

Jaromír Zelenka¹

Analýza vodících vlastností dieselelektrické lokomotivy s novým podvozkem CZ LOKO pomocí simulačních výpočtů

Klíčová slova: dvounápravový podvozek dieselelektrické lokomotivy, simulační výpočty, vodící vlastnosti, kvazistatická vodící síla.

1. Úvod

Po úspěšném vývoji nové koncepce vedení dvojkolí u dvounápravových dieselelektrických lokomotiv se společnost CZ LOKO a.s. zaměřila na vývoj dvounápravového podvozku traťové a posunovací lokomotivy s výkonem od 800 do 1500 kW s maximální rychlostí do 120 km/h. V rámci řešení programového projektu výzkumu a vývoje IMPULS Ministerstva průmyslu a obchodu pod názvem „Výzkum a vývoj modulových dvounápravových podvozků dieselelektrických lokomotiv“ se Dopravní fakulta Jana Pernera Univerzity Pardubice jako spolupříjemce projektu podílela na výzkumu jízdních a vodících vlastností lokomotivy s novou koncepcí podvozku. V tomto příspěvku jsou uvedeny výsledky ověřování vodících vlastností lokomotivy při průjezdu oblouky velmi malých poloměrů pomocí simulačních výpočtů.

2. Popis nového podvozku CZ LOKO

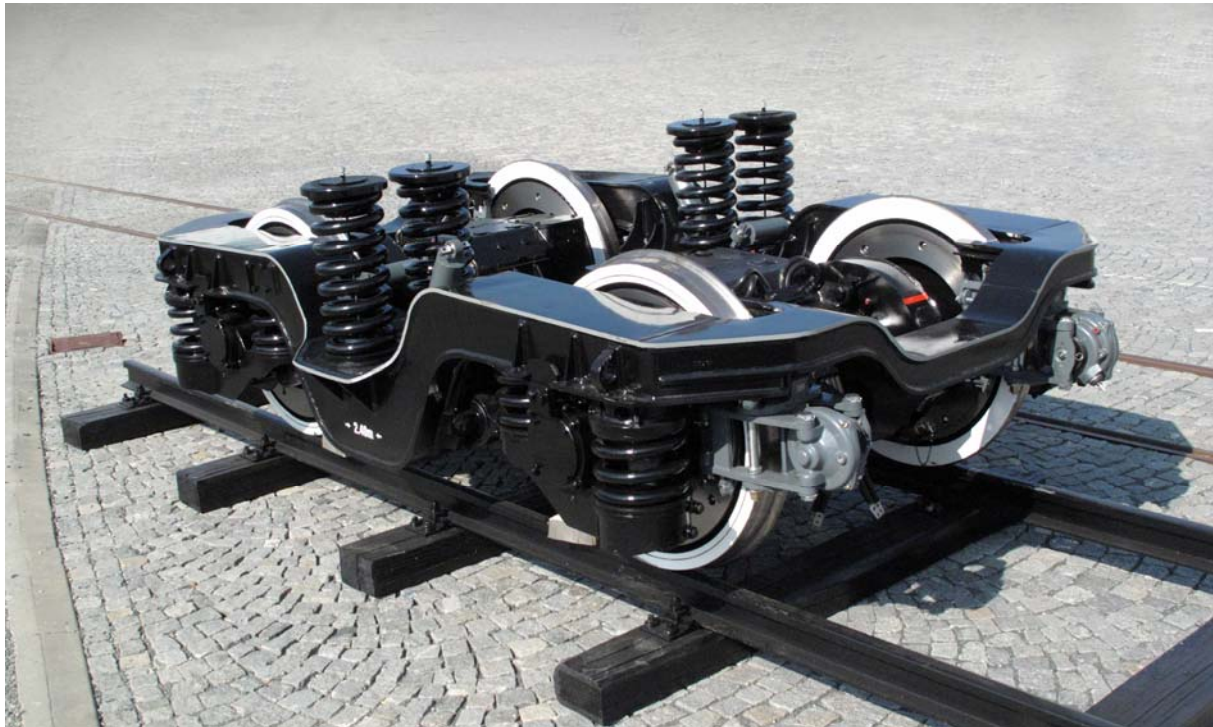
Hlavním cílem výše uvedeného programového projektu řešeného společností CZ LOKO a.s. v letech 2007-2009 bylo zhotovení prototypu modulového dvounápravového podvozku dieselelektrické lokomotivy. Tento nový podvozek byl společností poprvé představen v rámci Mezinárodního strojírenského veletrhu v Brně v roce 2009.

Trakční podvozek (viz *Obr. 1*) je určen pro čtyřnápravovou lokomotivu, která bude typově označena řadou 744.0. Jedná se o podvozek se svařovaným rámem, s dvojitým vypružením, s pohonem dvojkolí tlakovým motorem s valivým uložením. Primární vypružení je tvořeno čtyřmi šroubovitými pružinami na jedno dvojkolí a sekundární vypružení rámu podvozku vůči skříni je provedeno čtyřmi šroubovitými pružinami na podvozek. Pružiny v obou stupních vypružení využívají Flexi-coil efektu. Vypružení podvozku je v příčném směru i ve svislém směru doplněno hydraulickými tlumiči. Podélné tlumiče vrtivých pohybů se předpokládají uplatnit pouze pro lokomotivu s rychlostí 120 km/h.

Vedení dvojkolí je provedeno jako ojníčkové, shodné s lokomotivou řady 719.7 (viz [1, 2]). Přenos krouticího momentu je proveden jednostupňovou převodovkou se dvěma ozubenými koly. V podvozku jsou dva stejnosměrné trakční motory CZ LOKO výkonu 2x360 kW (je možnost použití i asynchronních motorů stejného výkonu).

¹ Doc. Ing. Jaromír Zelenka, CSc., 1957, Vystudoval VŠDS v Žilině obor DMT – specializace kolejová vozidla. Docent na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice, Katedra dopravních prostředků a diagnostiky, vedoucí oddělení kolejových vozidel. Vedoucí Dislokovaného pracoviště DFJP v České Třebové.

Přenos tažných sil na skříň lokomotivy je proveden pomocí centrálního otočného čepu přivařeného k rámu lokomotivy. Podrobný popis podvozku je v literatuře [1].



Obr. 1 Nový dvounápravový podvozek CZ LOKO na MSV v Brně 2009.

3. Simulační výpočty vodících vlastností lokomotivy

Simulační výpočty dynamických vlastností vozidla tvoří nedílnou součást v etapě vývoje nového vozidla. Proto při vývoji nového podvozku CZ LOKO byla provedena řada simulačních výpočtů pro ověření navržených parametrů vypružení podvozku a celé lokomotivy.

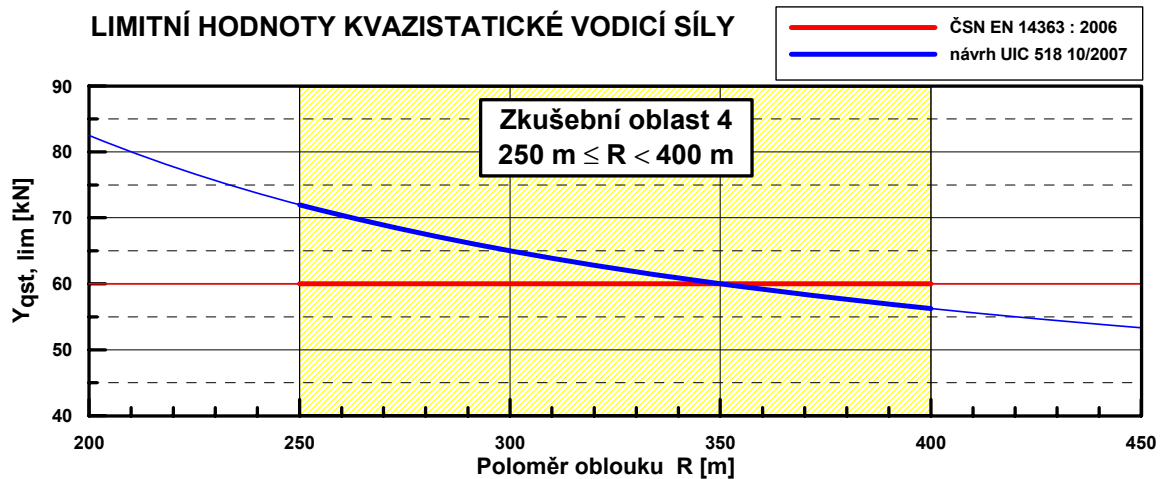
3.1 Hodnocení účinků na trať

Jednou z nejdůležitějších sledovaných veličin při vyšetřování vodících vlastností lokomotivy při hodnocení účinků na trať je kvazistatická vodící síla na nabíhající kole nápravy Y_{qst} pro zkušební oblast 3 a 4 [3], tj. oblouky o malých poloměrech $400\text{ m} \leq R \leq 600\text{ m}$ a oblouky o velmi malých poloměrech $250\text{ m} \leq R < 400\text{ m}$. Kvazistatická vodící síla má mezní (limitní) hodnotu dle ČSN EN 14363 $Y_{qst,lim} = 60\text{ kN}$ pro zkušební oblasti bez přechodových úseků. Dosažení této velmi přísné mezní hodnoty je problematické, uvedená norma ve své poznámce přímo uvádí: (citace) *Tato mezní hodnota je známá jako problematická pro vozidla ve zkušební oblasti 4. Průběžně se přehodnocuje podle UIC. Za určitých podmínek jsou možné odchylky od této mezní hodnoty.*

V návrhu nového znění vyhlášky UIC 518 z 10/2007 jsou v případě skupiny „účinky na trať“ změněny mezní hodnoty kvazistatické vodící síly na nabíhající nápravě tím způsobem, že tato limitní hodnota je závislá na poloměru oblouku R [m] a je dána vztahem

$$Y_{qst,lim} = 30 + \frac{10500}{R} \quad [kN] .$$

Grafické porovnání mezní hodnoty podle ČSN EN 14363 a podle návrhu vyhlášky UIC 518 ukazuje Obr. 2.



Obr. 2 Mezní hodnoty kvazistatické vodící síly.

Výsledky simulačních výpočtů byly porovnávány s oběma mezními hodnotami $Y_{qst,lim}$.

3.2 Popis simulačního programu

V rámci spolupráce na řešení projektu byl vytvořen dynamický model čtyřnápravové lokomotivy, který byl následně řešen simulačním programovým systémem vyvíjeným na Katedře dopravních prostředků a diagnostiky DFJP. Celý proces modelování jízdy kolejového vozidla všeobecně sestává z následujících kroků:

- tvorba dynamického modelu,
- tvorba matematického modelu,
- algoritmizace matematického modelu a tvorba programového systému,
- testování a verifikace programového systému,
- provedení simulačních výpočtů,
- vyhodnocení výsledků simulačních výpočtů.

Programový systém vyvíjený na DFJP, Dislokovaném pracovišti v České Třebové, označený "SJKV-v.4nv" pro provádění simulačních výpočtů čtyřnápravového vozidla byl modifikován pro použití simulačních výpočtů lokomotivy řady 744. Tento programový systém se skládá z dynamického modelu příslušného kolejového vozidla a dynamického modelu koleje. Další důležitou částí programového systému tvoří matematický aparát, který řeší geometrickou vazbu dvojkolí a koleje, adhezní vazbu kolo-kolejnice, atd. Popis dynamického modelu koleje a vozidla uvádí např. literatura [4, 5, 6]. Matematické modely jsou algoritmizací převedeny do programovacího jazyka Pascal vývojového prostředí Borland Delphi. Podrobnější popis programového systému DFJP je uveden v [2].

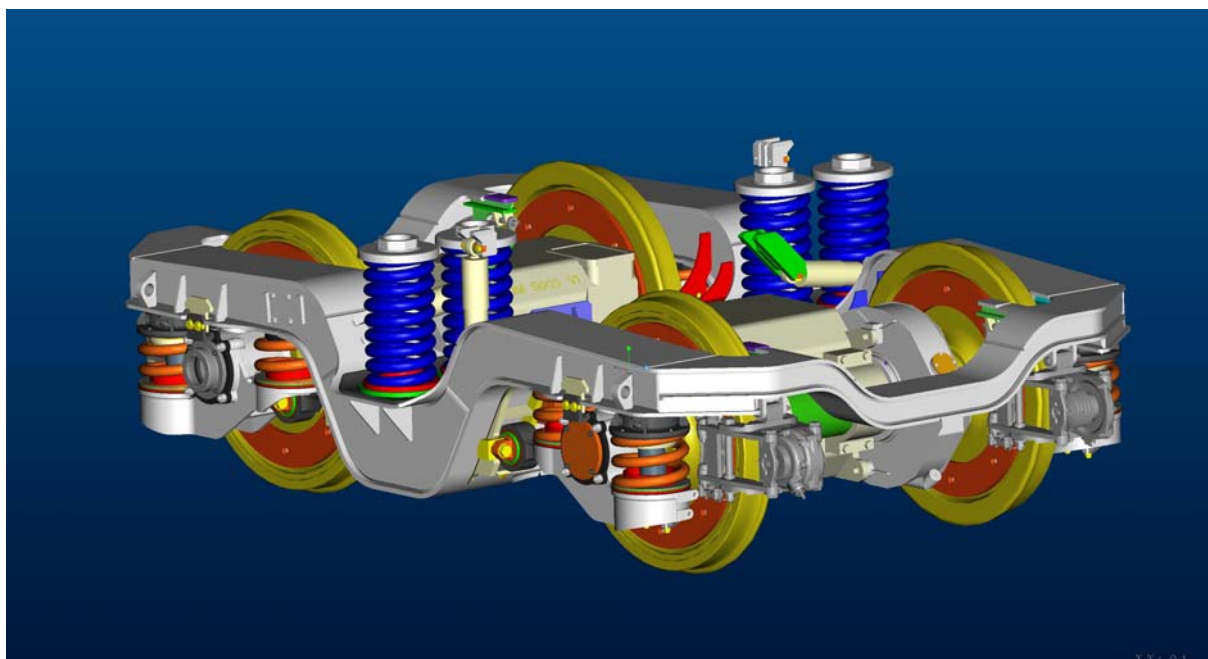
3.3 Základní parametry podvozku a lokomotivy - vstupní data pro simulaci

Přehled použitých hmotnostních a rozměrových parametrů lokomotivy 744, které byly převzaty od výrobce, jsou uvedeny v Tab. 1:

Tab. 1 Základní vstupní data do simulačních výpočtů

Parametr	Hodnota	Poznámka
Hmotnost skříně	43 600 kg	
Moment setrvačnosti skříně kolem x-osy	81 810 kg.m ²	
Moment setrvačnosti skříně kolem y-osy	802 700 kg.m ²	
Moment setrvačnosti skříně kolem z-osy	802 700 kg.m ²	
Vzdálenost otočných čepů	8.6 m	
Výška podlahy stanoviště strojvedoucího nad TK	1.85 m	
Hmotnost podvozku	5 400 kg	bez dvojkolí + 1/3 TM
Moment setrvačnosti podvozku kolem x-osy	3 788 kg.m ²	
Moment setrvačnosti podvozku kolem y-osy	6 186 kg.m ²	
Moment setrvačnosti podvozku kolem z-osy	9 383 kg.m ²	
Hmotnost dvojkolí	3 878 kg	+ 2/3 TM
Moment setrvačnosti dvojkolí kolem x-osy	1 995 kg.m ²	
Moment setrvačnosti dvojkolí kolem y-osy	584 kg.m ²	
Moment setrvačnosti dvojkolí kolem z-osy	2 215 kg.m ²	
Průměr kola	1.1 m	
Poloviční příčná vzdálenost tlumení od osy vozidla	1.113 m	
Poloviční příčná vzdálenost vypružení od osy vozidla	1.013/1.113 m	
Rozvor podvozku	2.4 m	
Výška těžiště podvozku nad TK	0.581 m	
Výška přenosu podélných sil podvozek-skříň nad TK	0.34 m	
Poloviční příčná vzdálenost nápravových ložisek	1.058 m	

Parametr	Hodnota	Poznámka
Tuhost pružiny primárního stupně vypružení	808 000 Nm ⁻¹	
Tuhost pružiny sekundárního stupně vypružení	538 000 Nm ⁻¹	
Svislý tlumič primárního stupně vypružení		H8P.140.43.30
Příčný tlumič sekundárního stupně vypružení		H8L.140.100.100



Obr. 3 Model podvozku.

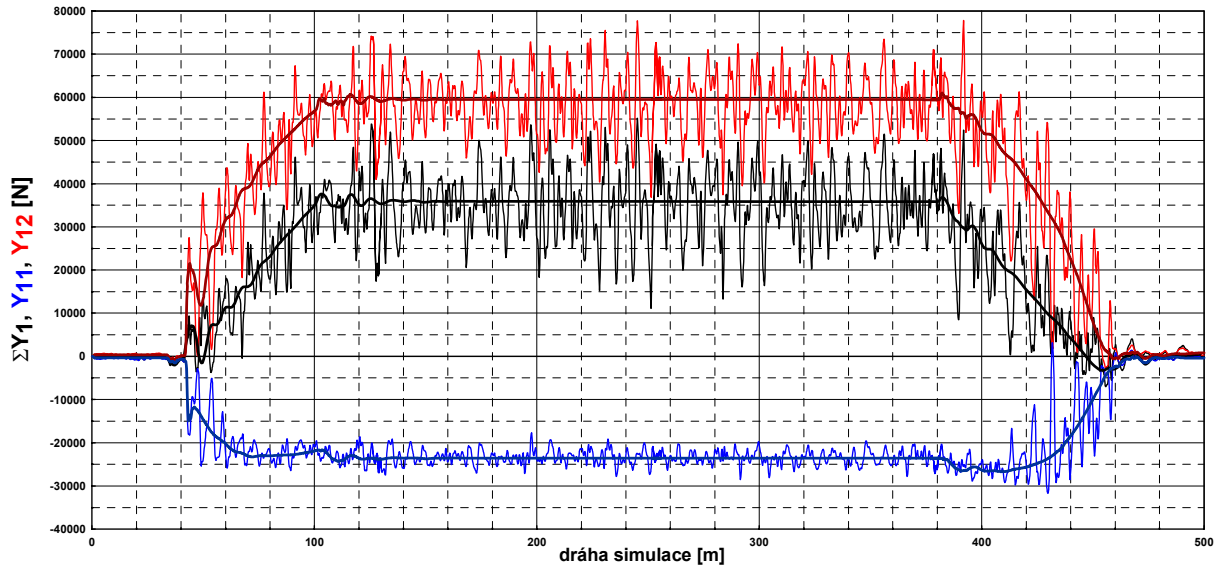
Rychlost jízdy: tato je při simulačních výpočtech alternována podle hodnoty požadovaného příčného nevyrovnaného zrychlení, poloměru oblouku a převýšení koleje. Max. hodnota příčného nevyrovnaného zrychlení dle ČSN EN 14363 je $a_n = 1.1 \text{ m.s}^{-2}$. Při převýšení koleje 150 mm v obloucích velmi malého poloměru je rychlost jízdy při simulaci pro $R = 250 \text{ m}$ $V = 82 \text{ km/h}$, pro $R = 300 \text{ m}$ $V = 90 \text{ km/h}$ a pro $R = 350 \text{ m}$ $V = 97.2 \text{ km/h}$.

Charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej: jsou dány kombinací použitého jízdního obrysu kola dvojkolí a příčného profilu hlavy kolejnice. Byly vytvořeny soubory dat popisujících kontakt dvojkolí s jízdním obrysem ORE S1002 na kolejnicích UIC60 s úklonem 1:20 a 1:40.

Dalšími vstupními parametry simulace jsou geometrické parametry koleje (svislé a příčné odchylky polohy jednotlivých kolejnicových pásů). Tyto GPK byly získány z měřicího vozu nebo byly získány generováním ze spektrální výkonové hustoty tratí Evropy.

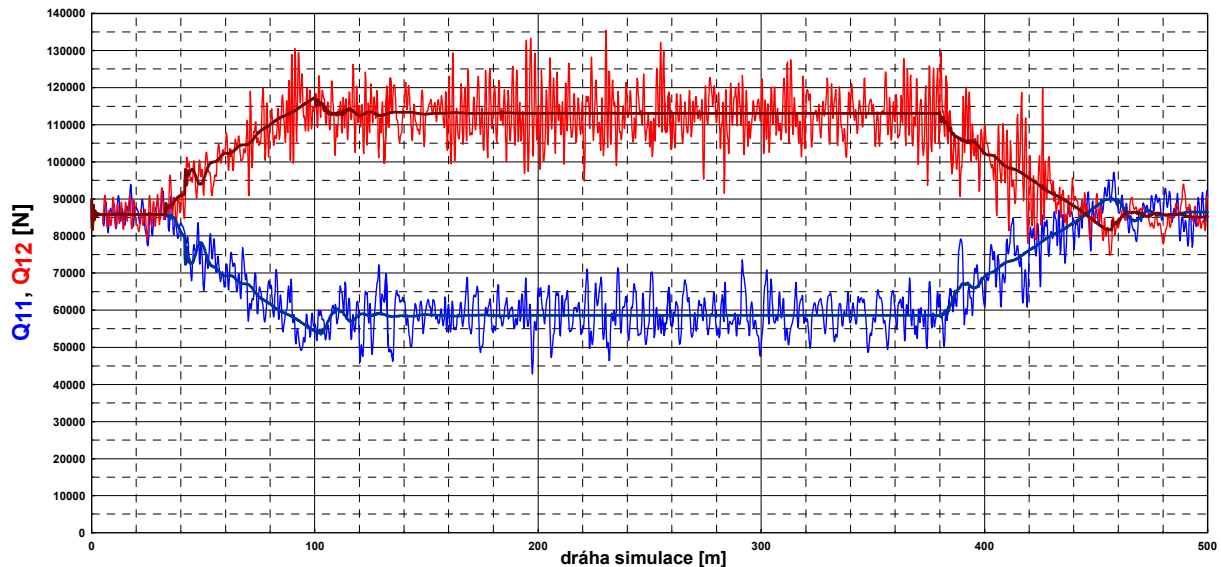
Při simulačních výpočtech pro hodnocení vodících vlastností bylo provedeno porovnání výsledků simulace s respektováním geometrických parametrů koleje (kolej s nerovnostmi) a výsledků simulace po ideální koleji bez GPK (kolej bez nerovností). Z těchto výsledků simulačních výpočtů jsou zřejmé především trendy vývoje sledovaných veličin, přechodové jevy apod. Tyto výsledky jsou také využívány pro analýzu vlivu různých parametrů (parametrů konstrukčních, parametrů vypružení a tlumení apod.)

Porovnání výsledků simulací oběma způsoby je provedeno na následujících průběžích vodících sil (Obr. 4) a kolových sil (Obr. 5).



Obr. 4 Vodící síly prvního dvojkolí, výpočet bez nerovností a s nerovnostmi (s GPK).

Porovnání výsledků dvojího přístupu simulace jízdy lokomotivy v oblouku koleje bylo provedeno hodnocením středních hodnot sledovaných veličin v jednotlivých hodnocených úsecích. Rozdíl středních hodnot ΔE těchto veličin vypočtený dle vztahu $\Delta E = \sum_{x=110m}^{380m} (E_D - E_K)$, kde E_D je veličina dynamická (se zohledněním GPK) a E_K je veličina kvazistatická (bez zohlednění GPK), nebyl větší než 1%. Uvedená skutečnost shody středních hodnot sledovaných veličin vede k závěru, že při analýze vlivu jednotlivých vstupních parametrů simulace lze provádět zrychlené simulační výpočty, kdy je provedena simulace jízdy jen do ustáleného stavu, (např. v případě poloměru oblouku $R = 250 \text{ m}$, viz Obr. 4 a Obr. 5, nastává ve vzdálenosti 250 m), kdy jsou ze simulačního výpočtu využity okamžité hodnoty odpovídající tomuto stavu. Není tedy nutné provádět simulaci jízdy po celé dráze a časově náročné zpracování výsledků včetně statistického zpracování v jednotlivých hodnocených úsecích dle ČSN EN 14363.



Obr. 5 Kolové síly prvního dvojkolí, výpočet bez nerovností a s nerovnostmi (s GPK).

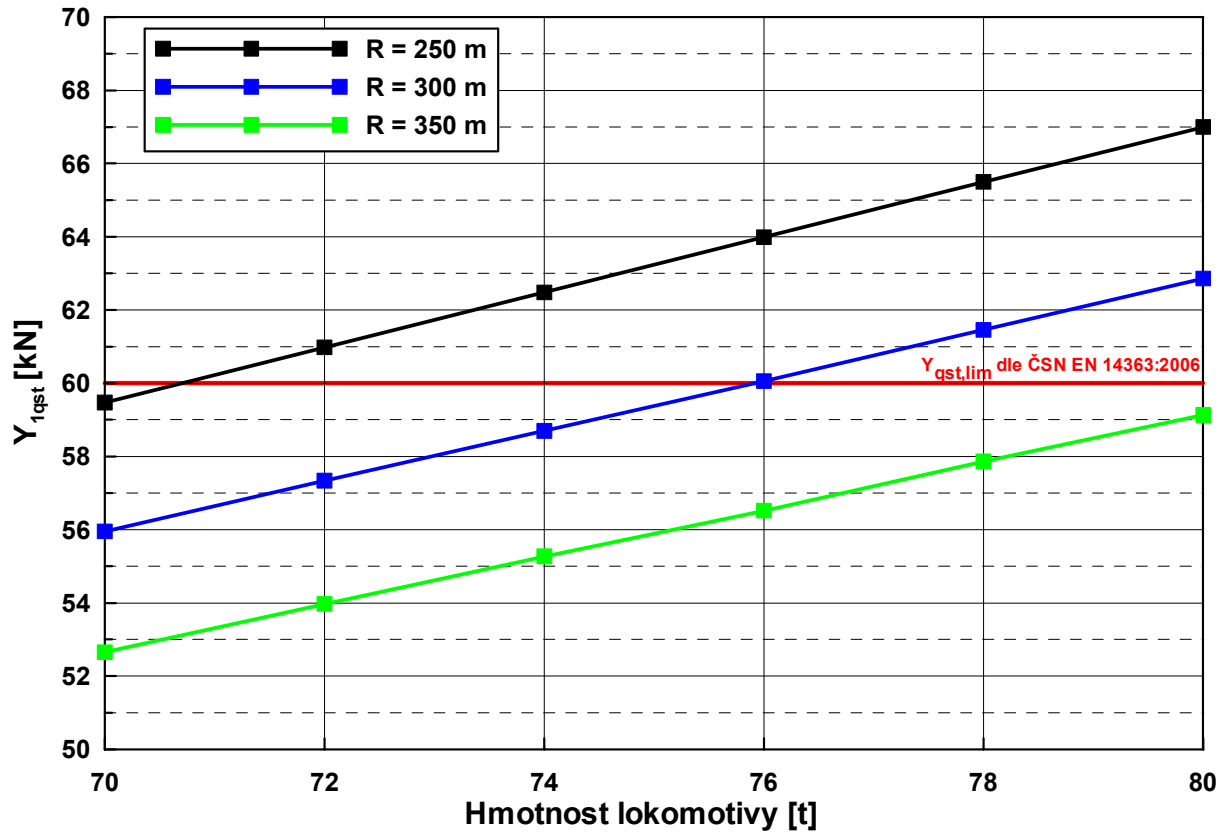
4. Vyhodnocení simulačních výpočtů vodicích vlastností lokomotivy

Pro posouzení vodicích vlastností nového podvozku lokomotivy byly provedeny simulační výpočty v obloucích malých poloměrů a to pro $R = 250, 300$ a 350 m. Hmotnost lokomotivy byla alternována v rozmezí 70÷80 t. Rychlost jízdy simulace byla stanovena pro maximální hodnotu nevyrovnaného zrychlení $a_n = 1.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Byly dále provedeny simulační výpočty pro charakteristiky kontaktní geometrie odpovídající úklonu kolejnic 1:20 a 1:40.

Na *Obr. 6.* a *Obr. 7* jsou znázorněny průběhy dosahovaných hodnot kvazistatické vodicí síly na nabíhající kole první nápravy na koleji s úklonem kolejnic 1:20. Z těchto porovnání je možno vyslovit následující poznatky:

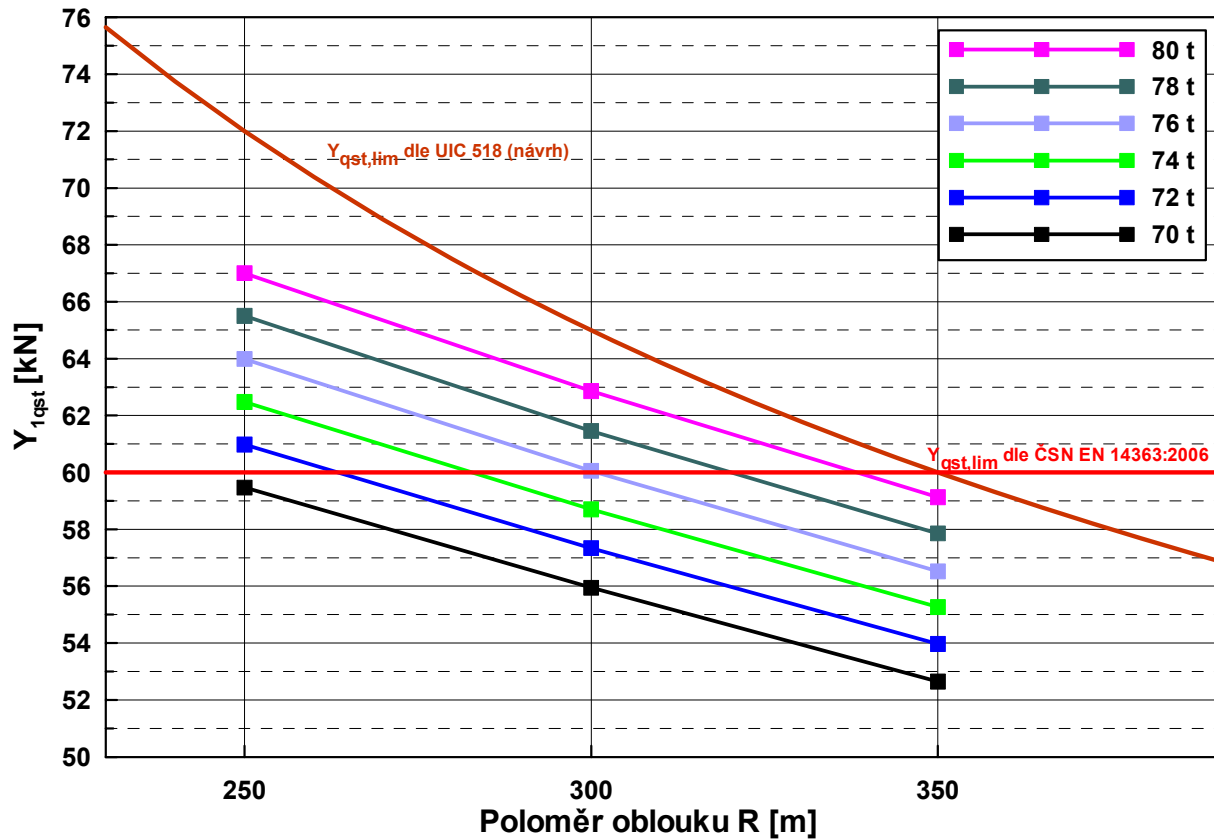
- podmínce normy ČSN EN 14363 by vyhovovala lokomotiva do hmotnosti cca 76 tun, neboť očekávaná hodnota kvazistatické vodicí síly se počítá ze všech hodnocených úseků zkušební oblasti 4, tedy oblouků o velmi malých poloměrech $250 \text{ m} \leq R < 400 \text{ m}$. Přitom norma dále stanoví, že jednotlivé hodnocené úseky koleje musí zahrnovat úplný rozsah hodnot přiřazených poloměrů oblouků a pro zajištění nezbytného rozložení poloměrů oblouků ve zkušební oblasti s malými a středními poloměry oblouků musí být dodržena stanovená střední hodnota poloměru oblouku. Pro zkušební oblast 4 je to střední hodnota

$$R_m = 300_{-20}^{+50} \text{ m}.$$



Obr. 6 Porovnání dosahované kvazistatické vodící síly na nabíhající kole první nápravy v obloucích velmi malých poloměrů v závislosti na hmotnosti lokomotivy.

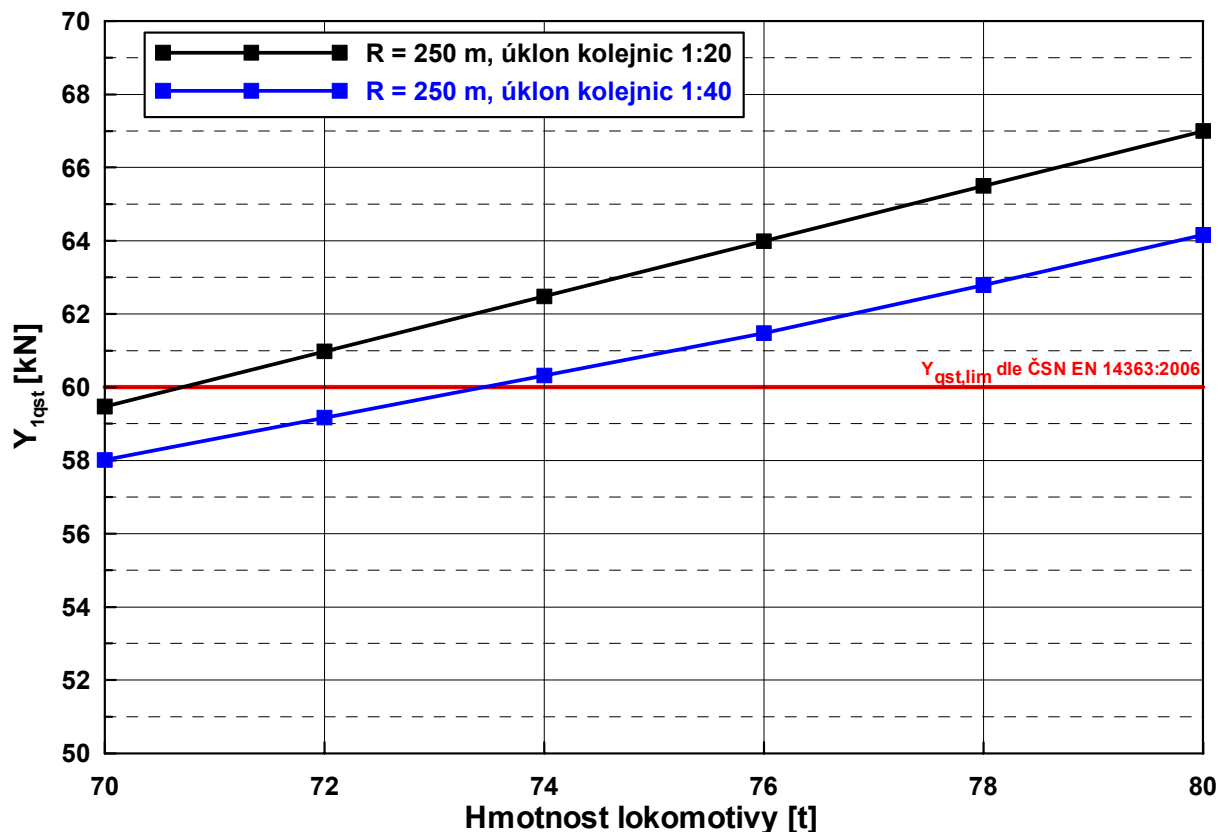
- Pokud by se vodící vlastnosti lokomotivy, tedy kvazistatické vodící síly, hodnotily podle návrhu vyhlášky UIC 518, vyhovovala by lokomotiva i pro maximálně navrhovanou alternativu hmotnosti 80 t (viz Obr. 7).



Obr. 7 Porovnání dosahované kvazistatické vodící síly na nabíhající kole první nápravy v obloucích velmi malých poloměrů v závislosti na hmotnosti lokomotivy.

Dále byl sledován vliv úklonu kolejnic, výpočty byly dále provedeny pro charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí-kolej odpovídající jízdnímu obrysu ORE S1002 na kolejnicích UIC60/1:40. Hodnoty dosahovaných kvazistatických sil na nabíhající kole první nápravy se snížily oproti výsledkům na úklonu kolejnic 1:20 o 2.5÷4.5% (viz Obr. 8).

Z porovnání kvazistatické vodící síly (příznivější průběh vodící síly na koleji s úklonem 1:40) vyplývají lepší vodící vlastnosti podvozku a celé lokomotivy na koleji s úklonem 1:40. Toto zjištění plně koresponduje s výsledky simulací vodících vlastností jiných kolejových vozidel (viz např. [7]).



Obr. 8 Porovnání dosahované kvazistatické vodící síly na nabíhající kole první nápravy v oblouku $R = 250$ m v závislosti na hmotnosti lokomotivy a pro kolej s úklonem kolejnic 1:20 a 1:40.

5. Závěr

Pomocí programového systému jízdy kolejového vozidla vyvíjeného na DFJP byla provedena analýza vodících vlastností nového podvozku dieselelektrické lokomotivy řady 744.0. Byla sledována dosahovaná kvazistatická vodící síla při průjezdu oblouky velmi malých poloměrů při různých vstupních hodnotách simulace jízdy. Hodnocení bylo provedeno dle ČSN EN 14363 a podle návrhu vyhlášky UIC 518 (2007).

Výsledky simulačních výpočtů tvoří tak nedílnou součást vývoje nového podvozku a lokomotivy, které se budou dále upřesňovat na základě zpřesňujících charakteristik nově vyvíjené lokomotivy společností CZ LOKO a.s. Skutečné ověřování jak vodících, tak i jízdnicích vlastností lokomotivy bude provedeno na základě rozsáhlých zkoušek na prototypu lokomotivy 744.0 v budoucím období.

Poznámka: Výsledky prezentované v tomto článku byly řešeny v rámci projektu VaV Ministerstva průmyslu a obchodu „IMPULS“ ev.č. FI-IM4/042 „Výzkum a vývoj modulových dvounápravových podvozků dieselelektrických lokomotiv“.

Literatura:

- [1] KOPAL J.: *Pojezd lokomotiv provenience CZ LOKO a.s.* Sborník přednášek XIX. konference s mezinárodní účastí *Současné problémy v kolejových*

- vozidlech,21.-22. září 2009, ASI Česká Třebová, Univerzita Pardubice, 2009, ISBN 978-80-7395-199-3, str.1-6.
- [2] ZELENKA J.: *Jízdní a vodící vlastnosti dvounápravových dieselelektrických lokomotiv CZ LOKO*. Nová železniční technika, č. 6/2009, (v tisku).
- [3] ČSN EN 14363:2006. *Železniční aplikace – Přejímací zkoušky jízdních charakteristik železničních vozidel – Zkoušení jízdních vlastností a stacionární zkoušky*. Český normalizační institut, 2006.
- [4] IZER, J., ZELENKA, J., LATA, M., POLÁČEK, J., SÁLA, P. *Interakce dopravních prostředků a dopravní cesty*. Dílčí zpráva plnění výzkumného záměru za rok 2000. Česká Třebová: 2000.
- [5] IZER, J., ZELENKA, J. *Optimalizace vypružení elektrického motorového vozu ř. 471*. Sborník přednášek XIII. Mezinárodní konference “Současné problémy v kolejových vozidlech”. Pardubice: Univerzita Pardubice, 1997, s. 87-95. ISBN 80-7194-105-0.
- [6] KAVÁN, P. *Výzkum problematiky jízdy železničních vozidel s malými koly*. Kandidátská disertační práce, Pardubice, 2000.
- [7] ZELENKA J., ŠPALEK P.: *Simulační výpočty vodících vlastností lokomotivy řady 380, posuzování vlivu mezipodvozkové vazby*. Sborník přednášek XIX. konference s mezinárodní účastí Současné problémy v kolejových vozidlech,21.-22. září 2009, ASI Česká Třebová, Univerzita Pardubice, 2009, ISBN 978-80-7395-199-3, str.195-198.

Česká Třebová, listopad 2009

Lektoroval: Ing. Pavel Matys
vedoucí oddělení Konstrukce a
projekce
CZ LOKO a.s.