

## **SIMULAČNÍ VÝPOČTY DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ LOKOMOTIVY 744.001 CZ LOKO**

Tomáš MICHÁLEK, Jaromír ZELENKA

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

### **1. Úvod**

V rámci řešení programového projektu „TIP“ Ministerstva průmyslu a obchodu ČR ev. č. FR-TI2/562 „Výzkum a vývoj modulové čtyřnápravové lokomotivy“ spolupracovala Dopravní fakulta Jana Pernera (DFJP) v letech 2010 až 2012 se společností CZ LOKO, a.s. na vývoji nové dieselelektrické lokomotivy řady 744.0. Cílem tohoto projektu byla výroba normálněrozchodného prototypu lokomotivy, ale také příprava „virtuálního prototypu“ lokomotivy určené pro rozchod koleje 1520 mm a splňující standardy GOST. Prototyp nové lokomotivy pro rozchod koleje 1435 mm, který nese označení 744.001, byl poprvé představen veřejnosti na veletrhu Czech Raildays 2012 v Ostravě a světovou premiéru si následně odbyl na veletrhu InnoTrans 2012 v Berlíně.

Náplň činností, které byly v rámci řešení projektu prováděny na DFJP, spočívala v realizaci počítačových simulací jízdy různých modifikací lokomotivy, ověřování reálných charakteristik prvků vypružení a vedení dvojkolí na zkušebním stavu DFJP v Pardubicích, provádění pevnostních výpočtů vybraných částí lokomotivy (rám podvozku, kostra kapoty) metodou konečných prvků, hodnocení hluku vyzařovaného lokomotivou, ale také realizace měření prováděných při traťových zkouškách v rámci schvalovacího procesu. Tento článek se zabývá první uvedenou aktivitou, tj. simulačními výpočty jízdy lokomotivy prováděnými vlastním simulačním nástrojem „SJKV“. Získané výsledky jsou porovnávány s výsledky simulačního programu SIMPACK s cílem verifikace výpočtových modelů.

## 2. Lokomotiva řady 744.0 CZ LOKO

Lokomotiva řady 744.0 CZ LOKO (obr. 1) je modulární čtyřnápravová motorová lokomotiva s elektrickým přenosem výkonu, která je určena pro traťovou službu a posun. Lokomotiva je vybavena podvozky CZ LOKO nové koncepce (obr. 2), které byly vyvinuty v letech 2007 až 2009 v rámci řešení předchozího programového projektu „IMPULS“ Ministerstva průmyslu a obchodu ČR ev. č. FI-IM4/042 „Výzkum a vývoj modulových dvounápravových podvozků dieselelektrických lokomotiv“, přičemž se DFJP na tomto vývoji rovněž podílela.

Primární vypružení lokomotivy je tvořeno dvojicí flexi-coil pružin u každé ložiskové skříně a ve svislém směru je doplněno hydraulickými tlumiči. Vedení dvojkolí v rámu podvozku je jednostranné ojníčkové. Sekundární vypružení je provedeno dvěma dvojicemi flexi-coil pružin na každém podvozku; sekundární pružiny jsou situovány v příčné ose podvozku. Sekundární vypružení je ve svislém a v příčném směru doplněno hydraulickými tlumiči. Vzhledem k maximální rychlosti 120 km/h není lokomotiva řady 744.0 osazena tlumiči vrtivých pohybů podvozků. Přenos podélných sil mezi skříní a podvozkem je realizován nízko položeným otočným čepem. Rozvor podvozku je 2400 mm; vzdálenost otočných čepů činí 9000 mm. Každé dvojkolí je poháněno tlapově uloženým asynchronním trakčním motorem o výkonu 360 kW; kola o průměru 1100 mm jsou osazena kotoučovou brzdou s brzdovými kotouči v discích kol. Detailní popis nového podvozku CZ LOKO je uveden v článku [1].

Pohon lokomotivy zajišťuje motorgenerátor, který je tvořen spalovacím motorem Caterpillar o výkonu 800 až 1550 kW a trakčním alternátorem Siemens, a čtveřice asynchronních trakčních motorů. Modulární koncepce lokomotivy umožňuje stavbu různých modifikací pro rozchod 1435 mm nebo 1520 mm s různým výkonem, různou celkovou hmotností a s maximální rychlostí do 120 km/h. Lokomotiva je kromě kotoučové brzdy vybavena také elektrodynamickou odporovou brzdou; pro čištění jízdní plochy kol jsou též v podvozcích dosazeny čistící špalíky.

Lokomotiva řady 744.0 CZ LOKO může být vybavena systémem automatické regulace rychlosti „ARR“ nebo systémem „AVV“ [2] od firmy AŽD Praha pro automatické vedení vlaku.



**Obr. 1** Lokomotiva 744.001 CZ LOKO  
**Fig. 1** Locomotive 744.001 CZ LOKO

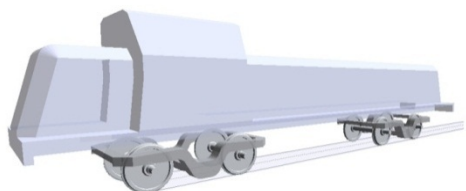


**Obr. 2** Podvozek lokomotivy řady 744.0  
**Fig. 2** Bogie of the locomotive Class 744.0

### 3. Simulační výpočty

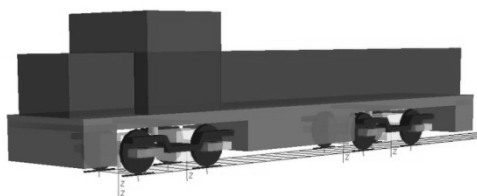
Během vývoje lokomotivy byla provedena celá řada simulačních výpočtů [3, 4, 5]. Vstupní data pro tyto výpočty byla postupně upřesňována na základě konzultací s konstruktéry lokomotivy a také na základě měření charakteristik reálných prvků vypružení [6], provedených v roce 2011 na dynamickém zkušebním stavu v těžkých laboratořích DFJP v Pardubicích. Cílem těchto simulačních výpočtů bylo ověření dynamických vlastností různých modifikací lokomotivy a příp. optimalizace příslušných charakteristik pružicích a tlumicích prvků použitých ve vypružení.

Pro účely simulačních výpočtů byl primárně používán simulační nástroj „SJKV“ (tj. Simulace jízdy kolejového vozidla), který je již od 90. let minulého století vyvíjen na Dislokovaném pracovišti DFJP v České Třebové. Programový systém „SJKV“ je vyvíjen v programovacím jazyce Pascal vývojového prostředí Borland Delphi a jeho modulární architektura, založená na programových jednotkách, které postupně řeší dílčí kroky simulačního výpočtu, umožňuje tvorbu různých modifikací systému pro konkrétní koncepce a parametry kolejových vozidel. Dnes je programový systém „SJKV“ vybaven mimo jiné specializovanými moduly pro automatizované hodnocení výsledků simulačních výpočtů, 3D vizualizaci výsledků (obr. 3), vyšetřování změn svislých kolových sil na zborcené koleji nebo analýzu stability jízdy vozidla na ideální přímé koleji. Pro potřeby simulačních výpočtů dynamických vlastností lokomotivy řady 744.0 CZ LOKO byla vytvořena nová verze programu „SJKV-Lok744“. Bližší popis obecných principů, jak systém „SJKV“ funguje, je uveden např. v článkách [5, 7].



**Obr. 3** Vizualizace modelu lokomotivy v programovém systému „SJKV-Lok744“

**Fig. 3** Visualization of model of the locomotive in “SJKV-Lok744”



**Obr. 4** Vizualizace modelu lokomotivy v programovém systému SIMPACK

**Fig. 4** Visualization of model of the locomotive in SIMPACK

Ačkoliv jsou dnes simulační výpočty běžnou součástí vývoje kolejových vozidel, jednou z nejdůležitějších fází jejich realizace je verifikace používaných výpočtových modelů a validace výsledků. Pro tyto účely byl vytvořen obdobný model lokomotivy 744.0 také v programovém systému SIMPACK 8900 (obr. 4), který je pro analýzu dynamiky kolejových vozidel na Dislokovaném pracovišti DFJP taktéž používán, a výsledky získané s využitím obou simulačních nástrojů byly vzájemně porovnány. V některých případech bylo navíc provedeno též porovnání výsledků simulačních výpočtů s výsledky výpočtů analytických. Vstupní data použitá tyto pro porovnávací simulační výpočty (tzn. hmotnosti

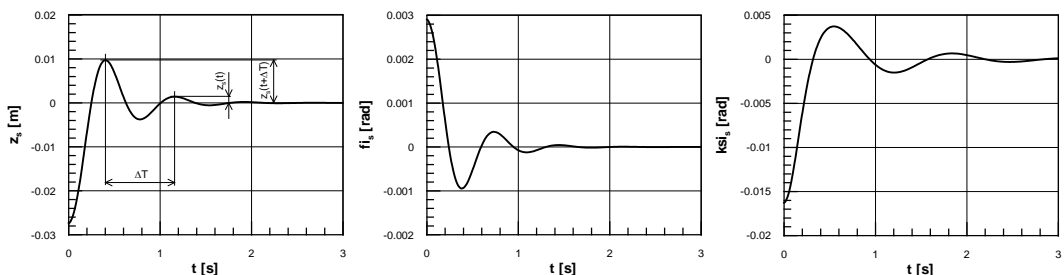
a momenty setrvačnosti jednotlivých těles dynamického modelu, rozměrové parametry, charakteristiky pružných a tlumicích vazeb atd.) charakterizují právě normálněrozchodný prototyp nové lokomotivy 744.001 (obr. 1). Jedná se tedy o lokomotivu s celkovou hmotností cca 75 t, vybavenou spalovacím motorem CAT 3508C o výkonu 1000 kW. Kompletní porovnání výsledků provedených simulačních výpočtů je uvedeno v technické zprávě Univerzity Pardubice [8]; v následujících podkapitolách jsou potom uvedeny ty nejdůležitější výsledky.

### 3.1 Vlastní frekvence kmitání skříně

Základními dynamickými vlastnostmi výpočtového modelu kolejového vozidla, které mohou být relativně snadno ověřeny, jsou vlastní frekvence (a poměrné útlumy) základních tvarů kmitání skříně. V rámci této práce byly porovnávány vlastní frekvence houpání, kývání a kolébání skříně, získané pomocí simulačních nástrojů „SJKV-Lok744“ a SIMPACK; vlastní frekvence houpání a kývání byly též ověřeny analytickým výpočtem na zjednodušeném modelu.

V případě programového systému „SJKV-Lok744“ byly vlastní frekvence kmitání skříně a příslušné poměrné útlumy počítány na základě časových průběhů výchylek skříně (obr. 5) při simulaci jízdy lokomotivy na ideální přímé koleji, přičemž skříň vozidla byla na počátku simulace vybuzena. V případě programového systému SIMPACK byly vlastní frekvence kmitání skříně a poměrné útlumy získány s využitím speciálního řešiče pro analýzu vlastních čísel linearizovaného modelu. Výstup ze SIMPACKu pro tento případ je uveden na obr. 6. Výsledky obou simulačních nástrojů jsou porovnány v tab. 1.

Jak je z porovnání zřejmé, poskytují oba výpočtové modely obdobné výsledky. Pro doplnění byly tyto výpočty ověřeny ještě pomocí analytického výpočtu vlastních frekvencí houpání a kývání skříně. Tento výpočet byl proveden s využitím zjednodušeného modelu (obr. 7), u kterého byla zanedbána hmotnost podvozků a také byl model uvažován jako netlumený. Výsledky zjednodušeného analytického výpočtu jsou také uvedeny v tab. 1 a je zřejmé, že jsou hodnotám získaným pomocí obou simulačních nástrojů velmi blízké.



**Obr. 5** Průběhy výchylek skříně lokomotivy (vlevo: houpání, uprostřed: kolébání, vpravo: kolébání) při určování vlastních frekvencí kmitání skříně v systému „SJKV-Lok744“

**Fig. 5** Deflection of the vehicle body (left: jumping, middle: pitching, right: rolling) at the estimation of eigenfrequencies and natural damping coefficients by “SJKV-Lok744”

**Tab. 1** Vlastní frekvence a poměrné útlumy vlastních kmitů skříně lokomotivy 744.001  
**Tab. 1** Eigenfrequencies and natural damping coefficients of the locomotive 744.001

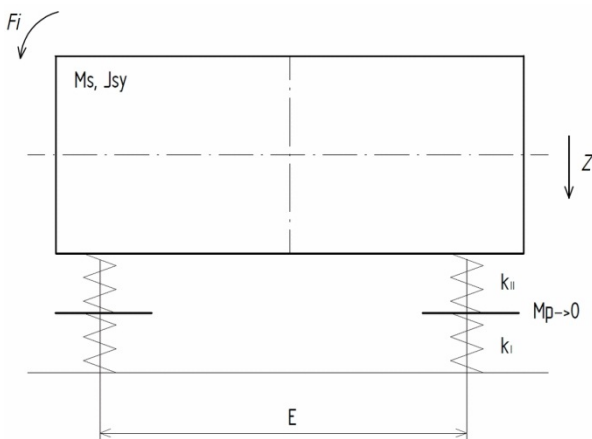
Vlastní tvar kmitání skříně	„SJKV-Lok744“		SIMPACK		Analytický výpočet
	Vlastní frekvence	Poměrný útlum	Vlastní frekvence	Poměrný útlum	Vlastní frekvence
Houpání (z)	1,32 Hz	0,31	1,31 Hz	0,30	1,34 Hz
Kývání ( $\varphi$ )	1,39 Hz	0,32	1,40 Hz	0,32	1,45 Hz
Kolébání ( $\xi$ )	0,78 Hz	0,27	0,70 Hz	0,29	-

\*\*\*\*\* E I G E N V A L U E S \*\*\*\*\*

No.	Real-Part [1/s]	Imag-Part [rad/s]	Nat. Damping [-]	Frequency [Hz]
1	-2.0969E+04	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
2	-3.0973E+04	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
3	-3.0979E+04	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
4	-2.0972E+04	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
5	-1.2405E+04	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
6	-1.2405E+04	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
7	-1.1407E+04	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
8	-1.2406E+04	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
9	-2.2595E+03	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
10	-2.2599E+03	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
11	-2.2602E+03	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
12	-2.2599E+03	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
13/ 14	0.0000E+00 +/-	0.0000E+00 +/-	0.0000	0.0000
15/ 16	0.0000E+00 +/-	0.0000E+00 +/-	0.0000	0.0000
17	-1.9247E+02	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
18	-1.9198E+02	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
19	-1.7267E+02	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
20	-1.7291E+02	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
21	-2.5620E+01	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
22	-2.5340E+01	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
23	-2.5340E+01	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
24	-2.2753E+01	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
25	-3.3467E+01	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
26	-1.4322E+01	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
27	-3.5797E+00	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
28	-3.5889E+00	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
29	-1.4378E+02	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
30	-1.4344E+02	+ 0.0000E+00	1.0000	0.0000
31/ 32	0.0000E+00 +/-	1.2022E-03	0.0000	0.0002
33/ 34	-1.3304E+00 +/-	5.7732E-03	1.0000	0.0009
35/ 36	-7.9280E-02 +/-	2.2322E-01	0.3347	0.0355
37/ 38	-7.0332E-02 +/-	2.3249E-01	0.2896	0.0370
39/ 40	-1.3228E+00 +/-	4.2851E+00	0.2868	0.6979
41/ 42	-2.6666E+00 +/-	6.1874E+00	0.3958	0.9848
43/ 44	-2.5897E+00 +/-	8.2444E+00	0.2998	1.3117
45/ 46	-2.9679E+00 +/-	8.7736E+00	0.3203	1.3970
47/ 48	-6.6818E+00 +/-	1.0682E+01	0.5303	1.7001

**Obr. 6** Analýza vlastních čísel v systému SIMPACK

**Fig. 6** Eigenvalue analysis performed in SIMPACK

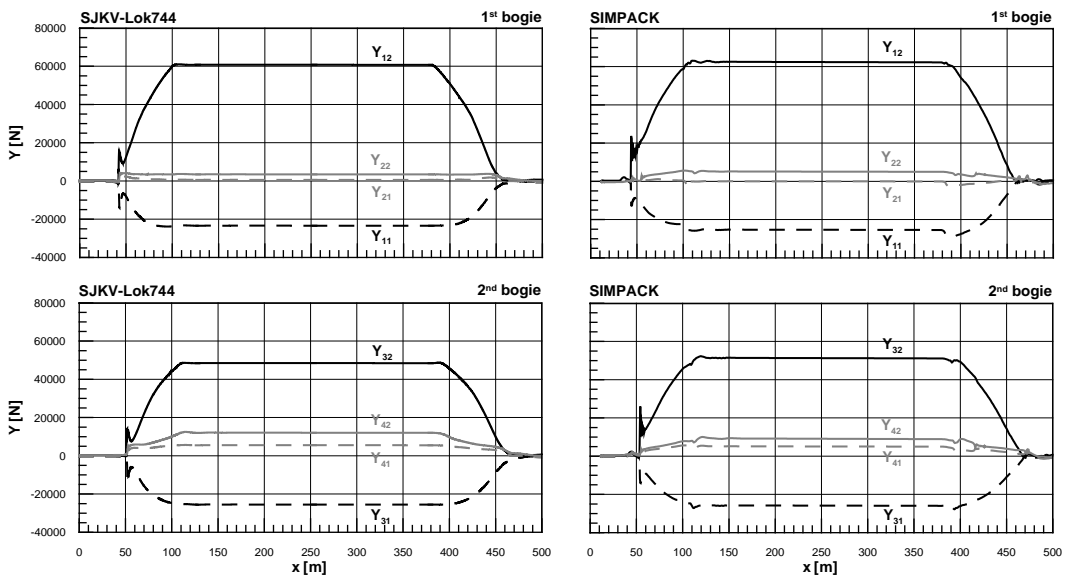


**Obr. 7** Zjednodušený dynamický model pro analytický výpočet vlastních frekvencí

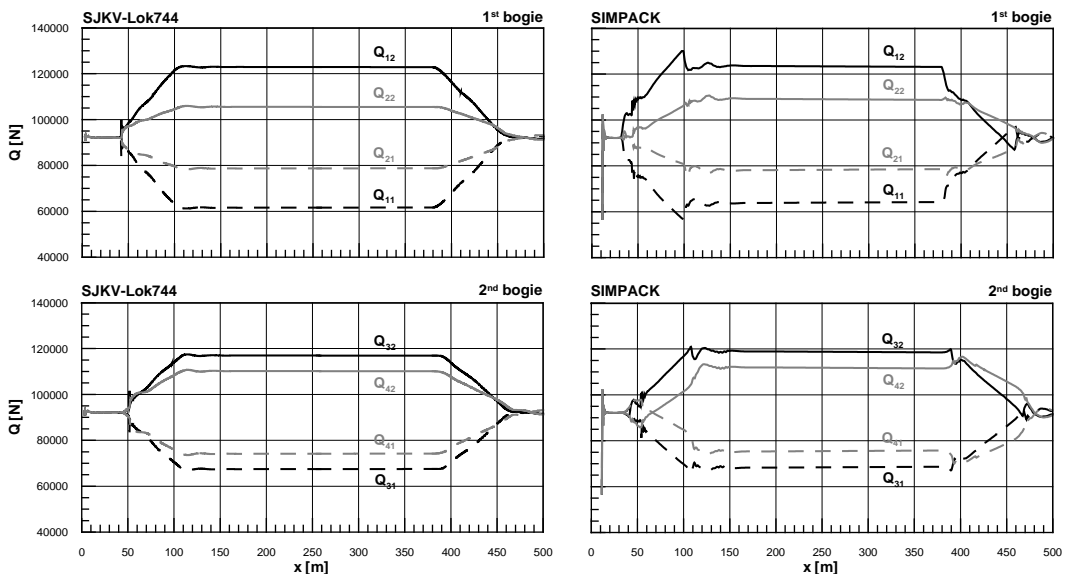
**Fig. 7** Simplified dynamic model for analytical calculation of eigenfrequencies

### 3.2 Vodicí vlastnosti v oblouku malého poloměru

Další oblast dynamických vlastností vyšetřované lokomotivy, která byla pomocí simulačních výpočtů provedených programovými systémy „SJKV-Lok744“ a SIMPACK sledována, byly vodicí vlastnosti v oblouku o velmi malém poloměru. Pozornost přitom byla věnována zejména kvazistatickým vodicím a svislým kolovým silám, dále silám působícím v prvcích vypružení a vedení dvojkolí a také součiniteli náklonu. V obou případech byl simulován průjezd lokomotivy obloukem koleje o poloměru 250 m s převýšením vnějšího kolejnicového pásu 150 mm rychlostí 82 km/h, která přibližně odpovídá maximálnímu zkušebnímu nedostatku převýšení 165 mm. Při porovnávacích simulačních výpočtech byl uvažován kontakt kolo–kolejnice odpovídající teoretickému jízdnímu obrysu S1002 a kolejnicím 60E1 s úklonem 1:20 při jmenovitých hodnotách rozkolí a rozchodu koleje, který se vyznačuje velmi nízkou hodnotou ekvivalentní konicity a z hlediska dosahovaných hodnot kvazistatických vodicích sil se jeví jako nepříznivý. Hodnota součinitele tření mezi kolem a kolejnicí byla zvolena 0,40. V obou případech byla simulována jízda po ideálně trasované koleji bez nerovností.



**Obr. 8** Vodicí síly na jednotlivých kolech předního (nahore) a zadního (dole) podvozku při průjezdu obloukem o poloměru 250 m (vlevo: „SJKV-Lok744“, vpravo: SIMPACK)  
**Fig. 8** Guiding forces on each wheel of the front (up) and the rear (down) bogie during the run through 250 m curve (left: “SJKV” results, right: SIMPACK results)



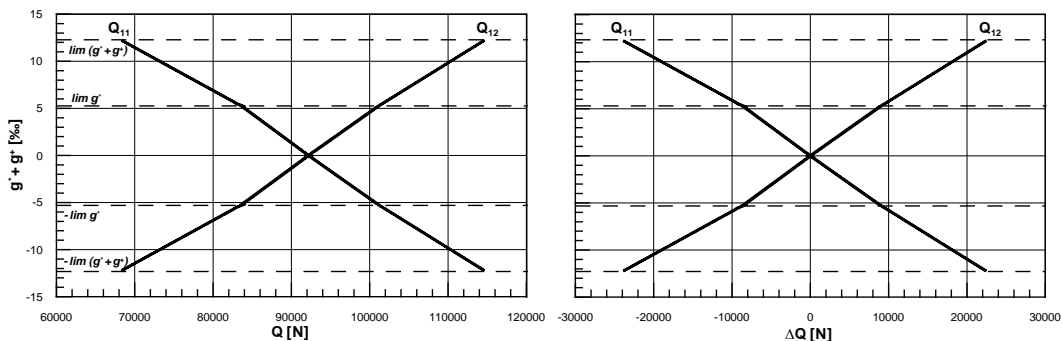
**Obr. 9** Kolové síly na jednotlivých kolech předního (nahore) a zadního (dole) podvozku při průjezdu obloukem o poloměru 250 m (vlevo: „SJKV-Lok744“, vpravo: SIMPACK)  
**Fig. 9** Wheel forces on each wheel of the front (up) and the rear (down) bogie during the run through 250 m curve (left: “SJKV” results, right: SIMPACK results)

V grafech na obr. 8 a 9 jsou prezentovány výsledky simulačních výpočtů průjezdu lokomotivy uvažovaným obloukem, a to ve formě průběhů vodicích a svislých kolových sil. Z hlediska dosahovaných kvazistatických hodnot těchto sil poskytují oba simulační nástroje obdobné výsledky. Např. v případě nabíhajícího kola 1. dvojkolí (kolo 12) je odchylka výsledků menší než 2,5 % v případě kvazistatické vodicí síly, resp. menší než 1 % v případě kvazistatické kolové síly. Obdobným způsobem je možné hodnotit např. i síly působící ve vypružení a ve vedení dvojkolí.

Na základě hodnocení příčného zrychlení na skříní vozidla při jízdě obloukem, resp. úhlu naklonění skříně při postavení vozidla na převýšení koleje byly vypočteny hodnoty součinitele náklonu skříně 0,17 v případě výsledků systému „SJKV-Lok744“ a 0,16 v případě výsledků systému SIMPACK. I v případě hodnocení této veličiny je tak shoda výsledků dobrá.

### 3.3 Změna svislých kolových sil na zborcené koleji

Další veličinou, která byla pomocí simulačních výpočtů sledována, byla změna svislé kolové síly při postavení vozidla na zborcení koleje. Stanovení této veličiny je součástí vyšetřování tzv. kvazistatické bezpečnosti proti vykolejení a způsob jejího určení je definován v normě EN 14363 [9]. Pro potřeby vyšetřování změn kolových sil na zborcené koleji byl systém „SJKV“ doplněn o speciální modul, který umožňuje simulovat zkušební zkrucování vozidla v souladu s metodou č. 3 dle normy [9]. Protože programový systém SIMPACK není takovým modulem vybaven, byly výsledky získané systémem „SJKV-Lok744“ (zkrucovací diagramy na obr. 10) v této fázi porovnány pouze s výsledky analytického výpočtu, který byl proveden s využitím zjednodušeného modelu, uvažujícího pouze svislé tuhosti prvního a druhého stupně vypružení. Odvození příslušných vztahů pro zjednodušený analytický výpočet odlehčení kola na zborcené koleji je uvedeno např. v literatuře [10]. Výsledky získané simulačním výpočtem a analytickým výpočtem jsou uvedeny v tab. 2. I vzhledem ke skutečnosti, že multi-body modely jsou založeny na předpokladu dokonale tuhých těles, vykazují obě použité metody výpočtu odlehčení kola prakticky stejné výsledky.



**Obr. 10** Zkrucovací diagramy – výsledky simulačního výpočtu v systému „SJKV-Lok744“  
**Fig. 10** Twisting diagrams – results of simulation performed by means of “SJKV-Lok744”

**Tab. 2** Změny svislých kolových sil (odlehčení kola) při postavení vozidla na zborčené koleji (výsledky „SJKV“ vs. výsledky analytického výpočtu)

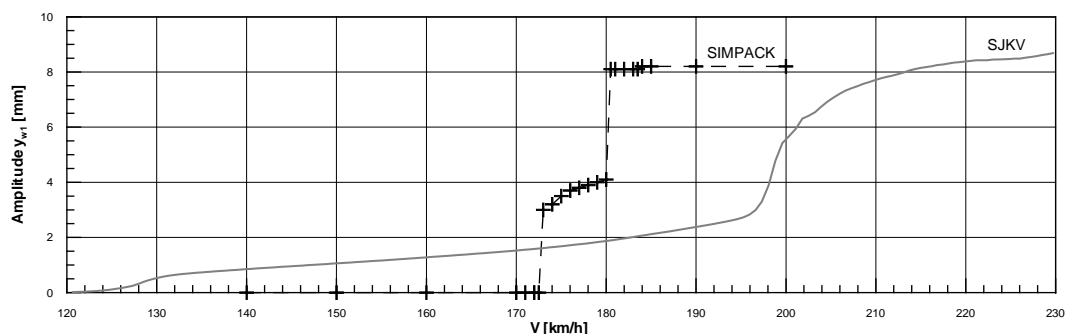
**Tab. 2** Wheel load changes on twisted track (“SJKV” results vs. analytical calculation)

Změna svislé kolové síly	„SJKV-Lok744“	Analytický výpočet
$\Delta Q_t$ (celková)	23,9 kN	24,0 kN
$\Delta Q_t^+$ (na bázi otočných čepů)	8,6 kN	8,8 kN
$\Delta Q_t^+$ (na bázi rozvoru podvozku)	15,3 kN	15,2 kN
$\Delta Q_t / Q_0$ (celková, poměrná)	0,26	0,26

### 3.4 Stabilita jízdy vozidla v přímé koleji

Posledním jevem, který byl pomocí simulačních výpočtů prováděných systémem „SJKV-Lok744“ a SIMPACK zkoumán, byla stabilita jízdy lokomotivy v přímé koleji. Analýza stability byla v tomto případě provedena pouze s využitím zjednodušených metod využívajících simulační výpočty jízdy vozidla po ideální přímé koleji. V případě systému „SJKV-Lok744“ byl proveden simulační výpočet s rovnoměrně klesající rychlostí jízdy, kdy je lokomotiva na počátku simulace vybuzena ve vysoké rychlosti osamělou příčnou nerovností koleje a dále se pohybuje po ideální koleji, přičemž je sledována amplituda příčných kmitů jednotlivých dvojkolí v závislosti na rychlosti jízdy. Rychlost, při níž kmitání ustane, je pak označena jako kritická rychlost vozidla. V případě systému SIMPACK byla provedena celá sada simulačních výpočtů při konstantní rychlosti jízdy, kdy je po vybuzení vozidla osamělou příčnou nerovností sledována ustálená amplituda příčného kmitání dvojkolí. Jako kritická rychlost je v tomto případě označena nejvyšší rychlost, při níž se kmitání dvojkolí ještě neudrží. Více informací ohledně analýzy stability je možné najít např. v článku prof. Polácha [11].

V obou případech zde byl při simulačních výpočtech provedených v rámci analýzy stability uvažován kontakt kolo–kolejnice odpovídající teoretickému jízdnímu obrysu S1002 a kolejnicím 60E1 s úklonem 1:40 při jmenovitých hodnotách rozkolí a rozchodu koleje (obr. 12 a 13); součinitel tření mezi kolem a kolejnicí byl zvolen 0,40. Výsledky provedených výpočtů jsou uvedeny ve formě bifurkačních diagramů v grafu na obr. 11.

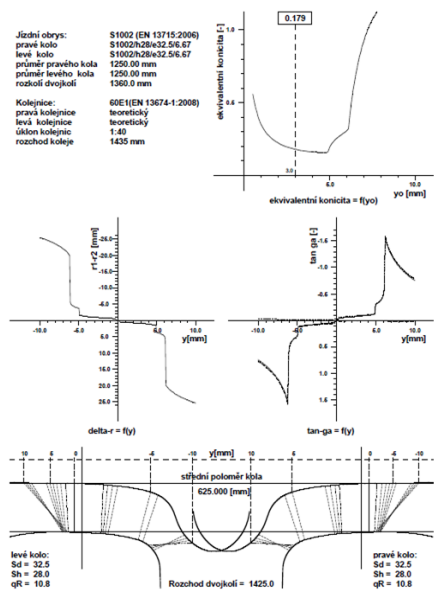


**Obr. 11** Bifurkační diagramy pro 1. dvojkolí lokomotivy – výsledky analýzy stability

**Fig. 11** Bifurcation diagrams for the 1<sup>st</sup> wheelset – results of stability analysis

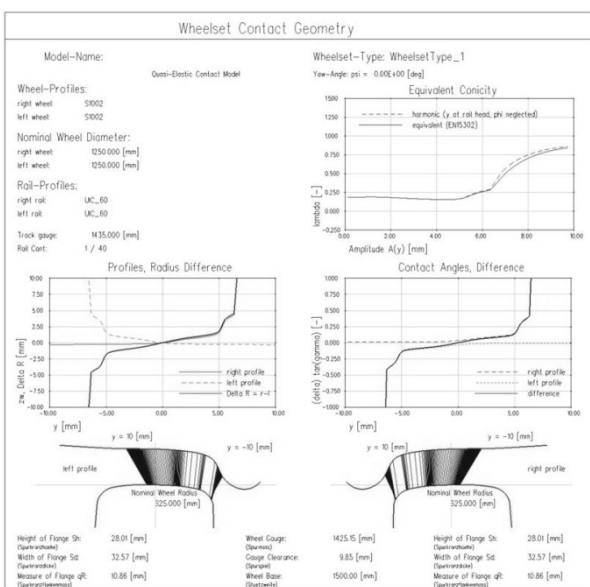


V tomto případě vykazují výsledky získané jednotlivými simulačními nástroji určité rozdíly. Pokud bychom za kritickou rychlost vozidla považovali rychlost, při níž nedochází k žádným příčným kmitům dvojkolí, je kritická rychlost získaná simulačními výpočty v SIMPACKu vyšší než kritická rychlost získaná analýzou stability v systému „SJKV-Lok744“ (172 km/h vs. 124 km/h). Pokud však za nestabilní pohyb vozidla považujeme až případ, kdy jednotlivá dvojkolí vykonávají příčné kmity s amplitudou větší než cca 3 až 4 mm, je kritická rychlost získaná SIMPACKem nižší než kritická rychlost určená analýzou stability v programovém systému „SJKV-Lok744“ (180 km/h vs. 196 km/h). Příčinou uvedených rozdílů může být jednak rozdílná metoda použitá pro vyšetřování stability jízdy lokomotivy, ale také rozdílný způsob zpracování charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí–kolej v jednotlivých softwarech (obr. 12 a 13) nebo různé algoritmy použité pro řešení tečných sil v kontaktu kolo–kolejnice (metoda prof. Polácha v případě „SJKV“ vs. FASTSIM v případě SIMPACKu). Každopádně leží v daném případě zjištěné hodnoty kritické rychlosti v oblasti nad maximální rychlostí vyšetřované lokomotivy.



**Obr. 12** Charakteristiky kontaktní geometrie („SJKV“)

**Fig. 12** Characteristics of wheel/rail contact geometry („SJKV“)



**Obr. 13** Charakteristiky kontaktní geometrie (SIMPACK)

**Fig. 13** Characteristics of wheel/rail contact geometry (SIMPACK)

#### 4.Závěr

Cílem tohoto příspěvku je ověření (verifikace) simulačních výpočtů dynamických vlastností lokomotivy 744.001 CZ LOKO provedených programovým systémem „SJKV-Lok744“. To je zde provedeno porovnáním výsledků programového systému „SJKV“ s výsledky simulačních výpočtů provedených s využitím obdobného výpočtového modelu

komerčním simulačním nástrojem SIMPACK a případně též porovnáním s výsledky analytických výpočtů. Samotné porovnání výsledků získaných jednotlivými výpočtovými modely je provedeno v kap. 3; porovnávány zde jsou vlastní frekvence a poměrné útlumy některých základních tvarů kmitání skříně lokomotivy, vodící vlastnosti lokomotivy při průjezdu obloukem velmi malého poloměru, změny kolové síly při postavení lokomotivy na mezním zborcení koleje a výsledky analýzy stability jízdy vozidla v přímé koleji.

Ukazuje se, že oba simulační nástroje poskytují ve většině případů obdobné výsledky, a tak je možné předpokládat, že podobné dynamické vlastnosti bude vykazovat i reálná lokomotiva. I přes dobrou shodu výsledků je však nutné poznamenat, že se stále jedná pouze o výsledky simulačních výpočtů a jejich případná validace (ve smyslu prokázání vypovídací schopnosti simulačních výpočtů) je možná pouze na základě jejich porovnání s výsledky měření na reálném vozidle. Právě validace výsledků simulačních výpočtů, založená na jejich porovnání s výsledky měření (statických zkoušek na zkušebních stavech a jízdních zkoušek na trati) realizovaných v rámci schvalovacího procesu prototypu lokomotivy, ale také bližší objasnění těch jevů, kdy se výsledky jednotlivých simulačních nástrojů rozcházejí, bude další fází této práce.

*Poznámka 1: Tento příspěvek vznikl v rámci řešení projektů FR-TI2/562 „Výzkum a vývoj modulové čtyřnápravové lokomotivy“ Ministerstva průmyslu a obchodu ČR a TE01020038 „Centrum kompetence drážních vozidel“ Technologické agentury ČR.*

*Poznámka 2: Tento článek je upravenou verzí příspěvku [12], prezentovaného na mezinárodní konferenci Bogie '13 v Budapešti.*

*Předloženo: 16. 9. 2013*

#### Literatura

1. KOPAL, J. *Pojezd lokomotiv provenience CZ LOKO a.s.* Sborník přednášek XIX. konference s mezinárodní účastí Současné problémy v kolejových vozidlech 2009, s. 1-6, (2009).
2. LIESKOVSKÝ, A., MYSLIVEC, I., ŠPAČEK, P. *ETCS a AVV – spolupráce, nikoliv konkurence.* Vědeckotechnický sborník ČD, Nr. 21, (2006).
3. ZELENKA, J., MICHÁLEK, T. *Running and guiding behaviour of the locomotive Class 744.0 CZ LOKO for the track gauge 1520 mm.* Транспорт Урана, s. 59-63, Nr. 28, (2011).
4. KOHOUT, M., ZELENKA, J., MICHÁLEK, T. *Vliv změn parametrů lokomotivy CZ LOKO řady 744.0 na dynamické vlastnosti při úpravě pro rozchod koleje 1520 mm.* Zborník prednášok XX. medzinárodnej konferencie Súčasné problémy v koľajových vozidlách – PRORAIL 2011, s. 131-137, (2011).
5. MICHÁLEK, T., ZELENKA, J. *Dynamic behaviour of locomotive with axle-mounted traction motors.* Conference proceedings of the 18<sup>th</sup> international conference Engineering Mechanics 2012, s. 879-887, (2012).
6. ZELENKA, J., VÁGNER, J., HÁBA, A. *Experimentální ověření možností stanovení příčné tuhosti flexi-coil pružin.* Vědeckotechnický sborník ČD, Nr. 31, (2011).

7. MICHÁLEK, T., ZELENKA, J. *Reduction of lateral forces between the railway vehicle and the track in small-radius curves by means of active elements*. Applied and Computational Mechanics, s. 187-196, Nr. 5, (2011).
8. ZELENKA, J., KOHOUT, M., MICHÁLEK, T. *Verifikační simulační výpočty dynamických vlastností lokomotivy 744.0*. Zpráva č. DP-T-05-12. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Dislokované pracoviště Česká Třebová, (2012).
9. ČSN EN 14363:2006. *Železniční aplikace – Přejímací zkoušky jízdních charakteristik železničních vozidel – Zkoušení jízdních vlastností a stacionární zkoušky*. ČNI, (2006).
10. ZELENKA, J., MICHÁLEK, T. *Teorie vozidel – studijní opora*. 1. vydání. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Dislokované pracoviště Česká Třebová, (2012).
11. POLÁCH, O. *Application of nonlinear stability analysis in railway vehicle industry*. Non-smooth Problems in Vehicle Systems Dynamics, s. 15-27, (2010).
12. MICHÁLEK, T., ZELENKA, J. *Simulations of dynamic behaviour of locomotive 744.001 CZ LOKO*. 9<sup>th</sup> International Conference on Railway Bogies and Running Gears – BOGIE '13, Extended Abstracts, s. 40-42, (2013).

## Resumé

### SIMULAČNÍ VÝPOČTY DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ LOKOMOTIVY 744.001 CZ LOKO

Tomáš MICHÁLEK, Jaromír ZELENKA

Tento příspěvek se zabývá problematikou verifikace výsledků simulačních výpočtů v oblasti dynamiky kolejových vozidel. Výsledky simulačních výpočtů dynamických vlastností prototypu lokomotivy 744.001 CZ LOKO provedené simulačním nástrojem „SJKV-Lok744“ jsou porovnávány s výsledky simulačních výsledků získaných s využitím komerčního simulačního nástroje SIMPACK.

Poznámka: Článek je upravenou verzí příspěvku *Michálek, T., Zelenka, J.: Simulations of dynamic behaviour of locomotive 744.001 CZ LOKO*, prezentovaného na mezinárodní konferenci Bogie '13 v Budapešti.

## Summary

### SIMULATIONS OF DYNAMIC BEHAVIOUR OF LOCOMOTIVE 744.001 CZ LOKO

Tomáš MICHÁLEK, Jaromír ZELENKA

Nowadays, computer simulations of vehicle run are often used and practically the only possible way how to verify and optimize the dynamic behaviour of a rail vehicle in its design stage. Various simulation tools based on the principle of multi-body simulations can be used for these purposes. However, one of the most significant problems is a credibility of obtained simulation results, i.e. a verification of the used computational models and their validation. This paper deals with verification simulations of dynamic properties of a new diesel-electric locomotive Class 744.0 which was being developed in a cooperation of the locomotive manufacturer CZ LOKO and the Jan Perner Transport Faculty of the University of Pardubice in years 2010 to 2012. In this case, relevant simulations were performed by means of the original software “SJKV” intended for simulations of vehicle run. For purposes of the verification of computational model, results of the simulations of dynamic behaviour of the locomotive prototype performed by means of the original simulation tool “SJKV” were compared with results obtained by means of an analogous model created in the commercial simulation tool SIMPACK. At this comparison, eigenfrequencies vehicle body, guiding behaviour of the locomotive, wheel load changes on twisted track and critical speed of the vehicle were observed. Some results were also compared with results of analytical calculations.

Note: This paper is a modified version of the contribution *Michálek, T., Zelenka, J.: Simulations of dynamic behaviour of locomotive 744.001 CZ LOKO* which was presented on the conference Bogie '13 in Budapest.

## Zusammenfassung

### **SIMULATIONSRECHNUNGEN DER DYNAMISCHEN EIGENSCHAFTEN DER LOKOMOTIVE 744.001 CZ LOKO**

Tomáš MICHÁLEK, Jaromír ZELENKA

Die lauftechnische Simulationsrechnungen sind heute während der Entwicklung von Schienenfahrzeuge oft benutzt. Die Problematik der Glaubwürdigkeit ist jedoch eine der wichtigsten Fragen im Prozess der Ergebnisbewertung. Dieser Artikel beschäftigt sich mit der Verifikation von Ergebnisse der Simulationsrechnungen der neuen diesel-elektrischen Lokomotive BR 744.0 CZ LOKO, die in der Zusammenarbeit vom tschechischen Lokomotivhersteller CZ LOKO und Fakultät für Verkehrswesen Jan Perner der Universität in Pardubice entwickelt war. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen des Lokomotivprototyps 744.001, die durch eigenes Multi-Körpersimulationssoftware „SJKV“ durchgeführt waren, sind hier mit Ergebnisse von einem analogischen Modell, das im MKS software SIMPACK geschaffen war, abgleichen. Validation von der MKS-Simulationsergebnisse, die durch Komparation mit Ergebnisse von Zulassungsprüfungen des Prototyps realisiert wird, wird im nächsten Schritt dieser Arbeit ausgeführt.

Anmerkung: Dieser Artikel ist eine modifizierte Version des Beitrags *Michálek, T., Zelenka, J.: Simulations of dynamic behaviour of locomotive 744.001 CZ LOKO*, der an der Konferenz Bogie '13 in Budapest präsentiert war.