

Jan Kout, Rudolf Kaloč

K problematice hluku kolejového vozidla

klíčová slova: *kolejová vozidla, hluk, emise akustické energie, infrazvuk, kontakt kolo-kolejnice*

1. Je železniční kolo dominantním zdrojem nežádoucího hluku?

Zvýšený zájem o zcela nové konstrukce železničních kol je vesměs zdůvodňován požadavkem snížení hluku při provozu železničních kolejových vozidel. Jde o hluk, jehož iniciace pochází z místa styku kola s kolejnicí, takže kolo, resp. dvojkolí, jsou prvním prostředím, kterým se akustická energie šíří do soustavy vozidla. Je s podivem, jak často se všeobecně předpokládá, že dominantním zdrojem hluku kolejového vozidla je kolo samotné.

Ve skutečnosti je nezbytné vnímat celou soustavu, která je dvojkolím "nesena". Tato soustava se stává velmi účinným zdrojem hluku, jelikož je s dvojkolím pevně spojena prostřednictvím kovových pružných prvků. U kovových materiálů dochází k minimálnímu přirozenému útlumu. To má za následek možnost velkého zesílení všech rezonančních složek kmitání celé konstrukce, která u vozidla, díky velkým rozměrům může, téměř beze ztrát, vyzařovat akustickou energii do okolního vzduchu. Tuto energii pak lidské ucho vnímá jako nežádoucí hluk.

Ještě zdůrazněme, že z hlediska šíření a vyzařování hluku je nejdominantnější ohybové vlnění (kmitání) konstrukce, kdy částice materiálu kmitají v kolmém směru k povrchu. Takto dochází k přenosu energie do okolního prostředí. Tento fyzikální poznatek je jedním z důkazů, že samotné železniční kolo, vesměs představující kompaktní konstrukční prvek, nemůže být výrazným vysílačem hlukové energie. Nebude se zřejmě ani významně podílet na vzniku hluku aerodynamickými efekty, jenž vznikají při obtékání vzduchu kolem vozidla pohybujícího se v atmosférickém prostředí.

Hluky od turbulence obtékaných těles jsou z hlediska emitovaných výkonů silně závislé na velikostech těchto těles; mohou, jak bude poznamenáno v další části tohoto příspěvku, spadat i do oblastí hluků nízkofrekvenčních, tj. do oblastí infrazvuku.

Pokud se zmíníme o jiném zdroji hluku, např. o hluku, který je vyvoláván veškerými agregáty trakčního vozidla, je třeba říci, že jeho emise je přímo závislá na zesilujících účincích skříně vozidla a prakticky invariantní vzhledem k existenci dvojkolí.

Máme-li definovat žádoucí fyzikální vlastnosti dvojkolí z hlediska hlukových efektů, lze formulovat dvě zásady pro jeho konstrukci:

1. Potlačit takové tvary kmitání, aby byl minimalizován účinek dvojkolí jako zářiče zvuku.
2. Kolo vytvořit jako soustavu, která je schopna omezit tok energie, vznikající na kontaktu kola s kolejnicí, do neseného vozidla.

Prof. Ing. Rudolf Kaloč, CSc., nar. 1932. Absolvent VŠB Ostrava, fakulta strojní, obor strojírenství. Akademická hodnost získána v r. 1991. Vědecká hodnost získána v r. 1964. Zaměřen na obor teoretická a aplikovaná mechanika, analýza strojních zařízení. Zaměstnan na DFJP Univerzity Pardubice jako vysokoškolský profesor.

Ing. Jan Kout, CSc., nar. 1940. Absolvent VŠD 1963, specializace konstrukce kolejových vozidel. Vědecká hodnost získána v r. 1987. Zaměřen na problematiku mechaniky kontinua, materiálového inženýrství a zkoušení materiálů. Zaměstnan u VÚŽ, vedoucí Zkušební laboratoře ZL8 a oblasti materiálů a technologie.

K bodu 1 podotkněme, že u klasické koncepce celooceľového železničního kola má konstruktér do jisté míry možnost, volbou tvaru desky, ovlivňovat jeho modální vlastnosti, a to především se záměrem vyloučit, jisté módy ohybového kmitání desky. Přitom musí respektovat skutečnost, že kmitající kolo je “unášeno” nápravou, která ohybově kmitá.. Jde tedy v podstatě o modální analýzu celého dvojkolí.

Četné modální analýzy, které byly provedeny [1], prokazují, že nejnižší modální frekvence klasických kol začínají u hodnoty cca 2000 Hz; to je hodnota, na kterou je lidský sluch velmi citlivý (leží v rozsahu 2000 ÷ 5000 Hz). Kmitočtová závislost lidského sluchu je výraznější při nízkých hladinách akustického tlaku (dB). Tlakové změny vyvolané příčně kmitající deskou kola však nebudou výrazné z důvodů malých velikostí amplitud kmitání. Kolo **není**, jako zářič zvuku a z hlediska lidského vjemu zvuku, **dominantním problémem**.

Podstatný problém je výše formulován **bodem 2**. Celooceľové kolo, jakkoliv tvarované, **není** v principu **schopné** omezit tok energie směrem od kontaktu s kolejnicí, do vozidla. Důvod tkví ve skutečnosti, že nepředstavuje diskontinuitní soustavu z hlediska materiálového. Tím **je zbaveno možnosti, zvětšit odpor proti prostupu energie směrem k nesenému vozidlu**.

Pro orientační ocenění materiálových diskontinuit při přenosu energie, naznačme úvahu, jež je založena na popisu postupujícího vlnění v jednorozměrném prostředí, složeném z různých materiálů; konkrétně v posloupnosti **ocel** (obruč kola), **hořčíková slitina** (deska kola), **ocel** (náboj kola). Vzniká tak materiálová soustava se **dvěma diskontinuitami**. Prochází-li jí silový, jednotkový impuls, lze na základě jednorozměrné vlnové teorie odvodit vztah pro celkový součinitel přestupu akustické energie [2],[3]:

$$D = 2.10. \log \frac{1}{d} \quad [\text{dB}]$$

kde

$$d = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

Pro ocel ($E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$; $\gamma = 7,8 \cdot 10^4 \text{ Nm}^{-3}$) a gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ obdržíme

$$Z_1 = \sqrt{\frac{E \cdot \gamma}{g}} = \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 7,8 \cdot 10^4}{9,81}} \cong 4,0 \cdot 10^7 \text{ Nsm}^{-3}$$

Pro hořčíkovou slitinu (podle ČSN 424911) obdržíme

$$Z_2 = \sqrt{\frac{0,62 \cdot 10^{11} \cdot 1,8 \cdot 10^4}{9,81}} \cong 1,0 \cdot 10^7 \text{ Nsm}^{-3}$$

Součinitel přestupu akustické energie má tedy hodnotu

$$d = 0,64$$

a přenosový útlum pak, vlivem dvou následných materiálových diskontinuit, činí

$$D = 2.10. \log 1,563 = 3,88 \text{ dB}$$

Pro celooceľové kolo je $Z_1 = Z_2$, takže $d = 1,0$

a

$$D = 2.10. \log 1 = 0 \text{ dB}$$

Nepřítomnost materiálové diskontinuity znamená nulovou hodnotu přenosového útlumu. To je zásadní nevýhoda celooceľových kol z hlediska přenosu energie od styku kola s kolejnicí do vozidla. Proto také snahy po úpravách tvaru desky celooceľového kola, z tohoto hlediska, mají **nulový význam**.

1.1 Závěr.

Klasické ocelové železniční kolo není dominantním zdrojem hluku a zároveň není schopno zabránit toku energie od styku kola s kolejnici do vozidla. Tuto úlohu může splnit jen kolo kompozitní, tj. kolo s materiálovými diskontinuitami.

2. Kompozitní kolo vyvinuté v ČR

V ČR byla, na Univerzitě v Pardubicích, vyvinuta konstrukční varianta kompozitního kola (obr.1). Projekt výzkumu byl iniciován a financován podnikem Železářny a drátovny Bohumin, a.s.. Prototypy byly realizovány v ČKD Hradec Králové, a.s. za výpočtové podpory Laboratoře LENAM, s.r.o., Liberec a montážními a zkušebními pracemi VÚŽ Praha, oblast materiálů a technologie.

Numerickým modelováním odezvy kola na statické zatížení byla vyhledána optimální tvarová varianta hořčikové skořepinové desky 2 a centrálního disku 3. Klasická obruč 4 je na desku natažena za tepla. Nábojová část 5, 6 je vytvořena jako předepjatý, válcový, lisovaný spoj s ohledem na dodržení předepsaných (Vyhláškou UIC) lisovacích podmínek na sedle nápravy 1.

Materiálová diskontinuita je u této koncepce realizována na průměrech 280 mm a 800 mm. Celková dissipace odraženého a prostupujícího vlnění je posílena porézní hmotou 12, která vyplňuje vnitřní dutinu skořepinové desky kola.

2.1 Závěr

Hlavním záměrem navržené koncepce kompozitního kola bylo vytvořit diskontinuítní soustavu, obsahující uzavřené prostředí vyplněné porézní hmotou, která zajišťuje dissipaci procházející energie. Porézní hmota zároveň snižuje amplitudy ohybových kmitů desek vytvářejících skořepinu. Tím snižuje zvukový zdroj kola vznikající komprimací okolního vzduchového prostředí.

3. Poznámky k jiným akustickým prostředkům snižování hluku

Fenomén “tichého” kola evokoval vznik různých mechanických tlumičů, které jsou vytvářeny připojením ohybově poddajných, osově symetrických deskových útvarů. Jejich tlumicí funkce je obvykle vysvětlována procesem ovlivnění modálního spektra kola ve smyslu potlačení jistého rozsahu slyšitelných kmitočtů. Skutečnost je však poněkud odlišná.

S ohledem na relativně malou ohybovou tuhost desky (tlumiče) a způsob jejího upevnění v oblasti věnce kola (v podstatě nedokonalé vetknutí po obvodu), nejsou vytvořeny fyzikální podmínky pro zmíněné ovlivnění. Naopak, je potencionálně vytvořeno prostředí pro vznik nového spektra níže položených frekvencí. “Tlumič” se za jistých okolností může stát novým zdrojem hluku. Problém tkví v aplikaci tzv. poklepových zkoušek a ve způsobu jejich vyhodnocení. Vyhodnocování je založeno na tzv. frekvenčním přenosu

$$[\alpha(f)]^2 = \frac{S_x(f)}{S_F(f)} \quad [s^2kg^{-1}]$$

kde $S_x(f)$ [m^2] je výkonová spektrální hustota výchylek kmitání, $S_F(f)$ [N^2] je výkonová spektrální hustota poklepové budící síly. Dále bývá zaváděn pojem inertance $A(f)$, která vyjadřuje poměr zrychlení vybuzeného kmitání k budící rázové síle

$$A(f) = 2\pi \cdot f \cdot \alpha(f) \quad [ms^{-2}N^{-1}]$$

Definované veličiny jsou vhodné pro srovnání tlumících vlastností různých typů kol, přičemž pozitivně se jeví konstrukce s nejmenší hodnotou $\alpha(f)$ [4].

Poklepové zkoušky však stěží mohou podat objektivní důkaz o vhodnosti přidavných deskových tlumičů. Lze totiž dokázat, že dynamická odezva dvou mechanicky spojených pružných soustav se vzdálenými frekvenčními spektry vlastních kmitání (kompaktní kolo + ohybově poddajný deskový tlumič) je jiná v procesu přechodového kmitání (poklep) a jiná v podmínkách kvaziustáleného buzení (jízda vozu).

Jelikož nelze v tomto příspěvku důkaz rozvíjet, uvádíme (kvalifikovaný čtenář necht' promine) pouze ilustrativní přír. 1.

Všimněme si hráče na tympán, který po úderu utlumí zvuk nástroje lehkým dotykem prstů na povrch kmitající membrány. Nicméně, v průběhu rytmického bubnování (kvaziustálené buzení), bude nástroj, i přes podobný a trvalý dotek, znít.

Deskové tlumiče patří do skupiny pohltivých konstrukcí. Ovšem pouze za jistých podmínek. Součinitel pohltivosti α , vyjadřující útlum, se pohybuje v rozmezí $0 \leq \alpha \leq 1$, přičemž číslem 1 je charakterizováno prostředí s maximální pohltivostí. Pohltivost α je však silně závislá na vlastním kmitočtu tlumiče. Pro ilustraci je na obr.2 zakreslena kmitočtová závislost součinitele α pro čtvercovou desku o modulu pružnosti E , Poissonově čísle μ , hmotnosti m , měrné hmotnosti ρ a rychlosti c šíření akustické vlny. Vlastní kmitočet desky je dán vztahem [2]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \cdot c^2 \cdot a \cdot b}{m \cdot d} + \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot b}{m} \left[\left(\frac{p}{a} \right)^2 + \left(\frac{q}{b} \right)^2 \right]} \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \mu^2)}$$

kde $p; q = 1, 2, 3, \dots$ jsou řady příslušných vlastních kmitů.

Z průběhu závislosti α na f uvedeném na obr. 2 je patrné, že maximum pohlcování energie existuje jen v úzké oblasti nízkých kmitočtů. To je základní úskalí deskových tlumičů. Navíc se pro jeho účinnou funkci předpokládá, že prostor o výšce d je vyplněn porézní hmotou (nikoliv jen vzduchem).

Dalším prostředkem pro snižování hluku bývá aplikace pryžových vložek. Všimněme si jen vlivu tloušťky h , pryžové vložky. V jednorozměrném prostředí lze útlum D vyjádřit rovnicí

$$D = 20 \log \frac{\pi \cdot h \cdot E}{c_p \cdot E_p} \cdot f \quad [\text{dB}],$$

kde E_p je modul pružnosti pryže a c_p je vlnová rychlost. Vzhledem k malé hodnotě E_p (ve srovnání s modulem pružnosti E pro ocel) jsou vlnové délky při vyšších frekvencích srovnatelné s rozměrem h . Útlum pryžové vložky tak klesá na nulu, přenos energie je bezztrátový. Zjednodušeně můžeme konstatovat, z hlediska snižování hluku, možnou malou účinnost pryžové vložky v konstrukci železničního kola.

3.1 Závěr

Uvedené úvahy poukazují na problematičnost deskových i pryžových prvků od nichž se očekává pozitivní efekt tlumení hluku. V případě deskových tlumičů je jejich proklamovaný pozitivní účinek silně zkreslen použitím zavádějící poklepové zkoušky.

4. O problémech analýzy styku kola s kolejnicí, nezbytnost experimentů

Styk kola s kolejnicí je dosud neprobádanou oblastí, v níž se odehrávají fyzikální děje související s makro a mikrodeformacemi v relativně malém objemu. Deformační stavy, které zde vznikají jsou mimo jiné silně závislé na stavu povrchu, který je fyzikálně realizován mezní vrstvou tvořící rozhraní mezi kolem a kolejnicí. Tato mezní vrstva obsahuje obvodový stykový pás odvalujícího se kola, přičemž jeho okamžitá šířka je obecně veličinou náhodnou, stochastickou. Běžně používaná představa statické stykové plošky (Hertzovo pojetí) je představou neúnosnou, jelikož adekvátní deformační stavy v kontaktních objemech naprosto neodpovídají odvalujícímu se kolu. Kolo při svém pohybu vykonává složený pohyb se všemi důsledky vzniku okamžitých a jednoznačně orientovaných skluzových sil v rovině stykového pasu.

Na tuto skutečnost je nezávisle upozorňováno i tvůrci programových systémů numerické simulace v souvislosti s kontaktní tvarovou optimalizací. Vyplývá, že výpočet kontaktní úlohy vyžaduje zadání věrohodných parametrů kontaktního rozhraní (např. normálová a tečná tuhost rozhraní, povolená penetrace atd.). Např. v programu ANSYS se kontaktní úlohy řeší iterováním po nalezení kontaktního rozhraní. Základním prostředkem popisu podmínek *nepromítnutí*, ev. podmínek třecích sil jsou parametry kontaktních elementů. Podobně je realizováno řešení kontaktních úloh v jiných programových systémech (NASTRAN, MARC, COSMOS aj.). Podle [5] není vždy u těchto algoritmů vypracována spolehlivá konvergenční teorie. Dá se tedy usuzovat na to, že se i u zavedených standardních komerčních programů objevují prvky zaostávání proti současné potřebě inženýrské aplikace.

Hlavní potíží při numerické simulaci kontaktu zřejmě spočívá ve skutečnosti, že variační nerovnice popisující chování deformovatelných těles (zobecnění Lagrangeova principu minima potenciální energie) vedou na množiny přípustných funkcí (vzhledem k nimž je minimalizován funkcionál), které mají nelineární strukturu. Tělesa nemohou vzájemně *pronikat*, mohou mezi nimi působit jen tlaková napětí.

Další komplikace vznikají při respektování vlivu třecích sil v mezní vrstvě, ať již v podobě Coulombova tření nebo v případě tření viskozního. Aplikace viskozního odporu v mezní vrstvě je velmi významná, jelikož znamená možnost modelově suplovat vznik tepelných efektů v kontaktní zóně, které byly prokázány experimentálně i teoreticky [6]. Nelze totiž očekávat, že bude numerickou simulací, v dohledné době, úspěšně řešena termoelastická teorie kontaktu.

Výše uvedený nástin problémů teoretického řešení poukazuje na nezbytnost experimentálního studia kontaktu. Proto se pracovníci Dopravní fakulty Jana Pernera, Univerzity Pardubice, rozhodli k projektování a realizaci speciálního testovacího stroje. Jeho princip je patrný z obr. 3.

Testované kolo 1 je v kontaktu s rotující kolejničí 2. Kolová síla je vyvozována hydraulickým válcem 11. Kolejnice 2 je přes převodovou skříň poháněna regulovatelným elektromotorem 5. Tok výkonu přes kontakt těles 1 a 2 je regulován zátěžovým dynamometrem 8 (motor skluzu). Relativní pohyby v kontaktu jsou vyvozovány pomocí válců 10 a 12 (příčný pohyb, spin). Projektované zařízení může plnit tři funkce:

- brzdový stav (kolo 3, bržděné špalíky, 4 - kotoučová brzda)
- adhesní stav (tok výkonu přes 5, 6, 2, 1, 24 a 8)
- studium opotřebení materiálu (principiálně podobné zkouškám na strojích AMSLER) a studium příčin poruch v jízdni ploše

Měření teplot ve styku kola s kolejničí, při nastaveném režimu zatěžování a režimu relativních pohybů, lze očekávat získání údajů potřebných k vysvětlení termodynamických procesů v kontaktní zóně, jejichž existence již byla nepřímo prokázána v zahraničí [8] i v ČR [6].

4.1 Závěr

Metody numerické simulace pomocí existujících programových systémů, mají své nedořešené problémy a zřejmě žádají dopracování nových algoritmů, např. formou implementace v rámci programu ANSYS Úplné řešení problémů kontaktu kolo-kolejnice si však nezbytně vyžaduje experimentální výzkum pomocí speciálního testovacího zařízení.

5. Expozice nízkofrekvenčního hluku železničním vozidlem

Ekologické problémy související s hlukem železničního kolejového vozidla byly podrobně studovány v [7]. Tato unikátní práce je především zaměřena na fyziologii účinků infrazvuku, tj. mechanického vlnění v plynném prostředí, o frekvenci nižší než 20 Hz. Bylo spolehlivě zjištěno, že se na stanovišti strojvedoucího lokomotiv řady 163, 363, 362 a 372 při jízdě rychlostí vyšší než 70 km/hod, vyskytuje infrazvuk. Tento jev je ve zprávě [7] vysvětlován aerodynamikou obtokové charakteristiky vozidla. Toto vysvětlení je podepřeno zjištěním, že při zvyšování rychlosti jízdy dochází k prudkému vzrůstu hladin infrazvuku (obr.4). Hlavní podíl na vzniku tohoto škodlivého jevu má zejména nevhodný tvar čelní plochy trakčního vozidla (loko ř. 363 a další). Emisi infrazvukové energie nelze však vyloučit ani z jiných částí trakčního i vlečeného vozidla. Uvědomíme-li si, že frekvence vlnivých pohybů dvojkolí se pohybuje v pásmu infrazvuku [6], lze předpokládat, že emitorem infrazvuku je i kontakt kolo-kolejnice.

Z hlediska ekologického je si nutno uvědomit nebezpečí tohoto akustického efektu, který je neslyšitelný, tj. člověk není pro jeho percepci vybaven příslušným smyslovým orgánem. U strojvedoucích sledovaných elektrických lokomotiv byly objektivně prokázány poruchy zdraví. Pro potřeby biologického výzkumu je třeba vědět, že pro infrazvuk jsou typické dlouhé vlnové délky, které evokují homogenní akustické pole, tzn. že na člověka působí celotělovým účinkem. U senzitivních jedinců může infrazvuk vyvolat projevy poruchy statiky, orgánovou rezonanci, jejímž důsledkem mohou být lokální mechanická dráždění nervových zakončení.

Jestliže připustíme, že změny tlaku okolní atmosféry s frekvencí nižší než 20 Hz působí na povrch celého těla, je otázkou citlivosti a lokalizace příslušného percepčního orgánu, kdy a jak začne reagovat. Např.

zvuk o hladině 120 dB působí tlakem 20 Pa. Baroreceptory v těle vyvolávají odezvu již při tlakové změně 0,1 Pa. Zdroje infrazvuku 140 ÷ 150 dB jsou již životu nebezpečné.

5.1 Závěr

Pro potřeby provozu ČD by měl být poznatek možného akutního a chronického poškozování zdraví alarmující. Akustické studie vozidel by se měly stát běžnou součástí diagnostiky a motivem k zamyšlení pro konstruktéry vozidel.

6. Shrnutí

Akustická energie vyzařovaná kolejovým vozidlem do prostředí, v němž se pohybuje, a již lidské smysly vnímají jako nežádoucí hluk, má řadu možných zdrojů. Jedním z primárních zdrojů hluku je místo styku kola s kolejnicí. Dvojkolí je potom prvním prostředím, kterým se šíří akustická energie do mechanické soustavy, kterou je kolejové vozidlo. Pokud jsou železniční kola bez materiálových diskontinuit, nejsou v principu schopna omezit tok energie směrem od kontaktu kolo - kolejnice do konstrukce vozidla ⇒ hodnota přenosového útlumu je nulová. Právě materiálové diskontinuity mohou být prostředkem k získání potřebné, nenulové, hodnoty přenosového útlumu. Jiné druhy akustických prostředků používaných v konstrukci železničního kola, které je prosto materiálových diskontinuit, jsou dle názoru autorů problematické. U deskových tlumičů jejich účinnost jen v úzké oblasti nízkých kmitočtů, u pryžových vložek jejich reálně proveditelná (v konstrukci železničního kola) tloušťka, která je limitujícím faktorem ztrátovosti resp. bezztrátovosti přenosu energie ve vztahu k vlnovým délkám akustického vlnění.

Kromě akustické energie, kterou lidské smysly vnímají jako slyšitelnou, vyzařuje kolejové vozidlo, v určitých rychlostních režimech, i akustickou energii v oblasti infrazvuku, pro jehož percepci není člověk vybaven příslušným smyslovým orgánem. Navíc, jelikož se jedná o “celotělový účinek”, jsou fyziologické účinky pro senzitivnější jedince, ale nejenom pro ně, zdraví škodlivé. I v tomto směru by se akustické studie kolejových vozidel měly stát běžnou součástí diagnostiky.

Autory článku vyjádřená potřeba analýzy styku kolo-kolejnice se bezprostředně dotýká fenoménu hluku, neboť každá nerovnost povrchu kola, která přijde do styku s kolejnicí, je budičem akustické energie. Potřeba důkladného řešení této problematiky je zdůvodněna nejenom hlukovými aspekty, ale v daleko větší míře zvýšením bezpečnosti železničního provozu, neboť výrazné porušování jízdnicích ploch železničních kol, ke kterým v provozu dochází, může být i zdrojem následné destrukce železničního kola.

Literatura:

- [1] Humen, V. a kol.: Vliv náplně na dynamické vlastnosti železničního kola. LENAM s.r.o. Liberec 1994.
- [2] Nový, R.: Hluk a otřesy. ČVUT Praha. 1993. Skriptum.
- [3] Kaloč, R.: Snižování hluku novou konstrukcí železničního kola. In: Sborník 1. vědecké konference o dopravě, Pardubice 1995
- [4] Volf, B., Ondrouch, J.: Zvýšený hluk a vibrace kol zhoršují vlastnosti železničních vozidel. VŠB TU Ostrava, ŽDB Bohumín, a.s..1995. Výzkumná zpráva.
- [5] ANSYS Theory Manual Rev.5.3, Swanson Analysis Systems Inc. Houston 1995.
- [6] Kaloč, R., Kout, J.: Styk kola s kolejnicí jako akustický zdroj. In: Sborník XII. mezinárodní konference “Současné problémy kolejových vozidel. Česká Třebová. 1997.
- [7] Jungr, V.: Hygienická problematika expozice nízkofrekvenčního hluku a infrazvuku Ústav železničního zdravotnictví. Plzeň 1990. Výzkumná zpráva.
- [8] Moyar, G., Stone, D.: Potential thermo - mechanical wheel tread damage mechanisms in high traction locomotives. In: 11th International Wheelset Congress. Paris 1995.

V Praze, září 1998

Lektoroval: Doc. Ing. Vladimír Humen, CSc.

LENAM, s.r.o. Liberec