotenia dynamického chovania trate. Vertikálne kmitanie kolajníc, podvalov a povrchu štrkového lôžka vo vzdialenosti 1 m od kolajníc, ako aj meranie dynamickej interakčnej sily kolajnice/podval sú analyzované v časovej aj frekvenčnej oblasti. Získané výsledky dávajú užitočné informácie a údaje o dynamickej reakcii kolajového roštu zataženého pri prejazde vlakov.

1. Úvod

Dynamická reakcia konštrukcie trate je stále študovaná v teoretickej aj experimentálnej oblasti ako prioritný problém mechaniky železničnej trate, najmä s ohľadom na zvyšovanie prevádzkových rýchlostí a zaistenie vysokej spoľahlivosti sústavy pohybujúce sa vozidlo – trať. Navyše pristupujú aj ďalšie požiadavky, ako napríklad podmienky kladené na stabilitu trate, údržbu, presnosť geometrickej polohy trate, resp. prenos vibrácií a hluku do okolia tratí. Jedným z výskumných cieľov Katedry stavebnej mechaniky SvF v tejto oblasti je rozvoj metód hodnotenia dynamických vlastností a dynamického chovania konštrukcie trate, ktoré sú zamerané najmä na klasickú konštrukciu trate uloženú v štrkovom lôžku. V tomto duchu bol spracovaný aj program teoretických a experimentálnych prác zameraných na dynamickú interakciu vozidlo/trať, ktorý zahŕňa:

- Rozvoj teoretických výpočtových modelov interakcie vozidlo – trať.
- Počítačové simulácie a výpočty sústredené na predpoveď parametrov dynamickej odozvy trate – deformácie a napätosť komponentov kolajového roštu a podložia.
- Experimentálne meranie parametrov odozvy trate.
- Statické a dynamické testovanie komponentov trate – podvalov, systémov pružného upevnenia, pružných podložiek, interakcie podval – štrkové lôžko a pod.

Program experimentálnych meraní je zameraný na:

- Vyšetrovanie dynamického chovania komponentov trate (kolajníc, podvalov, štrkového lôžka) v prevádzkových podmienkach zataženia trate.

The objective of the paper is devoted to in situ dynamic measurements on the track structure under traffic and briefly to present some experimental approaches in order to appreciate the dynamic behaviour of the track structure. The vertical vibration of rails, sleepers and free ballast field at a distance of 1m from the track and the direct dynamic interaction force the rail / the sleeper were measured and analysed in the time and frequency domain. Received results can give many useful indications concerning the assessing of the superstructure dynamic behaviour.

1. Introduction.

The dynamic behaviour of the railway track structure is still studied both theoretically and experimentally as a primary problem of the track mechanics, in particular because of increasing the train speed and assuring the high reliability of the system vehicle – track. Sometimes operational conditions, e.g. conditions in mainlines, impose special requirements for stability of tracks, for maintenance, for positioning accuracy, for vibration transmission or noise radiation to the surroundings which should be accepted. The dynamic behaviour of railway tracks is directly related to most of these items. One of the research goals of the Department of Structural Mechanics in this field is development of suitable methods for the evaluation of dynamic properties and the dynamic behaviours of the track structure focused on the conventional ballasted track. With this purpose the program of theoretical and experimental works studying the interaction dynamic problems of the vehicle – track, with focus on the track and the dynamic behaviour of track, has been undertaken in our workplace. Generally, this program comprises:

- Development of theoretical and mathematical models for interaction problems of the vehicle and the track.
- Computer simulation and calculations to predict dynamic response parameters – deformations and stresses in the superstructure and in the substructure.
- In situ measurements of response parameters of the track structure.
- Static and dynamic tests for the track structure components – sleepers, fastening systems, resilient pads, the sleeper – ballast interaction, etc.

* Prof. Ing. Milan Moravčík, CSc.

Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, University of Žilina, Komenského 52, 010 26 Žilina, Slovak Republic

- Porovnanie dynamickej reakcie trate na betónových a drevených podvaloch.
- Hodnotenie zmien v dynamickej reakcii trate ako dôsledku celkového zaťaženia trate, prevádzkovej rýchlosti a pod.
- Testovanie trate na rázového zaťaženie.

Tento príspevok je venovaný dynamickým meraniam trate zaťaženej v prevádzkových podmienkach a stručnej prezentácii prístupov riešenia a hodnotenia dynamickej reakcie trate.

2. Dynamické merania in situ

Dynamická odozva trate je vyšetrovaná pre typické usporiadanie konštrukcií trate, pre charakteristické skladby vlakov a charakteristické sekcie trate:

- priame traťové úseky so zváranými koľajnicovými pásmi mimo zvarov a pri zvaroch koľajníc,
- v oblúkoch,
- na výhybkách.

Experimentálne merania prezentované v tomto príspevku sú venované meraniu v priamych traťových úsekoch na hlavnej trati Žilina – Košice v 331,7 km (úsek Teplička).

Trať

Merania sa uskutočnili na klasickej konštrukcii trate so štrkovým lôžkom. Zvárané koľajnicové pásy UIC 60 s hmotnosťou $m_r = 60$ kg/m a momentom zotrvačnosti $I_r = 0,3038 \cdot 10^4$ m⁴ sú upevnené na betónových podvaloch typu SB 8, s dĺžkou 2,42 m, šírkou 0,28 m, výškou $h = 0,20$ m a hmotnosťou $m_s = 272$ kg. Koľajnice sú pripojené k podvalom podkladnicovým systémom zvierkami ŽS 4 a pružnými podložkami hrúbky $t = 0,01$ m pod koľajníc.

Vlaky

Meraný úsek bol zaťažovaný prevádzkovým zaťažením – osobnými a nákladnými vlakmi. Typické zostavy prechádzajúcich vlakov zahrňujúce lokomotívu a osobné, resp. nákladné vagóny sú znázornené na obr. 1. Schémy lokomotív pre osobné a nákladné vlaky sú ukázané na obr. 2. Rýchlosť osobných vlakov v meranom priamom úseku bola 90 km/h ÷ 140 km/h. Rýchlosť nákladných vlakov sa pohybovala od 40 km/h ÷ 70 km/h. Lokomotívy osobných vlakov (typy L350, L162, L163, L150, L363) sú uložené na dvoch podvozkoch. Lokomotívy nákladných vlakov sú typu 2 × L131 (2 × 85 t), L182 (85 t), L183 (85 t), L121 (88 t) a L363 (87 t).

Základné charakteristiky lokomotív a vagónov osobných vlakov – celková dĺžka L_t , vzdialenosť podvozkov L_b , vzdialenosť náprav L_a , celková hmotnosť vozidiel M_t a hmotnosť pripadajúca na 1 nápravu M_{1a} sú sumarizované v tab. 1.

3. Meracia zostava

Experimentálne meranie bolo sústredené na identifikáciu dynamickej odozvy komponentov trate od účinkov dopravy:

The programme of experimental measurements aimed to:

- Investigation the dynamic behaviour of track components (rails, sleepers, ballast bed) for the dynamic track loading in operational conditions.
- Comparison of the dynamic behaviour of the track structure for the track on concrete sleepers and on wooden sleepers.
- Investigation of changes in the dynamic behaviour of the track structure as a function of load tonnage, train speed, etc.
- Impact of loading tests of the track structure.

This paper is devoted to in situ dynamic measurements on the track structure under traffic and briefly presents some experimental approaches in order to appreciate the dynamic behaviour of the track structure.

2. In situ dynamic measurements

The dynamic response of the track is experimentally measured for a typical arrangement of track structures, for some typical configuration of passage trains and for characteristic track sections:

- straight sections out of rail welds and near welds,
- in curve sections,
- in turnouts.

Experimental measurements presented in this paper correspond to in situ measurements at the straight section of the main line Žilina – Košice in 331.7 km (in site Teplička).

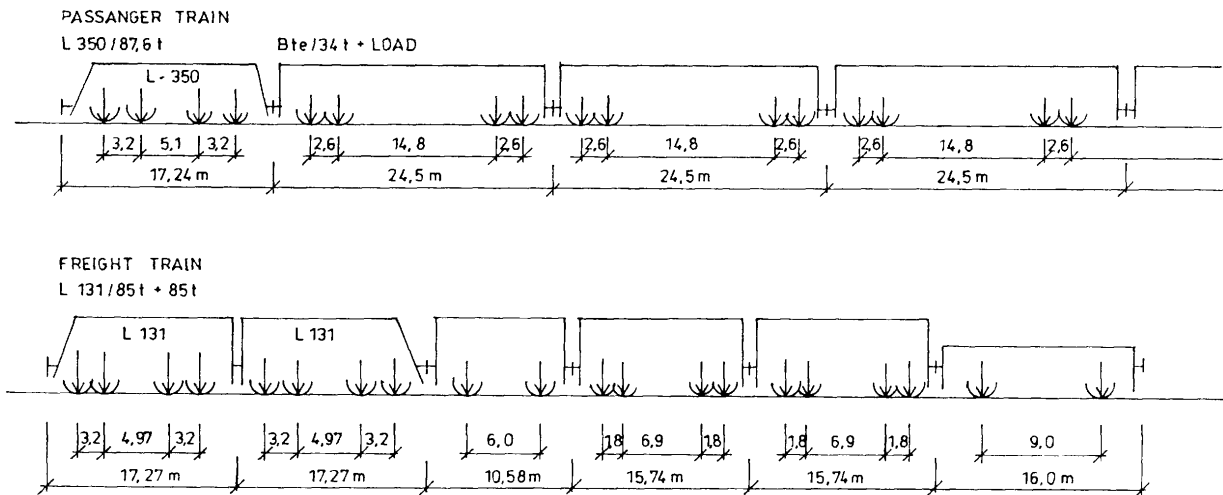
The track

Measurements were performed on the conventional ballast track in the section of straight track. Continuously welded UIC 60 rails with a mass per unit length of $m_r = 60$ kg/m and a moment of inertia $I_r = 0.3038 \cdot 10^{-4}$ m⁴ are fixed on the concrete monoblock sleepers of the type SB 8 with a length $l = 2.42$ m, a width $b = 0.28$ m, a high $h = 0.20$ m, and a mass $m_s = 272$ kg. The rails were fastened to the sleepers with steel baseplates and clip bolts ŽS 4. Flexible rail pads with thickness $t = 0.01$ m were placed under the rail.

The trains

The measured line was loaded in operational conditions by passenger trains and freight trains. The typical configuration of passage trains, consisting of a locomotive and carriages or wagons is shown in Fig. 1. Schemes of locomotives for passenger trains and freight trains are shown in Fig. 2. The speed of passenger trains in the measured section varied between 90 km/h ÷ 140 km/h. The speed of the freight trains varied between 40 km/h ÷ 70 km/h. The locomotives of passenger trains (types L350, L162, L163, L150, L363) are supported by 2 bogies. The locomotives of freight trains are of 2 × L131 (2 × 85 t), L182 (85 t) and L183 (85 t) and L121 (88 t), L363 (87 t) types.

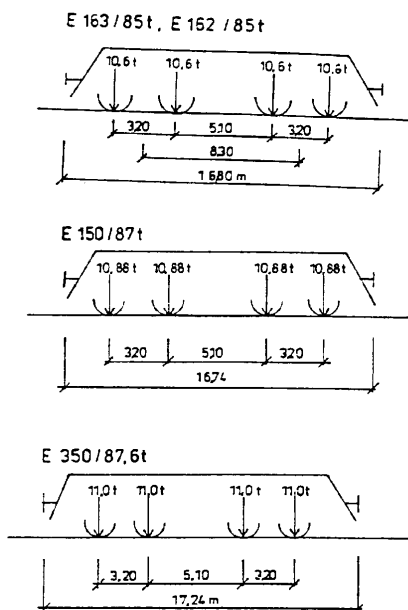
The basic characteristics of locomotives and carriages for the coaching traffic – the carriage total length L_t , the distance between bogies L_b , the axle distance L_a , the total mass M_t and axle masses M_{1a} are summarised in Table 1.



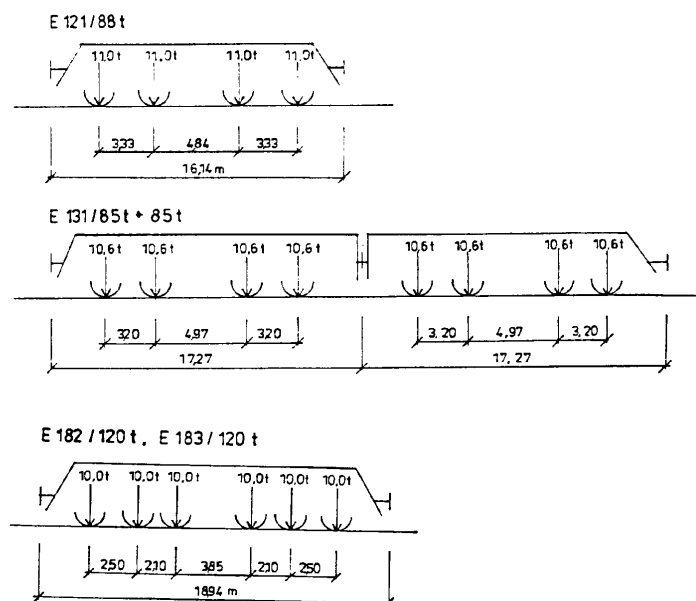
Obr. 1. Typická zostava osobného a nákladného vlaku
Fig. 1. A typical configuration of a passenger train and a freight train

Scheme of locomotives

• Passenger trains



• Freight trains



Obr. 2. Schéma lokomotív pre osobné a nákladné vlaky
Fig. 2. Scheme locomotives for passenger trains and freight trains

1. Vertikálne kmitanie koľajníc, podvalov a povrchu štrkového lôžka vo vzdialenosti 1 m od trate. Merali sa vertikálne posuny $w(t)$ a vertikálne zrýchlenia $\ddot{w}(t)$ týchto komponentov. Piezoelektrické akcelerometre B&K typu BK 4500 boli nalepované na koľajnicu a podvaly. Na hodnotenie kmitania štrkového lôžka boli použité akcelerometre typu BK 8306. Vertikálne posuny $w(t)$ koľajníc a podvalov boli merané relatívnymi snímačmi

3. Measurement setup

The measurement focused on the identification of dynamic response of the track components under traffic:

1. The vertical vibration of rails, sleepers and free ballast field at a distance of 1 m from the track. They were measured as the vertical displacement $w(t)$ and the acceleration $\ddot{w}(t)$ of these

Geometrické a hmotnostné charakteristiky koľajových vozidiel pre osobnú dopravu na ŽSR.

Tab. 1

Geometrical and the mass characteristics of vehicles for coaching traffic in ŽSR

Table 1

Locomotives	Axles	Length [m]			Mass [t]	
		L_t	L_b	L_a	M_t	M_{1a}
EL 162,163	4	16.80	5.10	3.20	85.0	10.625
EL350	4	17.24	5.10	3.20	87.6	10.950
EL 362,363	4	16.80	5.10	3.20	87.0	10.875
EL 150	4	16.74	5.10	3.20	87.0	10.875
Carriages	Axles	L_t	L_b	L_a	M_t	M_{1a}
Bte	4	24.5	14.6	2.6	34.0 ÷ 44.0	4.25 ÷ 5.50
Bai	4	24.5	14.8	2.4	38.0 ÷ 46.0	4.75 ÷ 5.75
Ba	4	24.5	14.7	2.5	39.0 ÷ 47.0	4.80 ÷ 5.80

posunutí typu Bosh umiestnenými na pevne fixovanej meracej konzole, obr. 3.

2. Dynamické interakčné sily koľajnica – podval $F_{R-S}(t)$ sa merali piezoelektrickým snímačom sily typu Kistler, ktorý sa vkladal medzi koľajnicou a podval namiesto vybranej podkladnice, pozri obr. 3. Vložený snímač sily môže byť predpínaný na zvolené pritlačenie koľajnice a podvalu.
3. Dynamické pomerné pretvorenie $\varepsilon(t)$ koľajnicových pásov merané pomocou priložného piezoelektrického tenzometra typu Kistler osadeného na spodnej strane päty koľajnice medzi podvalmi.

Merané veličiny boli zaznamenané ako elektrické signály pomocou analogovo-digitálneho 16-kanálového konvertora DAS 16 alebo 32-kanálového záznamového systému Disys a tiež paralelne na 4-kanálový magnetofón typu BK 7005. Skutočné rýchlosti prechádzajúcich vlakov boli určované zo záznamov meraných signálov. A/D prevodník zaznamenáva merané signály so zvolenou vzorkovacou frekvenciou f_s priamo do pamäte počítača. Vzorkovacia frekvencia v týchto meraniach hrá pritom významnú úlohu najmä vzhľadom na rýchlosť meraných procesov (rázové procesy). Pokiaľ dominantne frekvenčná skladba kolesových síl a priehybov koľajníc a podvalov zodpovedá nízkym frekvenciám, frekvenčná skladba zrýchlení týchto pohybov leží v oveľa širšej oblasti.

Pri meraniach dynamickej odozvy trate sa vzorkovacia frekvencia f_s volí nasledovne:

- a) Pre hodnotenie nízkofrekvenčnej odozvy komponentov trate: $f_s = 200$ Hz.
- b) Pre hodnotenie stredne frekvenčnej odozvy komponentov trate: $f_s = 500 \div 1000$ Hz.

4. Výsledky meraní

Merané signály odozvy trate zaznamenané do pamäte počítača pomocou meracích systémov Das alebo Disys, resp. Bk meracieho magnetofónu sa spracovali aplikáciou modulov analýzy týchto sys-

components. The B&K piezoelectric accelerometers of the type BK 4500 were glued to the rail and the sleeper. For the ballast response the BK 8306 seismic accelerometers were used. The vertical displacements $w(t)$ of rails and sleepers were measured by the relative displacement transducers of the Bosh type mounted on the fixed reference datum, see Fig. 3.

2. The direct dynamic interaction force the rail - the sleeper $F_{R-S}(t)$ were measured by a Kistler piezoelectric load cell inserted between the rail and sleeper placed instead of the removed baseplate, see Fig. 3. The inserted load cell is prestressed to the selected value.
3. The direct dynamic strain $\varepsilon(t)$ of the rail was measured by a Kistler attached piezoelectric tensiometer mounted on the rail flange.

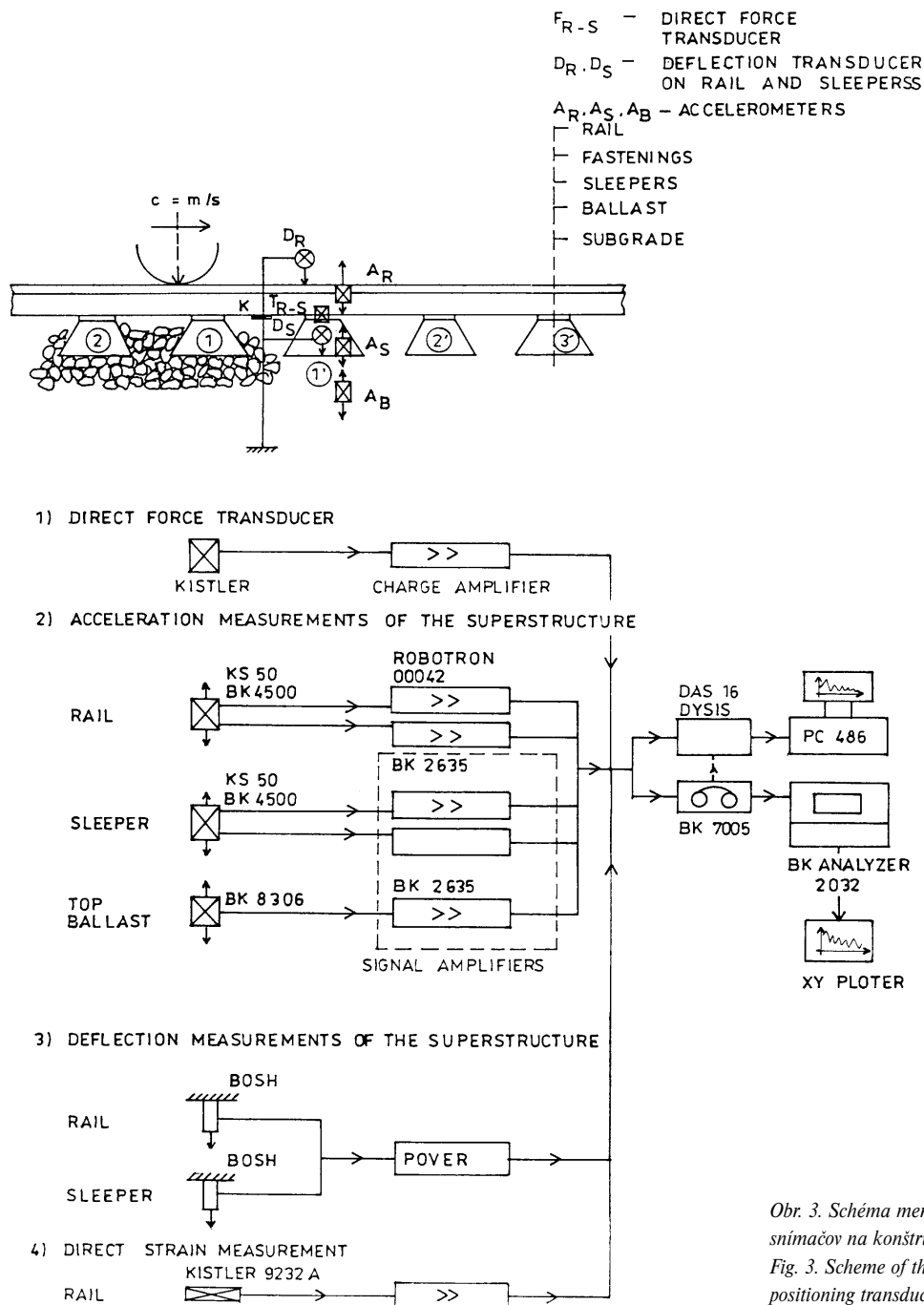
The measured quantities were recorded as electrical signals by means of an analog-digital converter of a 16-channel DAS 16 type, or the Disys 32 channel system for data acquisitions and they were recorded in a parallel way with a BK 4-channel tape recorder of a BK 7005 type. The actual train speed was derived from continuous records of passage trains. The A/D device records signals with a chosen sampling frequency f_s directly into the computer memory. In track response measurements the sampling frequency plays an important role because of speedy processes (impact processes). While the dominant frequency composition of wheel forces and deflection of rails and sleepers lie in the low frequency range, the frequency content of accelerations of these motions lies in a much wider frequency range.

In our dynamic response measurements the sampling frequency f_s were chosen as follows:

- a) For appreciation of the low frequency response of track components: $f_s = 200$ Hz
- b) For appreciation of the middle frequency response of track components: $f_s = 500 \text{ Hz} \div 1000 \text{ Hz}$.

4. Measurement results

Measured signals of the track response recorded and stored on the disk in Das and Disys systems and the BK recorder were processed using an analyser modulus of these systems. Signals in



Obr. 3. Schéma meracej zostavy a umiestnenie snímačov na konštrukcii trate.
Fig. 3. Scheme of the measurement setup and positioning transducers in the track

témov, v ktorých merané signály sa vhodne editujú, pracujú a vykresľujú. Signály sa analyzujú v časovej a následne frekvenčnej oblasti. Všeobecne môžeme povedať, že v prevádzkových podmienkach každý prierez koľajnice alebo každý podval je zaťažovaný postupnosťou impulzov alebo rázov vyvolávaných prechodom náprav vozidiel vyšetrovaným miestom. Toto dynamické zaťaženie vyvoláva dynamickú napätosť a pretvorenie v komponentoch trate a zodpovedajúce dynamické priehyby a zrýchlenia majú charakteristický priebeh, ktorý v časovej oblasti je ukázaný na obr. 4 a obr. 5.

these modulus can be edited, plotted and managed (integration, derivation, filter, FFT frequency analysis). Signals are analysed in the time domain and next in the frequency domain. Generally, we can say that in service conditions each rail cross-section or each sleeper is loaded by a sequence of impacts or shocks from the passage wheels of the train. This dynamic load induces a dynamic stress and strain in rails, sleepers and subgrade and corresponding dynamic deflections and accelerations of these components having a characteristic shape in time domain, see Figs. 4 and 5.

Časový priebeh vertikálnej odozvy trate

Typické príklady časových priebehov vertikálnej odozvy sledovaných komponentov trate sú prezentované na obr. 4 a obr. 5.

- Časový priebeh vertikálnej odozvy trate pri prejazde osobného vlaku v sledovanom priamom úseku (mimo zvarov koľajníc), rýchlosť $c = 115$ km/h. Vzorkovacia frekvencia $f_s = 100$ Hz. Časové záznamy sa analyzovali systémom Disys, obr.4.
 - Dynamická interakčná sila koľajnica/podvaly $F_{R-S}(t)$, záznam piezoelektrického snímača sily Kistler zodpovedá nízkemu predpätiu snímača $\Delta F_{R-S} = 1,5$ kN, obr. 4a.
 - Vertikálne posunutia koľajníc $w_R(t)$, filtrovaný signál pre $f \in (0 - 20$ Hz), obr. 4b.
 - Vertikálne zrýchlenie koľajníc $\ddot{w}_R(t)$, nefiltrovaný záznam pre $f \in (0 - 500$ Hz), obr. 4c.
 - Vertikálne premiestnenie hlavy podvalu $w_S(t)$, filtrovaný záznam pre $f \in (0 - 20$ Hz), obr. 4d.
 - Vertikálne zrýchlenie podvalu $\ddot{w}_R(t)$, nefiltrovaný záznam pre $f \in (0-500$ Hz), obr. 4e.
- Časový priebeh vertikálnej odozvy trate pri prejazde nákladného vlaku sledovaným priamym úsekom trate, $c = 57$ km/h. Aplikovaný je modul analýzy systému Disys. Na obr. 5 sú prezentované časové priebehy rovnakých veličín odozvy ako v predchádzajúcom prípade prejazdu osobného vlaku.

Z obr. 4 a obr. 5 vidieť, že časové záznamy umožňujú dobrú identifikáciu prejazdu podvozkov, resp. náprav koľajových vozidiel, aj korešpondujúce amplitúdy meraných veličín. Tieto amplitúdy dávajú dobrý obraz dynamických vplyvov kolies vozidiel na konštrukciu trate.

Frekvenčná skladba vertikálnej odozvy

Transformácia meraných signálov do frekvenčnej oblasti dáva podrobnú informáciu o kmitaní trate a o koncentracii mechanickej energie na jednotlivé frekvenčné zložky. Aplikovaný systém analýzy zároveň umožňuje spracovať ďalšie informácie o odozve, napr. frekvenčnú odozvu (FRF), vzájomné spektrum, vzájomnú koreláciu a pod. Frekvenčná odozva hrá v procesoch poškodenia rozhodujúcu úlohu a teda dynamika sústavy pohybujúce sa vozidlo/trať musí byť známa. Pritom možno predpokladať, že nízkofrekvenčná odozva vo frekvenčnej oblasti $1 \div 100$ Hz ale aj stredne frekvenčná odozva v oblasti $100\text{Hz} \div 500\text{Hz}$ hrá v dynamike traťi dôležitú úlohu. Dynamika komponentov trate - podvaly, podložky, štrkové lôžko a podložie v týchto frekvenčných oblastiach významne ovplyvňuje celkové dynamické reakcie trate.

Pokiaľ spektrálna analýza záznamov kmitania založená na FFT poskytuje dobrý popis stacionárnych a pseudostacionárnych signálov kmitania, nestacionárne signály by mali zohľadňovať ich spektrálne zloženie vzhľadom na čas. Jedna z ciest riešenia je aplikácia funkcie časových okien, ktorými sa v zázname analyzujú charakteristické časové úseky, ktoré majú stacionárny charakter, alebo ktoré popisujú charakteristické javy kmitania.

4.1. Nízkofrekvenčná analýza odozvy trate

Prezentovaná je vertikálna odozva trate od účinku prejazdu vlakov v meranom priamom úseku trate (mimo zvarov koľajníc),

Time history of the vertical track response

Typical examples of the time history of the vertical response of track components are presented in Figs. 4 and 5.

- The Time history of the vertical track response for the passenger train passage in a straight track section (out of rail welds), $c = 115$ km/h. The sampling frequency $f_s = 1000$ Hz. The analyser modulus of the Disys system is applied, Fig. 4.
 - The direct dynamic interaction force a rail - a sleeper $F_{R-S}(t)$, the Kistler piezoelectric load cell was prestressed to a low value $\Delta F_{R-S} = 1,5$ kN, Fig. 4a.
 - The vertical displacement of the rail $w_R(t)$, the filtered record for $f \in (0 - 20$ Hz), Fig. 4b
 - The vertical acceleration of the rail $\ddot{w}_R(t)$, Fig. 4c
 - The vertical displacement of the sleeper $w_S(t)$, the filtered signal for $f \in (0 - 20$ Hz), Fig. 4d
 - The vertical acceleration of the sleeper $\ddot{w}_S(t)$, Fig. 4e.
- The Time history of the vertical track response for the freight train passage in a straight track section (out of rail welds) of the line, $c = 57$ km/h. The analyser modulus of the Disys system is applied. In Fig. 5. are presented identical measured time histories of the vertical track response as in the foregoing case of the passenger train passage.

As we can see from Figs.4 and 5 time histories allow well detection passages of bogies and axles of vehicles and the corresponding detection peaks of the measured value. Amplitudes of the measured values give a good picture of dynamic effects of the wheel load on the track structure.

Frequency content of the vertical track response

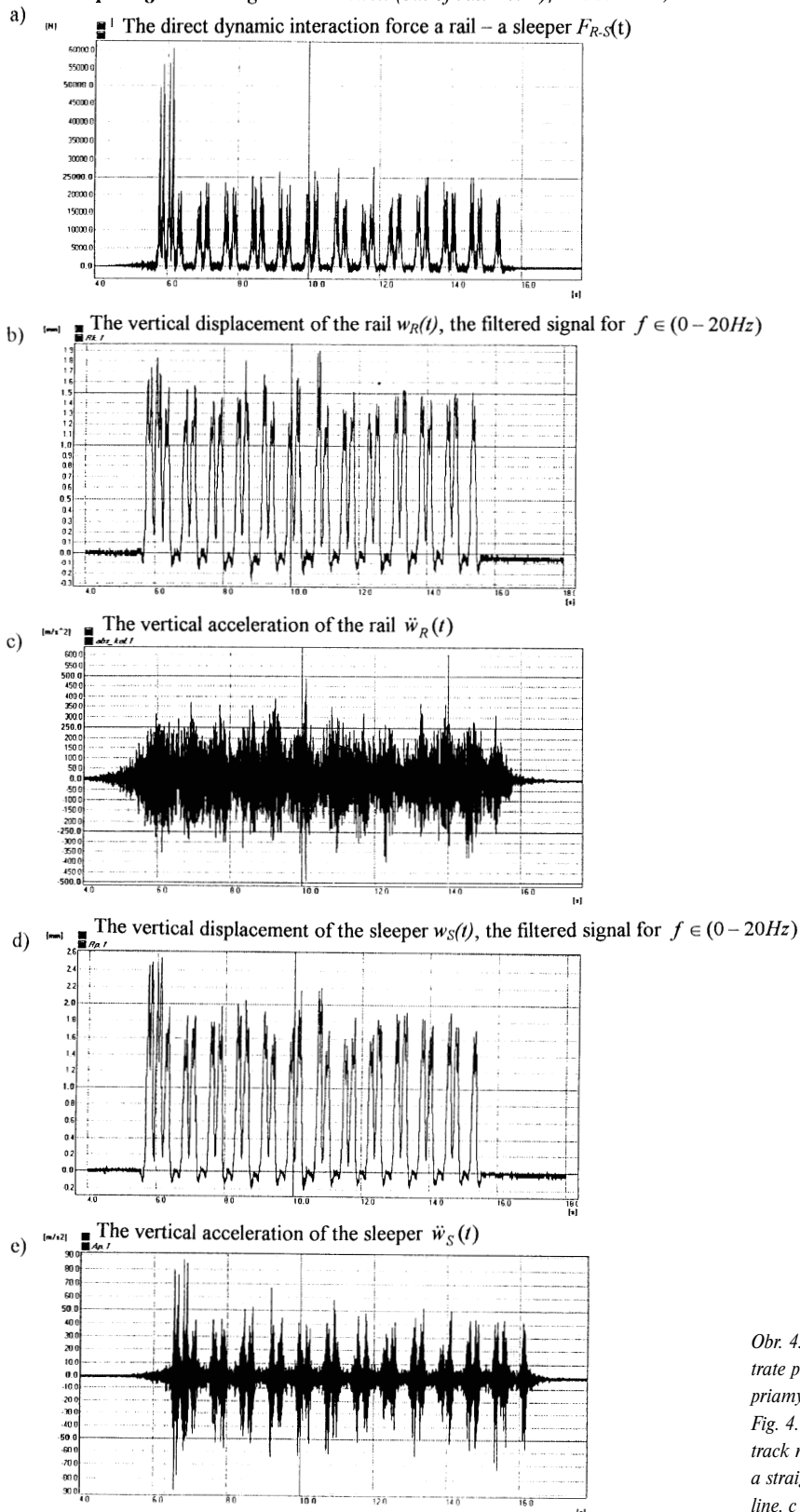
Transformation of measured signals to the frequency domain provides comprehensive information about track vibration and gives a picture of concentration of energy on frequency components. The analyser module of an applied system enables, at the same time, to process additional information of the response, for example, the frequency response function (FRF), the cross spectrum, the cross correlation, etc. The FRF plays a meaningful role in the damage process where the full train - track dynamics has to be taken into account. Moreover, it is expected that the low-frequency response range $1 \text{ Hz} \div 100 \text{ Hz}$ and the mid-frequency range between $100 \text{ Hz} \div 500 \text{ Hz}$ play an important role in the track dynamics. In these frequency ranges the track components - sleepers, pads, the ballast and subsoil have a strong influence on the track system behaviour.

While traditional spectral analysis techniques based on FFT provide a good description of stationary and pseudostationary signals, non-stationary signals should be analysed with consideration of spectral information in time. One of the techniques applied here uses a window function to window out short sections of the overall signal which are near stationary or which contain isolated events.

4.1. The low-frequency analysis of the track response

The vertical track response for the passenger train passage in a straight track section (out of rail welds), $c = 115$ km/h is pre-

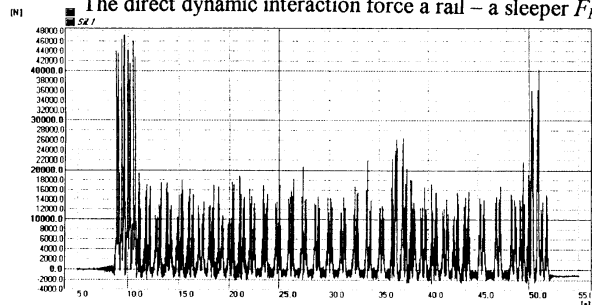
Teplička III/2000 / The time history of the vertical track response for the passenger train passage in a straight track section (out of rail welds), $c=115$ km/h.



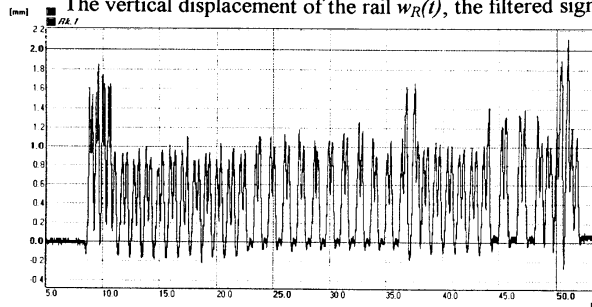
Obr. 4. Časové priebehy meranej vertikálnej odozvy trate pri prejazde osobného vlaku meraným priamym traťovým úsekom, $c = 115$ km/h
Fig. 4. Time histories of the measured vertical track response for the passenger train passage in a straight track section (out of rail welds) of the line, $c = 115$ km/h

Teplička III/2000 / The time history of the vertical track response for the freight train passage in a straight track section (out of rail welds), $c=57$ km/h.

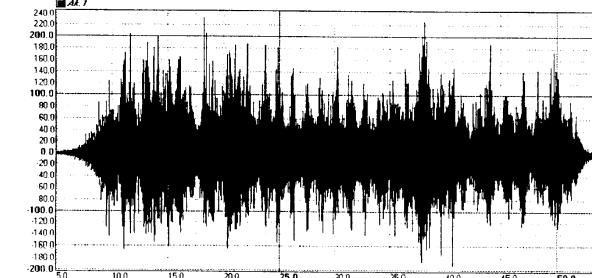
a) The direct dynamic interaction force a rail – a sleeper $F_{R-S}(t)$



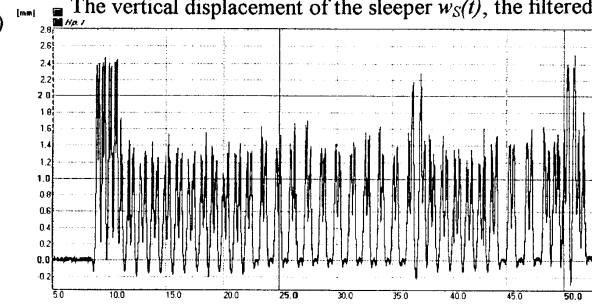
b) The vertical displacement of the rail $w_R(t)$, the filtered signal for $f \in (0-20\text{Hz})$



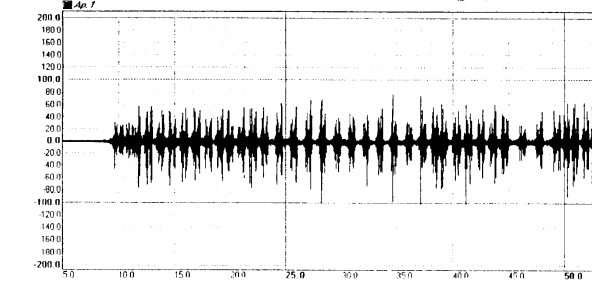
c) The vertical acceleration of the rail $\ddot{w}_R(t)$



d) The vertical displacement of the sleeper $w_S(t)$, the filtered signal for $f \in (0-20\text{Hz})$



e) The vertical acceleration of the sleeper $\ddot{w}_S(t)$



Obr. 5. Časové priebehy meranej vertikálnej odozvy trate pri prejazde nákladného vlaku v meranom priamom úseku trate, $c = 57$ km/h

Fig. 5. Time histories of the measured vertical track response for the freight train passage in a measured straight track section (out of rail welds) of the line, $c = 57$ km/h

rýchlosť $c = 115$ km/h. Vzorkovacia frekvencia $f_s = 100$ Hz. Frekvenčná analýza zodpovedá nízkofrekvenčnej odozve trate pre $f \in (0 - 100)$ Hz). Na obr. 6 sú prezentované vybrané priemerné spektrá odozvy zodpovedajúce prejazdu celého vlaku. Na obr. 7 a obr. 8 sú ukázané okamžité spektrá vybraných časových okien odpovedajúcich prejazdu lokomotívy a charakteristických podvozkov prejazdu meraného vlaku. Aplikovaná je analýza záznamov využitím modulu analýzy BK systému.

4.2. Stredne frekvenčná analýza odozvy trate

Analýzovaný je prejazd rovnakého osobného vlaku prechádzajúceho priamym úsekom trate ako v kap. 4.1, rýchlosť $c = 115$ km/h. Vzorkovacia frekvencia $f_s = 1600$ Hz. Frekvenčná analýza je aplikovaná na oblasť stredných frekvencií odozvy $f \in (1 - 800)$ Hz). Na obr. 9 a obr. 10 sú prezentované okamžité spektrá vybraných časových okien zodpovedajúcich prejazdu podvozku lokomotívy a podvozkov vagónov meraným miestom. Aplikovaný je modul analýzy BK systému.

5. Závery

Cieľom experimentálnych meraní bolo hodnotenie dynamickej reakcie koľajníc, podvalov a interakčných síl koľajnica/podval pri prejazde vlakov v prevádzkových podmienkach. V príspevku sú prezentované niektoré výsledky meraní a ich analýza pre prejazdy osobného vlaku.

- Časové záznamy vertikálnej odozvy komponentov trate – koľajníc, podvalov a interakčnej sily koľajnica-podval, ktoré dávajú základnú informáciu o vplyve dynamického zaťaženia na reakciu týchto komponentov. Ukazujú celkový vplyv prejazdu lokomotívy a osobných vagónov na dynamickú odozvu týchto komponentov. Zvolená vzorkovacia frekvencie f_s meraných signálov a rýchlosť prechádzajúcich vlakov sú hlavné faktory ovplyvňujúce amplitúdy meraných zrýchlení. Pre vzorkovaciu frekvenciu $f_s = 100$ Hz a rýchlosť vlakov $c = 100 \div 130$ km/h (osobné vlaky) amplitúdy vertikálnej odozvy dosahujú hodnoty:
 - Vertikálne zrýchlenia koľajnicových pásov $w_p \approx 150 - 350$ m/s².
 - Vertikálne zrýchlenia podvalov $w_s = 50 - 90$ m/s².
 - Vertikálne zrýchlenia povrchu štrkového lôžka $w_b = 0,2$ až 2 m/s².

Pre vzorkovaciu frekvenciu $f_s = 100$ Hz a pre rýchlosť pohybu vlakov $c = 100 \div 130$ km/h sa tieto hodnoty redukujú približne 12-krát.

- Amplitúdy vertikálnej interakčnej sily $F_{R-S} \approx 40 - 60$ kN.

Pre vzorkovaciu frekvenciu $f_s = 1000$ Hz a rýchlosť pohybu vlakov $c = 40 \div 60$ km/h (nákladné vlaky) amplitúdy vertikálnych zrýchlení sú tiež redukované.

Potom pre dobre udržiavanú trať sú vplyv rýchlosti a kvalita koľajových vozidiel najdôležitejšie faktory ovplyvňujúce dynamické chovanie systému vozidlo/trať.

sented. Sampling frequency $f_s = 1000$ Hz. The frequency analysis is made for low frequencies of the response, $f \in (0 - 100)$ Hz). In Fig. 6 there are chosen average spectra corresponding to the passage of the whole passenger train. In Figs. 7 and 8 there are instantaneous spectra of the chosen time windows corresponding to the passage of the locomotive and characteristic bogies of the measured passenger train. The analyser modulus of the BK system is applied.

4.2. The mid-frequency analysis of the track response

The same passenger train passage in a straight track section (out of rail welds), as in chapter 4.1, speed $c = 115$ km/h, is analysed. Sampling frequency $f_s = 1600$ Hz. The frequency analysis is made for mid frequencies of the response $f \in (1 - 800)$ Hz). In Figs. 9 and 10 there are instantaneous spectra of the chosen time windows corresponding to the passage of the locomotive bogie and the coach bogie through a measurement site. The analyser modulus of the BK system is applied.

5. Conclusion

The purpose of experimental measurements was to assess dynamic behaviour of the rail, sleepers and the interaction force the rail - the sleeper under the passage of trains in operational conditions. In this paper are presented some results of the measurement and their analysis for the typical passenger train passage only.

- Time histories of the vertical response of track components – rails, sleepers and the interaction force the rail – the sleeper, that give the basic information about the effect dynamic load on behaviour of these components. They show a total effect of the locomotive and coaches on the dynamic response of these components. The chosen sampling frequency f_s of the measured signals and the train speed influence absolute values of the measured acceleration considerably. For the sampling frequency $f_s = 1000$ Hz and the train speed $c = 100 \div 130$ km/h (passenger trains) peaks of the vertical response reach value:
 - Peaks of the vertical rail accelerations reach values $\ddot{w}_R \approx 150 - 350$ m/s²,
 - Peaks of the vertical sleeper accelerations reach values $\ddot{w}_S \approx 50 - 90$ m/s²,
 - Peaks of the vertical ballast accelerations reach values $\ddot{w}_b \approx 0,2 - 2$ m/s²,

For the sampling frequency $f_s = 100$ Hz and the train speed $c = 100 \div 130$ km/h these peak values are reduced approximately 12 time.

- The vertical peak interaction forces reach values $F_{R-S} \approx 40 - 60$ kN.

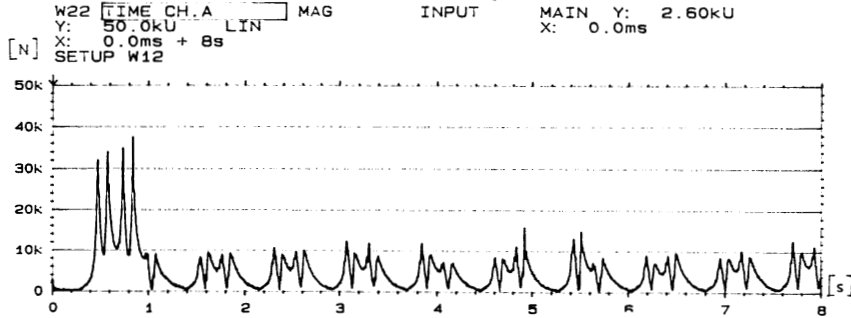
For the sampling frequency $f_s = 1000$ Hz and the train speed $c = 40 \div 60$ km/h (freight trains) vertical acceleration peaks of the response are reduced. Then on a well maintained track the train speed and a quality of vehicles are the most important factors affecting the dynamic behaviour of the vehicle/track system.

Teplička III/2000 / The vertical track response for the passenger train passage in a straight track section (out of rail welds), $c=115$ km/h.

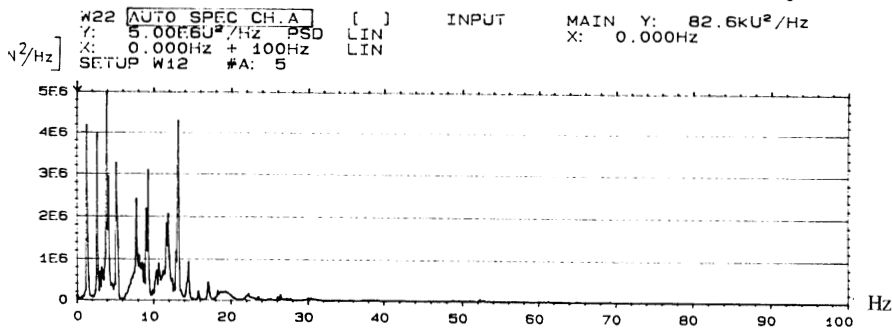
Analysis for the passage of the whole train - the low-frequency analysis $f \in \langle 1-100\text{Hz} \rangle$



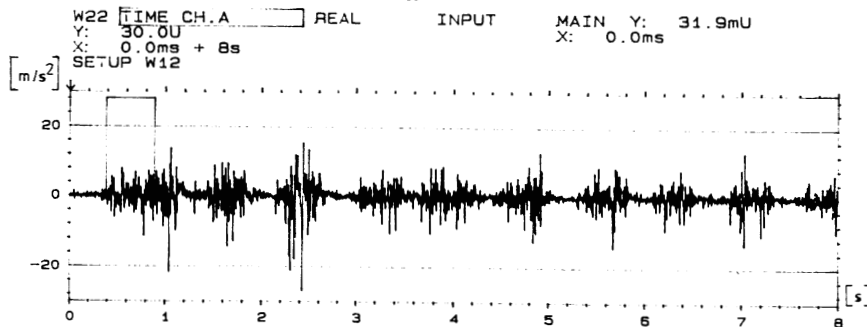
Vertical interaction force the rail – the sleeper F_{R-S}



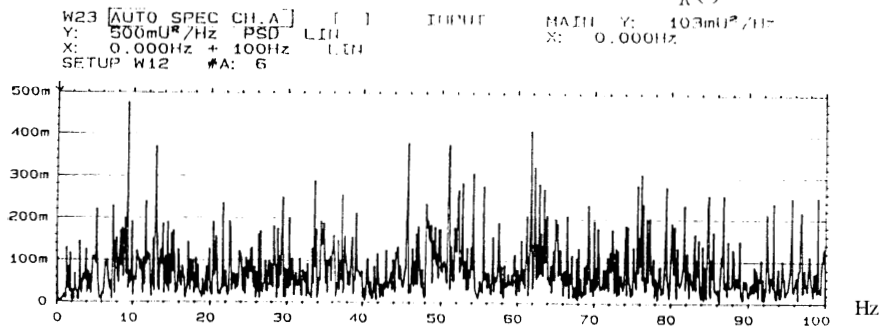
Frequency spectrum of the vertical interaction force the rail – the sleeper F_{R-S}

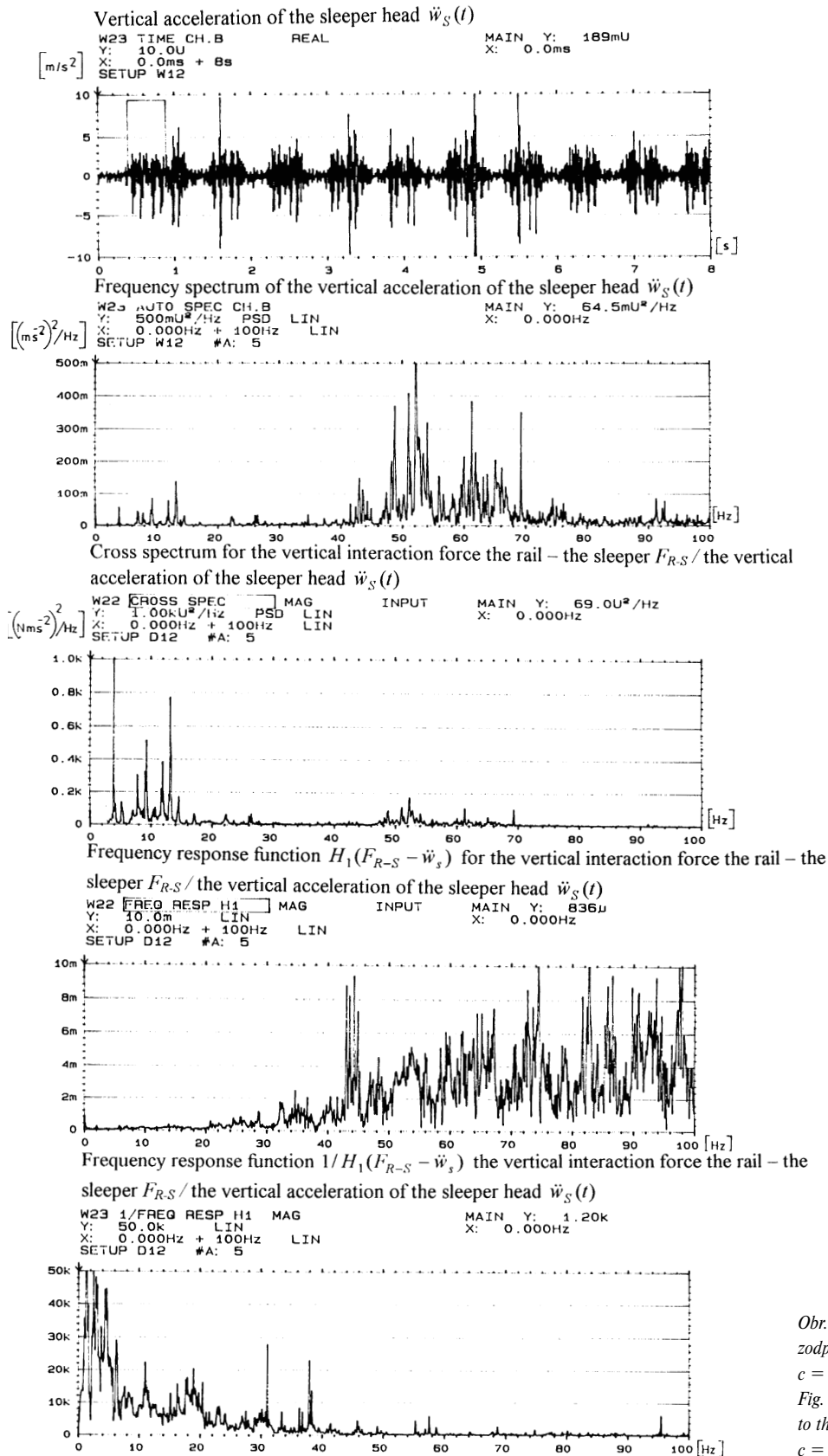


Vertical acceleration of the rail $\ddot{w}_R(t)$



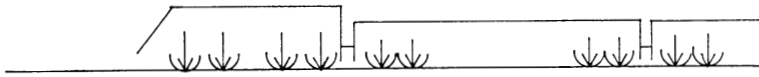
Frequency spectrum of the vertical acceleration of the rail $\ddot{w}_R(t)$



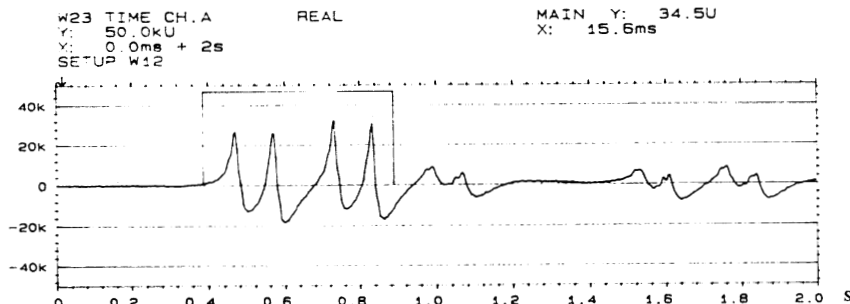


Obr. 6. Priemerované spektrá odozvy zodpovedajúce prejazdu celého vlaku, $c = 115$ km/h.
Fig. 6. Average spectra corresponding to the whole passenger train passage, $c = 115$ km/h

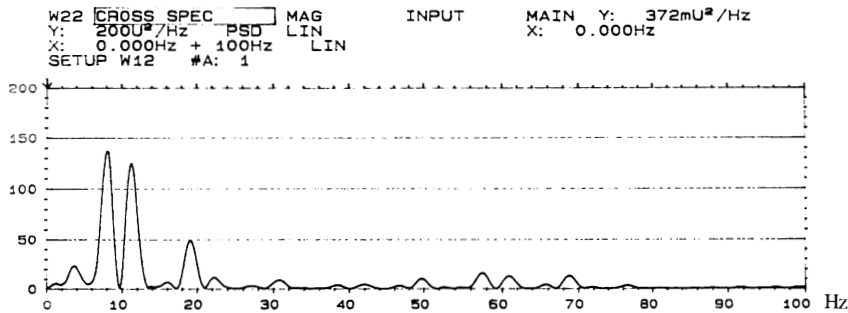
*Teplička III/2000 / The vertical track response for the passenger train passage in a straight track section (out of rail welds), $c=115$ km/h,
Analysis for the passage of the locomotive L350/85t - the low-frequency analysis $f \in \langle 1-100\text{Hz} \rangle$*



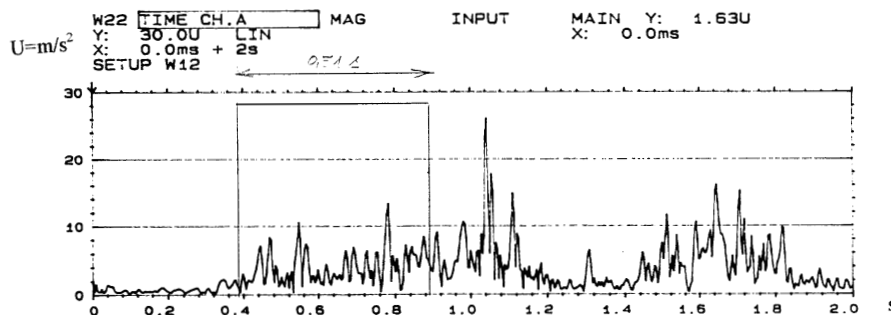
Vertical interaction force the rail – the sleeper F_{R-S}



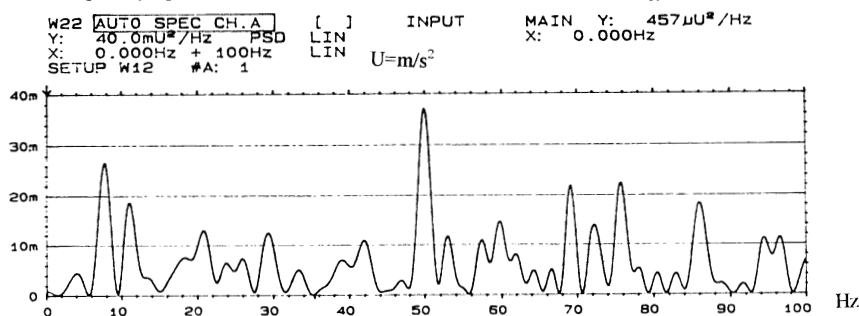
Frequency spectrum of the vertical interaction force the rail – the sleeper F_{R-S}



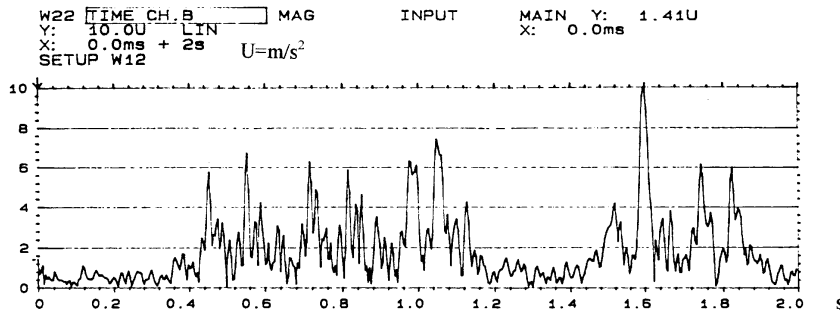
Vertical acceleration of the rail $\ddot{w}_R(t)$



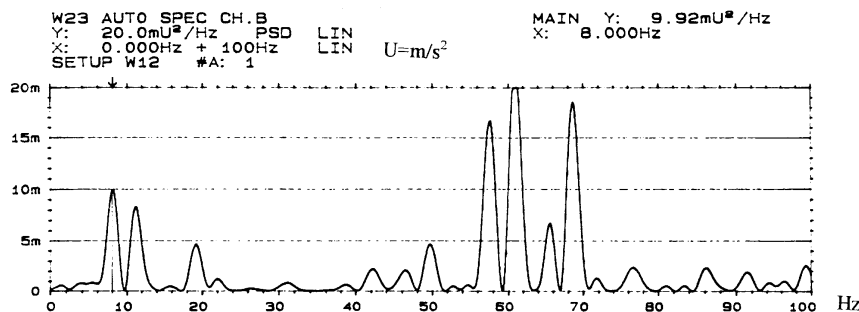
Frequency spectrum of the vertical acceleration of the rail $\ddot{w}_R(t)$



Vertical acceleration of the sleeper head $\ddot{w}_S(t)$



Frequency spectrum of the vertical acceleration of the sleeper head $\ddot{w}_S(t)$

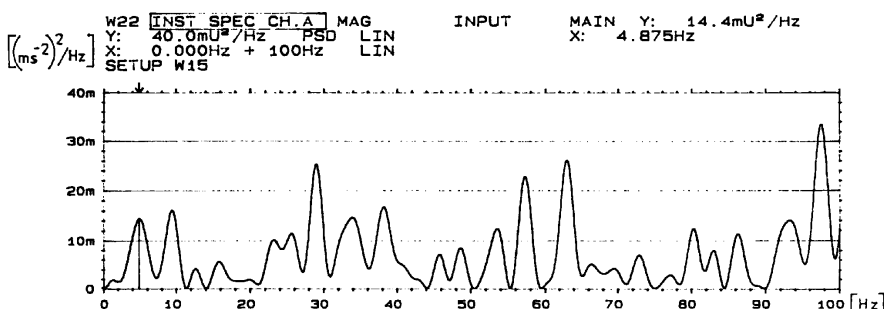
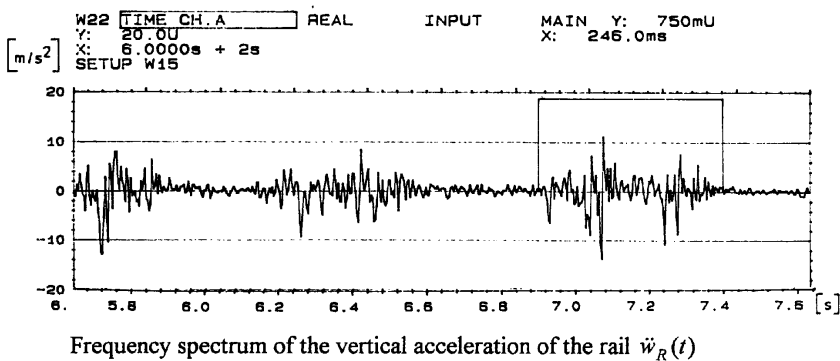
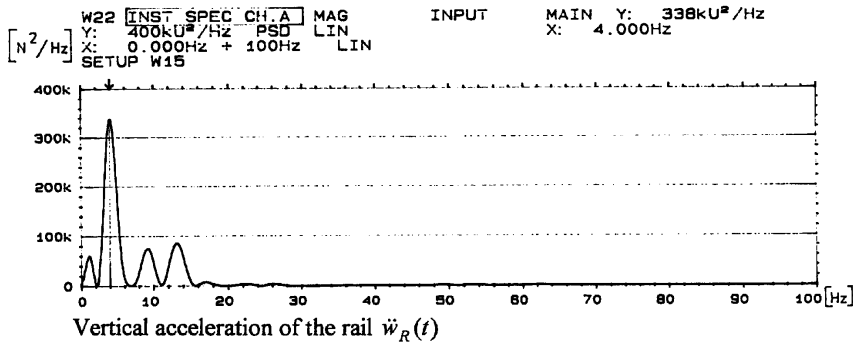
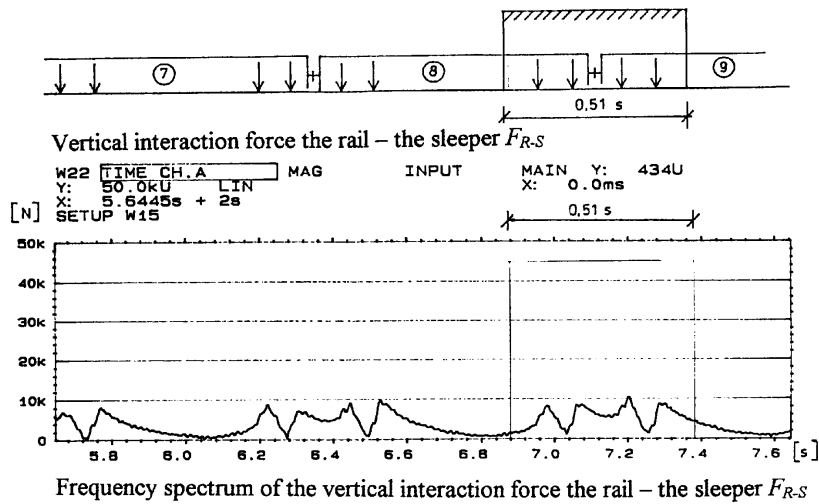


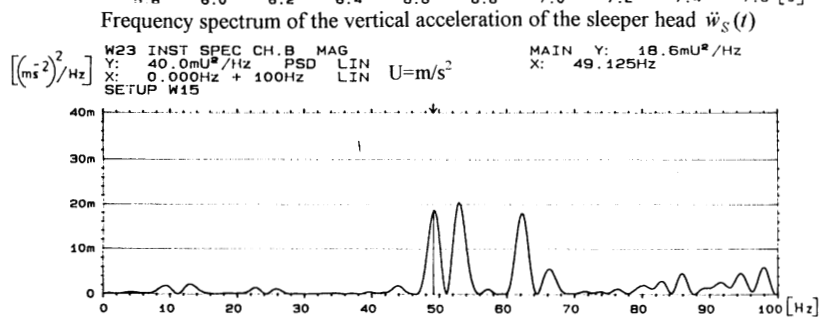
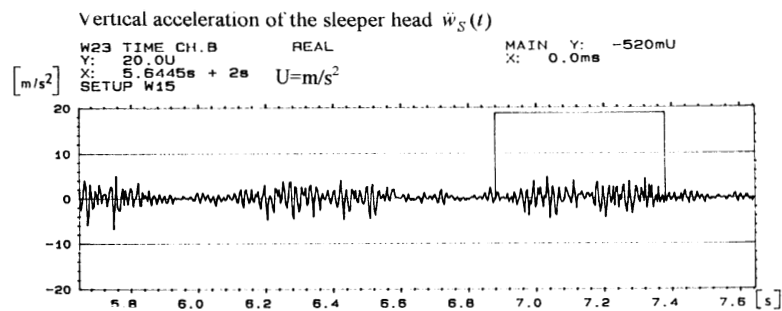
Obr. 7. Okamžité spektrá vybraných časových okien zodpovedajúcich prejazdu lokomotívy.

Fig. 7. Instantaneous spectra of the chosen time windows corresponding to the passage of the locomotive

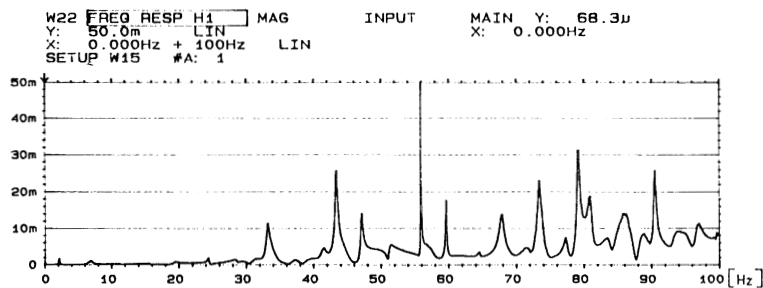
- Premiestnenia merané na koľajových pásoch a podvaloch potvrdzujú, že nápravy a podvozky prechádzajúcich vozidiel sú jasne identifikovateľné a sú proporcionálne dynamickým zaťažením vozidiel.
- Frekvenčná analýza zaznamenaných signálov dáva podrobné informácie o kmitaní komponentov trate a dáva obraz o koncentrácii energie na frekvenčné zložky. Pokiaľ dominantná frekvenčná skladba dynamických síl a priehybov koľajníc a podvalov zodpovedá nízkym frekvenciám $f \in (1 - 20 \text{ Hz})$, frekvenčná skladba zrýchlenia kmitania leží v oveľa širšej oblasti. Prítom stredné frekvencie zrýchlenia kmitania v oblasti $100 \text{ Hz} \div 500 \text{ Hz}$ hrajú dôležitú úlohu v dynamike trati.
- Frekvenčná analýza pre nízke frekvencie odozvy, $f \in (1 - 100 \text{ Hz})$:
 - Zrýchlenie vertikálneho kmitania koľajnicových pásov $\ddot{w}_R(t)$ má kvázi diskretné spektrum (spriemerované spektrá) rozdelené takmer rovnomerne, bez výrazných špičiek.
 - Zrýchlenie kmitania podvalov $\ddot{w}_S(t)$ má tiež kvázi diskretné spektrum ale rozdelené nerovnomerne s vrcholmi v oblasti frekvencií $f_{(1)} \approx 10 \text{ Hz}$ a $f_{(2)} \approx 50 \div 60 \text{ Hz}$.
 - Okamžité spektrá zodpovedajúce vybraným časovým oknám zrýchlenia koľajníc $\ddot{w}_R(t)$ a zrýchlenia podvalov $\ddot{w}_S(t)$ pre prejazd lokomotívy a podvozkov vagónov potvrdzujú výsledky analýzy prejazdu celého vlaku.
- Frekvenčná analýza pre stredné frekvencie odozvy, $f \in (1 - 800 \text{ Hz})$:
 - The displacements measured on rails and sleepers showed that individual axles and bogies of passage vehicles are clearly distinguished in displacement records and that they are proportional to the dynamic wheel load of passage vehicles.
 - The frequency analysis of recorded signals gives comprehensive information about the track component vibration and gives a picture of concentration of the energy on frequency components. While the dominant frequency composition of interaction forces and deflection of rails and sleepers corresponds to a low frequency range, say to $f \in (1 - 20 \text{ Hz})$, the frequency content of accelerations of these motions lies in a much wider frequency range. At the same time the mid-frequency range between $100 \text{ Hz} \div 500 \text{ Hz}$ plays an important role in the track dynamics. In this frequency range the track components – sleepers, pads, ballast and subsoil have a strong influence on the track system behaviour.
 - The frequency analysis for low frequencies of the response, $f \in (1 - 100 \text{ Hz})$:
 - The vertical rail acceleration \ddot{w}_R has a quasi discrete spectrum (average spectrum) distributed in a nearly uniform way.
 - The vertical sleeper acceleration \ddot{w}_S has a quasi discrete spectrum distributed in a non-uniform way with peaks at the frequencies $f_{(1)} \approx 10 \text{ Hz}$ and $f_{(2)} \approx 50 - 60 \text{ Hz}$.
 - Instantaneous spectra of the chosen time windows of the rail acceleration \ddot{w}_R and the sleeper acceleration \ddot{w}_S , corresponding to the passage of the locomotive and characteristic bogies of passenger trains, confirm the analysis results for the passage of the whole train.
 - The frequency analysis for mid frequencies of the response, $f \in (1 - 800 \text{ Hz})$:

Teplička III/2000 / The vertical track response for the passenger train passage in a straight track section (out of rail welds), $c=115$ km/h.
Analysis for the passage of characteristic coach bogies - the low-frequency analysis $f \in (1-100\text{Hz})$

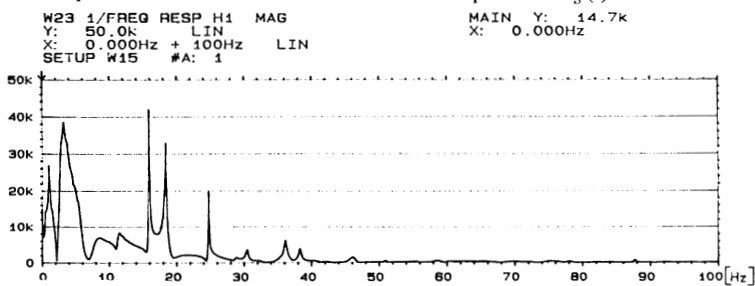




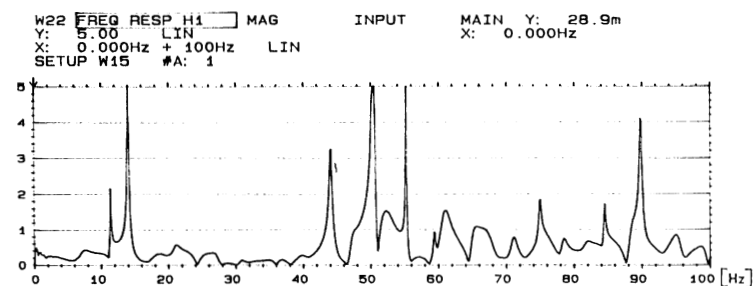
Frequency response function $H_1(F_{R-S} - \ddot{w}_S)$ for the vertical interaction force the rail – the sleeper F_{R-S} / the vertical acceleration of the sleeper head $\ddot{w}_S(t)$



Frequency response function $1/H_1(F_{R-S} - \ddot{w}_S)$ the vertical interaction force the rail – the sleeper F_{R-S} / the vertical acceleration of the sleeper head $\ddot{w}_S(t)$

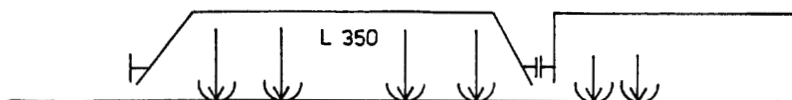


Frequency response function $H_1(F_R - \ddot{w}_S)$ for the vertical acceleration of the rail $\ddot{w}_R(t)$ – the vertical acceleration of the sleeper head $\ddot{w}_S(t)$

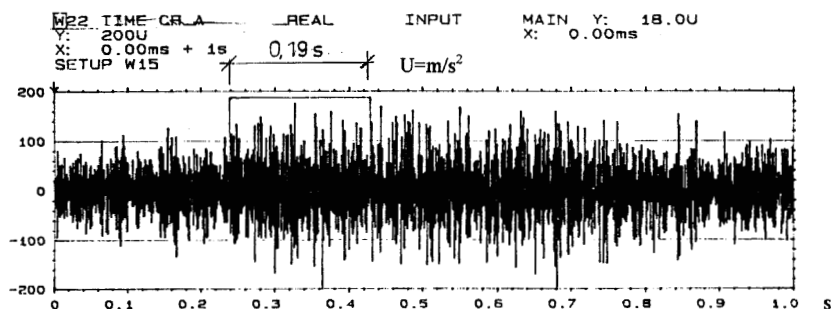


Obr. 8. Okamžité spektrá vybraných časových okien zodpovedajúce prejazdu charakteristických podvozkov vagónov osobného vlaku
 Fig. 8. Instantaneous spectra of the chosen time window corresponding to the passage of characteristic coach bogies of the passenger train

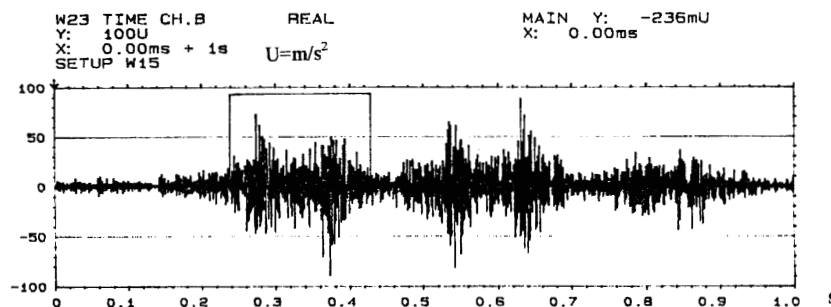
Teplička III/2000 | The vertical track response for the passenger train passage in a straight track section (out of rail welds), $c=115$ km/h,
Analysis for the passage of characteristic locomotive bogies - the mid-frequency analysis
 $f \in (1-800\text{Hz})$



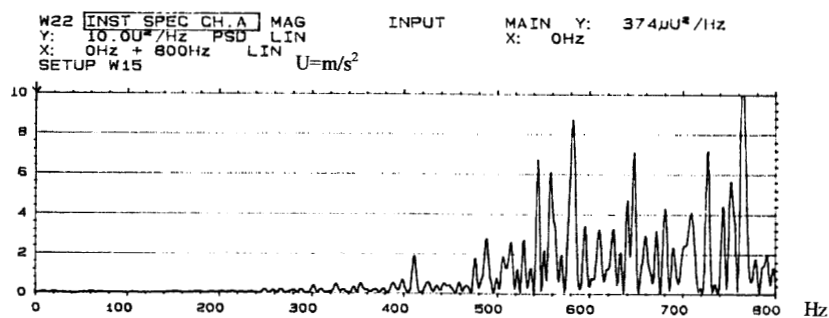
Vertical acceleration of the rail $\ddot{w}_R(t)$



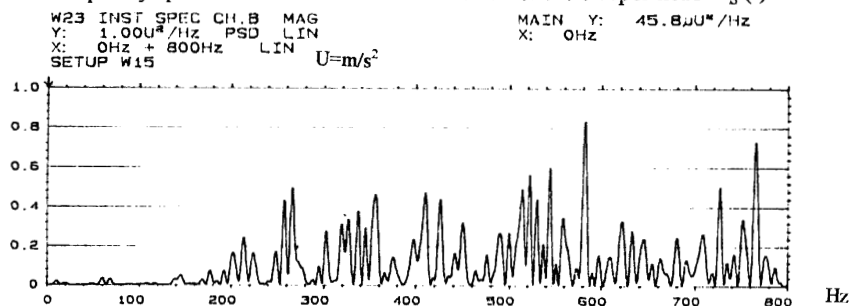
Vertical acceleration of the sleeper head $\ddot{w}_S(t)$



Frequency spectrum of the vertical acceleration of the rail $\ddot{w}_R(t)$



Frequency spectrum of the vertical acceleration of the sleeper head $\ddot{w}_S(t)$

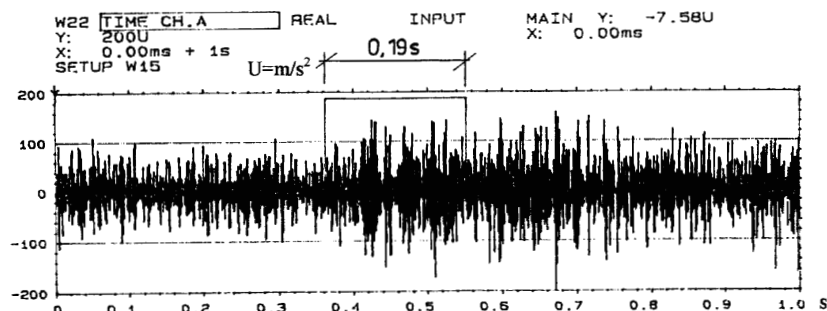


Obr. 9. Okamžité spektrá vybraného časového okna zodpovedajúceho prejazdu podvozku lokomotívy
Fig. 9. Instantaneous spectra of the chosen time window corresponding to the passage of the locomotive bogie

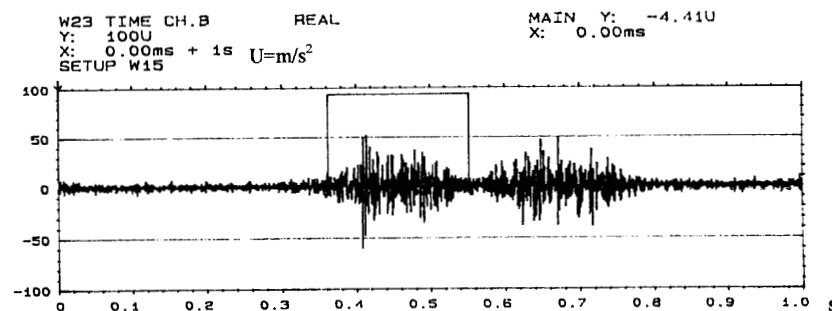
*Teplička III/2000 / The vertical track response for the passenger train passage in a straight track section (out of rail welds), $c=115$ km/h.
Analysis for the passage of characteristic coach bogies - the mid-frequency analysis $f \in \langle 1-800\text{Hz} \rangle$*



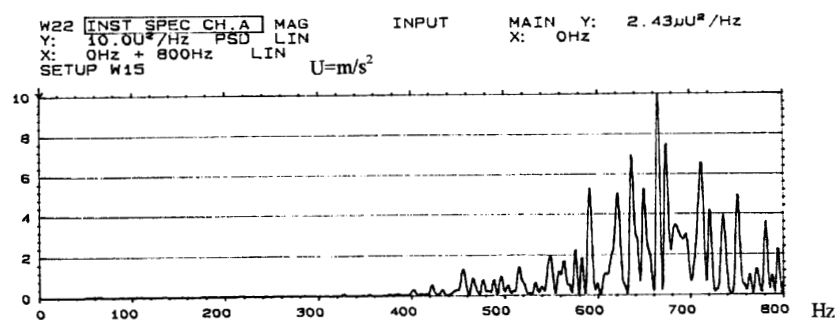
Vertical acceleration of the rail $\ddot{w}_R(t)$



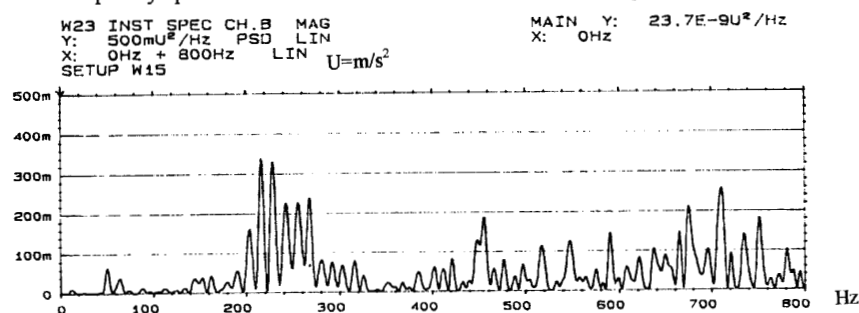
Vertical acceleration of the sleeper head $\ddot{w}_S(t)$



Frequency spectrum of the vertical acceleration of the rail $\ddot{w}_R(t)$



Frequency spectrum of the vertical acceleration of the sleeper head $\ddot{w}_S(t)$



*Obr. 10. Okamžité spektrá vybraného časového okna zodpovedajúceho prejazdu charakteristických podvozkov osobných vagónov
Fig. 10. Instantaneous spectra of the chosen time window corresponding to the passage of the characteristic coach bogie of the passenger train*

- Okamžité spektrá vybraných časových okien zrýchlenia kmitania koľajníc $\ddot{w}_R(t)$ majú tiež kvázi diskkrétne spektrum s dominantnými zložkami na frekvenciách v oblasti $f \approx 600 \div 700$ Hz.
- Okamžité spektrá vybraných časových okien zrýchlenia kmitania podvalov $\ddot{w}_S(t)$ má tiež diskkrétne spektrum s dominantnými frekvenciami v pásme $f_{(2)} \approx 400 \div 700$ Hz.
- Instantaneous spectra of the chosen time windows of the vertical rail acceleration \ddot{w}_R have a quasi discrete spectrum (average spectrum) with dominant components on frequencies $f \approx 600 - 700$ Hz.
- Instantaneous spectra of the chosen time windows the sleeper acceleration \ddot{w}_S have a quasi discrete reduced spectrum with dominant components on frequencies $f_{(1)} \approx 200 - 300$ Hz and distributed in a nearly uniform way for $f_{(2)} \approx 400 - 700$ Hz.

Literatúra - References

- [1] *Dual Channel Signal Analyser BK Type 2032*, B&K Denmark 1987.
- [2] RANDALL, R. B., TECH, B.: *Frequency analysis*, B&K Manual.
- [3] MORAVČÍK, M.: *Experience in railway track testing for validation of theoretical dynamic analysis*. Proc. Communication on the edge of millenniums, EDIS Žilina 1998.
- [4] MORAVČÍK, M.: *Vertical Dynamic Vehicle/Track Interaction - Simulation and experimental testing*. Proc. MTU Dnepropetrovsk 2000, Vol.6.