

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Hmotnostní parametry železničních vozidel
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Adam Šlégr**
Osobní číslo: **D21624**
Studijní program: **B0788A040001 Dopravní technika**
Specializace: **Stavba vozidel**
Téma práce: **Hmotnostní parametry železničních vozidel**
Zadávající katedra: **Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů**

Zásady pro vypracování

Vyšetřování dynamických vlastností kolejových vozidel vyžaduje znalost parametrů vozidla, které nejsou vždy známy. V nenáročných případech (orientační výpočty, příklady ve výuce) přichází ke slovu odhady založené na zkušenosti či informacích o jiných typech vozidel. Úkolem bakalářské práce je vytvořit podklad pro tyto odhady na základě zpracování informací z literatury, přičemž oblast zájmu je omezena na hmotnostní parametry – hmotnost a momenty setrvačnosti konstrukčních celků železničních vozidel, které představují hlavní hmoty oddělené stupni vypružení.

Vypracujte:

1. Přehled teorie týkající se pojmů z mechaniky tuhých těles – hmotnost, těžiště tělesa, moment setrvačnosti, poloměr setrvačnosti.
2. Přehled údajů získaných z literatury, příp. jiných poskytnutých zdrojů – hmotnostní parametry železničních vozidel a jejich hlavních konstrukčních celků (skříň, podvozky, dvojkolí).
3. Analýzu získaných údajů a nalezení přibližných vztahů pro momenty setrvačnosti v závislosti na hmotnosti a celkových rozměrech těles pro různé skupiny vozidel.

Rozsah pracovní zprávy: **35 stran**
Rozsah grafických prací: **dle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] STEJSKAL, V., STEJSKAL, S. a BROUSIL, J. *Mechanika III.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00918-1.
[2] BEER, F. P. at al. *Vector Mechanics for Engineers – Statics and Dynamics.* 9th edition. McGraw-Hill Companies, New York, 2009. ISBN 978-0-07-352940-0.
[3] IZER, J. et al. *Kolejové vozy.* Bratislava: Alfa, 1986.
[4] LATA, M. *Konstrukce kolejových vozidel II.* Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. ISBN 80-7194-696-6.
[5] Odborná literatura (články ve vědeckých časopisech, technické zprávy, studentské práce) obsahující dynamické modely a konstrukční parametry vozidel.
[6] Katalogy výrobců vozidel nebo jejich komponent.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Voltr, Ph.D.**
Výukové a výzkumné centrum v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **9. února 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **10. května 2024**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Petr Tomek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 9. února 2024

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 10.5.2024

Adam Šlégr

Poděkování

Úvodním odstavcem bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, doc. Ing. Petru Voltrovi, Ph.D., za přívětivé téma a hlavně čas, který mi byl ochoten věnovat právě tehdy, když jsem ho potřeboval. Bude dobré zde zmínit též autory kvalitních publikací ve shodné oblasti, bez jejichž dat by takováto práce nemohla vůbec vzniknout. Vyjádření díky rodině za vytváření příznivých podmínek pro tvorbu jest posledním a neopomenutelným bodem zdejší části.

Anotace

V této bakalářské práci je představen postup, na jehož základě je možno odhadnout hmotové momenty setrvačnosti skříní, podvozků a dvojkolí železničních vozidel. Zpočátku je předložen rozbor základních pojmů z mechaniky tuhých těles, z jehož poznatků je čerpáno při výběru dat ze získaných zdrojů a taktéž při jejich samotném zpracování. S pomocí náhradního tělesa jsou nalezeny přibližné vztahy pro výpočet požadovaných parametrů. Potřebné údaje z jednotlivých zdrojů jsou seřazeny v tabulkách a momenty vykresleny v grafech.

Klíčová slova

hmotový moment setrvačnosti, těžiště, hmotnost, železniční vozidlo

Title

Mass Parameters of Railway Vehicles

Abstract

In this bachelor thesis is found a procedure for estimating mass moments inertia of car chassis, bogies and wheel sets of railway vehicles. Firstly the analysis of basic terms of solid mechanics is presented. It is used as a basis for data selection from acquired sources and also in the actual processing of the data. Approximate relations necessary for calculation the required parameters are found with the help of a substitute solid. Data from the individual documents are arranged in tables and moments are shown in charts.

Keywords

mass moment of inertia, mass, center of mass, railway vehicle

Obsah

Seznam symbolů.....	10
1 Úvod.....	11
2 Přehled vybraných pojmů.....	12
2.1 Tíha a hmotnost	12
2.2 Těžiště tělesa.....	13
2.3 Moment setrvačnosti.....	14
2.3.1 Steinerova věta.....	15
2.4 Poloměr setrvačnosti.....	15
3 Rozbor vstupních dat.....	16
3.1 Design Data on Suspension Systems of Selected Rail Passenger Cars [3]	18
3.2 Engineering Data on Selected High Speed Passenger Trucks [4]	19
3.3 Optimization of Rail Profiles to Improve Vehicle Running Stability in Switch Panel of High-Speed Railway Turnouts [5].....	20
3.4 Modeling and validation of Gatimaan Express with Matlab/Simulink [6].....	20
3.5 Dynamic, stability and safety analysis of wagons on MD52 bogies with modified suspension springs [7].....	21
3.6 Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions [8]	21
4 Odvození vztahů.....	22
4.1 Dvojkolí	22
4.1.1 Těžiště.....	22
4.1.2 Momenty setrvačnosti.....	23
4.2 Podvozky	24
4.2.1 Těžiště.....	24
4.2.2 Momenty setrvačnosti.....	25
4.3 Skříně.....	27
4.3.1 Těžiště.....	27
4.3.2 Momenty setrvačnosti.....	28
5 Závěr.....	30

Literatura.....	31
Seznam příloh	34

Seznam symbolů

a	[m]	rozvor podvozku
b	[m]	vzdálenost rovnoběžných os
c	[m/s]	rychlost
d	[m]	délka skříně vozidla
e	[m]	vzdálenost otočných čepů
E_k	[J]	energie kinetická
D_x, D_y, D_z	[kg·m ²]	deviační moment k osám yz, xz, xy
g_{dx}, g_{dy}, g_{dz}	–	konstanta pro výpočet momentu setrvačnosti dvojkolí v ose x, y, z
g_{px}, g_{py}, g_{pz}	–	konstanta pro výpočet momentu setrvačnosti podvozku k ose x, y, z
g_{sx}, g_{sy}, g_{sz}	–	konstanta pro výpočet momentu setrvačnosti skříně v ose x, y, z
j	[m]	poloměr setrvačnosti
J	[kg·m ²]	moment setrvačnosti
J_x, J_y, J_z	[kg·m ²]	moment setrvačnosti k ose x, y, z
J_{dx}, J_{dy}, J_{dz}	[kg·m ²]	moment setrvačnosti dvojkolí k ose x, y, z
J_{px}, J_{py}, J_{pz}	[kg·m ²]	moment setrvačnosti podvozku k ose x, y, z
J_{sx}, J_{sy}, J_{sz}	[kg·m ²]	moment setrvačnosti skříně k ose x, y, z
k	[m]	rozchod koleje
m_i	[kg]	hmotnost i -tého hmotného bodu či tělesa
m, m_k, m_r	[kg]	hmotnost, hmotnost kolébky, hmotnost rámu
m_d, m_p, m_s	[kg]	hmotnost dvojkolí, podvozku, skříně
r	[m]	poloměr kola
P, P_i	[m]	poloměr, vzdálenost i -tého hmotného bodu od osy rotace
R	–	koeficient korelace
\check{s}	[m]	šířka skříně vozidla
T	–	bod značící polohu těžiště tělesa či soustavy těles
u	[m]	rozchod dvojkolí
v	[m]	výška skříně vozidla nad temenem kolejnice
V	[m ³]	objem
$\vec{w}, \vec{w}_i, \vec{w}_T$	–	polohový vektor elementu dm , i -tého hmotného bodu (tělesa), těžiště
x	[m]	souřadnice podélné osy
x_i	[m]	poloha i -tého hmotného bodu (tělesa) v ose x
x_T	[m]	souřadnice těžiště v ose x
y	[m]	souřadnice příčné osy
y_i	[m]	poloha i -tého hmotného bodu (tělesa) v ose y
y_T	[m]	souřadnice těžiště v ose y
z	[m]	souřadnice svislé osy
z_i	[m]	poloha i -tého hmotného bodu (tělesa) v ose z
z_T	[m]	souřadnice těžiště v ose z
z_r, z_k, z_p, z_s	[m]	výška těžiště rámu, kolébky, podvozku, skříně nad temenem kolejnice
ρ	[kg/m ³]	hustota
ω	[1/s]	úhlová rychlost

1 Úvod

Hodnoty momentů setrvačnosti jsou pro vysokoškolské výpočty podstatnou, avšak ne vždy uváděnou charakteristikou železničních vozidel. Jelikož si výrobci údaje svých vozidel střeží jako oko v hlavě, nezbyvá nám mnoho způsobů, jak se k takovýmto informacím dostat. Ať už legálně, nebo i nelegálně.

A pokud žádané informace nevíme a neumíme získat, tak si je prostě vymyslíme. Proč v tom hledat nějaké složitosti! Malý zádrhel bude pouze v tom, pokud budeme požadovat, aby vymyšlené hodnoty alespoň přibližně odpovídaly realitě. Za těchto podmínek je ku prospěchu věci mít k dispozici nějaký tahák. Třeba v podobě přehledu dat z jiných vozidel.

A právě na tuto oblast cílí ona bakalářská práce. A ambice má dokonce ještě vyšší. Jelikož lze výpočtem stanovit moment setrvačnosti geometrického tělesa se spojitě rozloženou hmotností, nabízí se otázka, zda-li po náhradě konstrukčního celku právě tímto tělesem půjdou použít pro odhad momentu tytéž vztahy, byť poněkud upravené. A zajisté je také nutné posoudit, jak tyto budou přesně reflektovat skutečnost.

Pochopitelně by zde bylo možné při znalosti výrobní dokumentace či skutečných rozměrů a hmotností hodnoty momentu exaktně spočítat, nicméně by byl tento přístup svou pracností mnohdy zbytečně složitý.

2 Přehled vybraných pojmů

2.1 Tíha a hmotnost

Tíha tělesa je vektorová veličina, která vyjadřuje sílu, kterou těleso působí v gravitačním poli na podložku či závěs. Tuto sílu můžeme změřit například pružinou. Dle velikosti tíhy se pružina prodlouží o přesně definovaný kus. S pomocí stejných závaží, jejichž tíhu budeme považovat za jednotku, můžeme postupným přidáváním vytvářet značky, o kolik se pružina prodloužila, a tím pružinu kalibrovat. Pokud na takto kalibrovanou pružinu zavěsíme těleso, zjistíme jeho tíhu dle prodloužení pružiny.

Tíha však nezávisí pouze na tělesu. Na Měsíci by tíha byla zcela jistě jiná, asi šestkrát menší než na Zemi. Nicméně ani na zemi není situace všude stejná, jelikož se mění v závislosti na zeměpisné šířce. Na pólech má těleso o 0,5 % vyšší tíhu než na rovníku.

Bylo však prokázáno, že poměr tíhy dvou těles se nezmění, jsou-li obě tělesa vystavena stejným podmínkám. Pokud tedy dvě závaží roztáhnou pružinu stejně na pólu, totéž bude platit i na rovníku. Této skutečnosti můžeme velice dobře využít pro definování pojmu hmotnost. Jako ilustrace, jak zjistit hmotnost, nejlépe vynikne případ vážení na obyčejných pákových vahách. Je dokázáno, že hmotnost dvou těles položených na miskách rovnoramenných vah je stejná, jestliže váhy po ustálení vykazují nulovou výchytku z rovnovážné polohy. Pokud takovýto pokus provedeme na rovníku a poté na pólu, zjistíme, že tíha tělesa i závaží se změní stejně, tudíž v obou případech zůstanou váhy v rovnováze. Tentýž výsledek obdržíme i na Měsíci.

Hmotnost je tedy na rozdíl od tíhy neměnná vlastnost tělesa, která závisí jen a pouze na tělese samém, ne však na vnějších podmínkách, kterým je těleso vystaveno. Z čehož také vyplývá, že na rozdíl od tíhy je hmotnost veličinou skalární.

K měření hmotnosti i tíhy těles je nutno zvolit určitou jednotku. To znamená sestavit závaží (etalon) a za jednotku ho prohlásit. Na začátku byly snahy vytvořit jakýsi přirozený etalon hmotnosti. Bylo dohodnuto, že etalon jednoho kilogramu bude mít takovou hmotnost, aby na pákových vahách vyvážil 1 dm³ vody o teplotě 4 °C. Nicméně tento přístup má celou řadu neduhů. Jednak zjištění požadovaného objemu je zatíženo velkou nepřesností, druhak vyvstává řada otázek týkající se samotné vody. Má být chemicky čistá? Bez vzduchových bublin? Destilovaná?

Kvůli zpřesnění hodnot bylo od tohoto přístupu úspěšně upuštěno a za etalon kilogramu bylo přijato speciálně upravené závaží (válec ze slitiny platiny a iridia), které je uloženo v Sèvres ve Francii. Nicméně i tento přístup se ukázal časem jako nespolehlivý, neboť etalon ztratil v průběhu let jistou část své hmotnosti (asi 50 mikrogramů). Bohužel není zcela jasná příčina, spekuluje se o úniku vodíku, který se do etalonu mohl dostat při zpracovávání či o opotřebení otěrem při čištění. Vyloučen však není ani obrácený případ, že naopak narostla hmotnost ostatních národních etalonů.

Z těchto důvodů je dnes etalon kilogramu definován pomocí Planckovy konstanty, zařazené na konkrétní hodnotě, což zaručuje jeho stálost.

Hustota

Při výpočtech nebo odhadech hmotnosti se zcela jistě setkáme i s pojmem hustota tělesa. Jedná se o hmotnost objemové jednotky materiálu a tyto hodnoty lze jednoduše vyčíst z tabulek. Hmotnost [kg] zjistíme velice jednoduše dle vzorce $m = \rho \cdot V$, kde ρ [kg/m³] je tabelovaná hustota materiálu a V [m³] je objem součásti. Pochopitelně se musí jednat o spojitá tělesa. Bude-li těleso nehomogenní či pórovité, tak je třeba tuto skutečnost ve výpočtu zohlednit.

2.2 Těžiště tělesa

Tuhé těleso si v mechanice představujeme jako soustavu hmotných bodů, které jsou vůči sobě pevně vázány. Na všechny hmotné body působí v kterémkoli tíhovém poli tíhová síla, která je úměrná hmotnosti a tíhovému zrychlení. Pro jednoduchost je vhodné uvažovat, že jednotlivé tíhové síly jsou navzájem rovnoběžné. Výslednici těchto sil na soustavu zjistíme jejich prostým součtem. Její hodnota udává celkovou tíhu tělesa.

Působíště výslednice stanovíme z rovnováhy momentů. Je-li soustava v rovnováze, poté platí, že součet momentů tíhových sil jednotlivých hmotných bodů k jakési přímce je roven nule. Tuto přímku nazýváme těžnicí. Pootočíme-li soustavu, změní se poloha těžnice v tělese. Průsečík všech možných těžnic nazýváme těžištěm soustavy T. Tento bod je zároveň působíštěm výslednice tíhových sil na celou soustavu.

Těžiště je významné nejen ve statických úlohách zabývajících se rovnováhou, nýbrž má mimořádné postavení i v úvahách z oblasti dynamiky.

Těžiště soustavy je jednoznačně definováno polohovým vektorem \vec{w}_T , který stanovíme:

$$\vec{w}_T = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{w}_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1)$$

Rovnice (1) převedená do skalární podoby má podobu:

$$x_T = \frac{\sum_{i=1}^n x_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}; \quad y_T = \frac{\sum_{i=1}^n y_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}; \quad z_T = \frac{\sum_{i=1}^n z_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2)$$

Pro popis těžiště tuhého tělesa přechází rovnice (1) do integrálního tvaru.

$$\vec{w}_T = \frac{\int \vec{w} \cdot dm}{\int dm} \quad (3)$$

Analogicky jako u soustav těles budiž uveden vztah (3) též převedený do skalární podoby:

$$x_T = \frac{\int x \cdot dm}{\int dm}; \quad y_T = \frac{\int y \cdot dm}{\int dm}; \quad z_T = \frac{\int z \cdot dm}{\int dm}. \quad (4)$$

2.3 Moment setrvačnosti

Podobně jako hmotnost charakterizuje setrvačnost tělesa při posuvném pohybu, tak moment setrvačnosti ji charakterizuje při pohybu rotačním. Budeme-li uvažovat hmotný bod pohybující se po kružnici o poloměru P úhlovou rychlostí ω , jeho kinetická energie se vypočte dle rovnice:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m P^2 \omega^2 = \frac{1}{2} J \omega^2, \quad (5)$$

kde veličina $J = mP^2$ představuje moment setrvačnosti hmotného bodu. Moment setrvačnosti tedy závisí jak na hmotnosti, tak na jejím rozložení, konkrétně na kvadrátu vzdálenosti od osy rotace.

Jedná-li se o moment setrvačnosti soustavy hmotných bodů k jedné ose rotace, stačí sečíst jednotlivé momenty setrvačnosti:

$$J = \sum m_i P_i^2. \quad (6)$$

Pro hmotné těleso se spojitým rozložením hmoty můžeme rovnici (6) přepsat do integrálního tvaru, J je tzv. polární moment setrvačnosti:

$$J = \int P^2 \cdot dm. \quad (7)$$

To znamená, že momenty setrvačnosti k jednotlivým osám vypočteme:

$$\begin{aligned} J_x &= \int (y^2 + z^2) \cdot dm = \int (y^2 + z^2) \cdot \rho \cdot dV \\ J_y &= \int (x^2 + z^2) \cdot dm = \int (x^2 + z^2) \cdot \rho \cdot dV \\ J_z &= \int (x^2 + y^2) \cdot dm = \int (x^2 + y^2) \cdot \rho \cdot dV. \end{aligned} \quad (8)$$

Kromě těchto momentů se u těles či soustav hmotných bodů vyskytovat takzvané deviační momenty, které vypočteme dle následujících rovnic:

$$\begin{aligned}D_{xy} &= \int xy \cdot dm = \int xy \cdot \rho \cdot dV \\D_{xz} &= \int xz \cdot dm = \int xz \cdot \rho \cdot dV \\D_{yz} &= \int yz \cdot dm = \int yz \cdot \rho \cdot dV.\end{aligned}\tag{9}$$

Deviační moment se tedy vztahuje ke dvěma osám. Zkrácené označení (např. D_z) znamená, že se tento vztahuje ke dvěma osám zbývajícím (v tomto případě x a y). Jelikož se ve vzorci nevyskytuje čtverec vzdálenosti, může deviační moment nabývat též záporných nebo nulových hodnot.

Hlavní osou setrvačnosti nazýváme právě tu osu, ke které má těleso deviační momenty nule. Pochopitelně jsou tím myšleny pouze deviační momenty v těch rovinách, ve kterých ona osa leží. Pokud tedy má být například osa x hlavní osou setrvačnosti, musí se hodnoty deviačních momentů D_{xy} a D_{xz} rovnat nule. Každým bodem tělesa je možné vést právě tři navzájem kolmé hlavní osy setrvačnosti.

2.3.1 Steinerova věta

Dle vztahu (8) vypočítáme moment setrvačnosti v osách x , y , z vždy k ose procházející těžištěm tělesa. Pokud však těleso rotuje kolem osy jiné, je situace poněkud složitější. Jedná-li se o osu rovnoběžnou s osou těžištní, zjistíme moment setrvačnosti dle Steinerovy věty, která zní:

$$J = J_T + mb^2.\tag{10}$$

Nový moment setrvačnosti bude vždy větší o hmotnost násobenou kvadrátem vzdálenosti os než moment setrvačnosti, který je vztažen k ose původní.

2.4 Poloměr setrvačnosti

Při znalosti momentu setrvačnosti tělesa J a jeho hmotnosti m můžeme definovat další veličinu zvanou poloměr setrvačnosti j , dle vzorce:

$$j = \sqrt{\frac{J}{m}}.\tag{11}$$

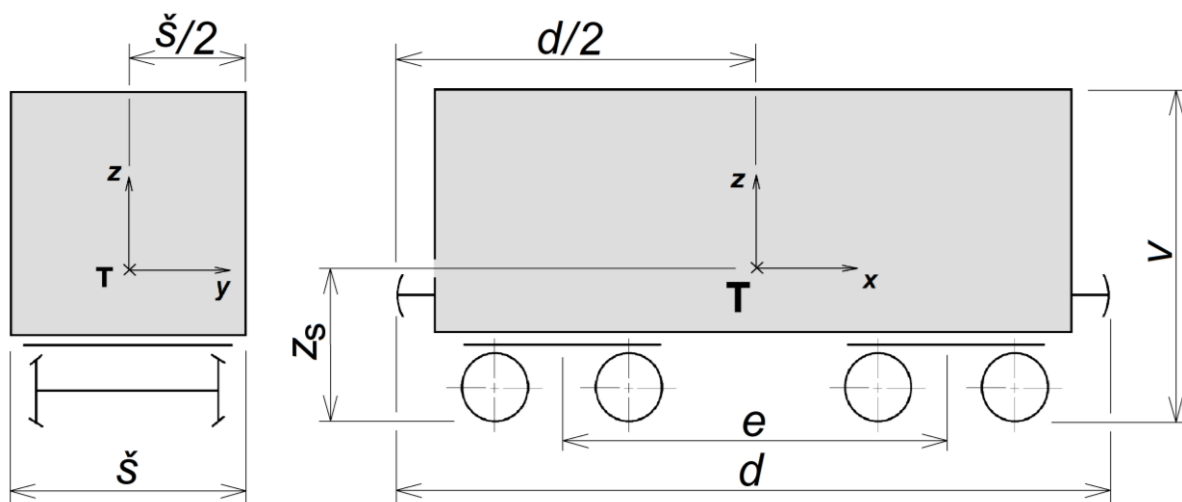
Rozumí se tím právě takový rozměr, na jehož poloměru by musela být soustředěna veškerá hmotnost tělesa tak, aby moment setrvačnosti J byl shodný s momentem setrvačnosti vyšetřovaného tělesa. Někdy je též nazýván jako gyrační poloměr.

3 Rozbor vstupních dat

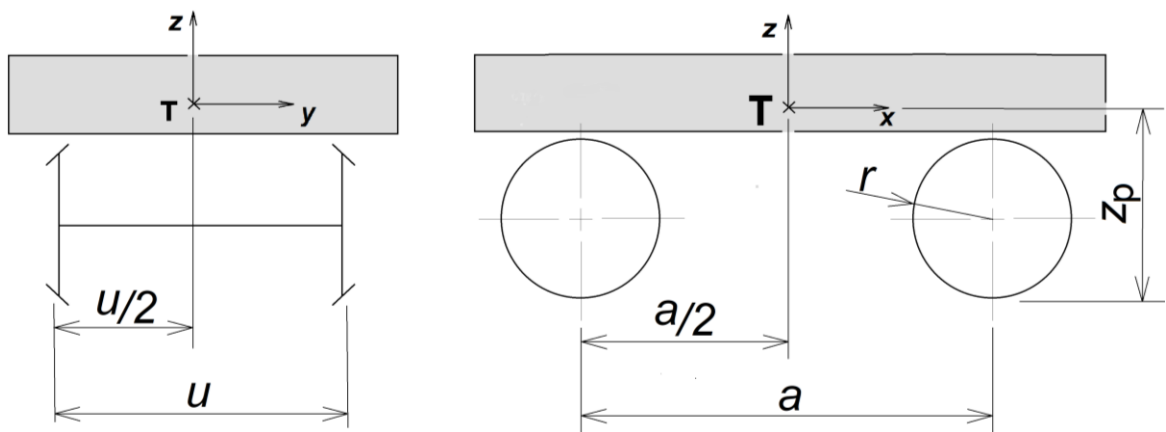
V předcházející kapitole byly představeny vybrané parametry hmotných těles, se kterými se budeme pochopitelně potkávat i nadále. Jen se od poznatků obecných přesuneme k poněkud konkrétnějším. K vyšetřování dynamického chování soustav těles je nutno tyto, ale i příbuzné pojmy znát a rozumět jejich významu.

V práci nebylo pracováno s parametry vztahujícími se k vozidlu jako celku. To samotné muselo být nejprve rozděleno na dílčí části, kterým byla následně věnována péče. Klíčovým faktorem pro nalezení hranic mezi jednotlivými celky byla existence prvků majících výrazně nižší tuhost než vazby ostatní. V našem kontextu je tímto myšleno zejména vypružení, neboť právě to umožňuje různé dynamické chování jednotlivých soustav.

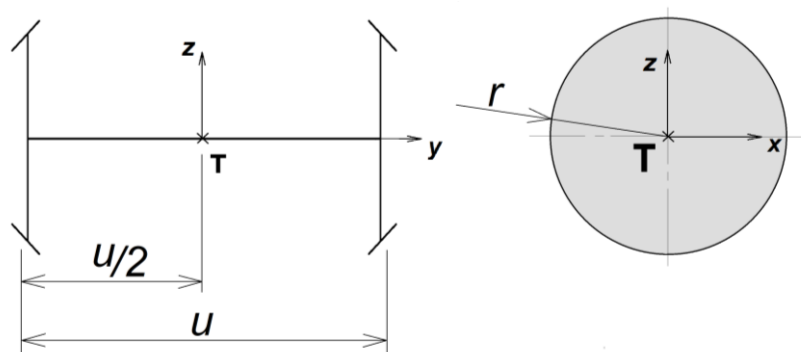
Existuje však mnoho různých koncepcí vozidel a taktéž mnoho dokumentů, v kterých nejsou uvedeny přesně stejné údaje. Aby vůbec byla data mezi sebou porovnatelná, výstupy přehledné a náročnost práce reflektovala schopnosti autora, muselo být přijato mnoho zjednodušení. V práci byly tedy uvažovány pouze 3 kategorie: skříně vozidel, podvozky a dvojkolí, kterým byly přiřazeny charakteristické veličiny a hodnoty. Taktéž bylo nutno ujasnit si souřadný systém, k jehož osám budou momenty setrvačnosti a souřadnice těžiště stanovovány. Jelikož ve všech zdrojích je držena shodná konvence, nebude se ani tato práce lišit. Orientace os a poloha počátku souřadnicového systému x , y , z bude nejlépe patrna z jednotlivých nákrešů.



Obr. 1: Nákreš skříně vozidla



Obr. 2: Nákres podvozku vozidla



Obr. 3: Nákres dvojkolí vozidla

Vlastní informace byly nejčastěji čerpány z odborných prací zabývajících se různými výpočty a závěrečných prací studentů vysokých škol. Ačkoliv v naší zemi sídlí několik výrobců kolejových vozidel, použitelných hodnot publikovaných o národních vozidlech mnoho k dispozici nebylo. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k zahrnutí údajů i vozidel zahraničních, které nakonec tvoří nosnou část celé práce. Bohužel spolu s tímto krokem se též zvýšila pravděpodobnost vnesení různých chyb a nepřesností do přehledu hodnot. Nejen že mohly být některé souvislosti ztraceny v překladu, ať už z němčiny, angličtiny či jiných jazyků, ale i kvalita jednotlivých prací zdá se býti velice různorodá. Některé práce musely být z přehledu dokonce vyřazeny, ať už kvůli hrubým nesrovnalostem v textu nebo kvůli hodnotou podivným údajům.

Objevila se zde též skupina zdrojů, které i přes nesrovnalosti použity byly. Nicméně zde muselo být přistoupeno ke korekci údajů. Ta byla sice prováděna s pokorou, nicméně není zaručeno, že to autor tak, jak bylo převzato, původně opravdu myslel.

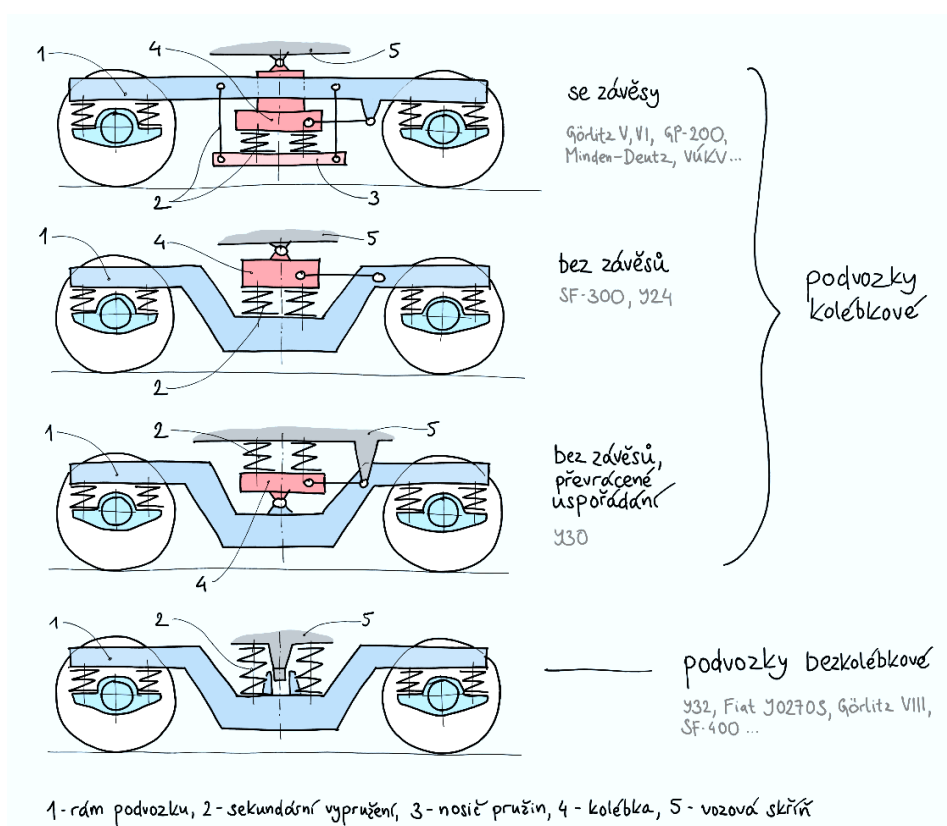
V neposlední řadě byl problém s některými délkovými rozměry. Pokud v dokumentu nebyly uvedeny a musel být na jejich základě proveden výpočet, byly tyto odhadnuty podle hodnot u vozidel podobných. Takovéto hodnoty jsou v tabulkách označeny šedým podbarvením. Výstupy této práce by to zásadním způsobem ovlivnit nemělo, neboť jich není mnoho a neměly by se od skutečných výrazně lišit.

Dále budou jednotlivě charakterizovány vybrané dokumenty, u kterých bylo nutno nějakým způsobem zasahovat do uvedených údajů, či které byly pro zpracování práce zvláště důležité.

3.1 Design Data on Suspension Systems of Selected Rail Passenger Cars [3]

Tato americká zpráva je jedním ze dvou stěžejních zdrojů, na kterém je založena celá práce. Tento dokument obsahuje spoustu zajímavých údajů týkajících se jak vozových skříní, tak i rámu podvozků a dvojkolí. Bohužel je třeba při jejich přebírání být na pozoru.

Co se týče údajů u dvojkolí, je nutno si v tabulkách všimnout, že hodnota momentu setrvačnosti k ose y se nevztahuje k samotnému dvojkolí (není v dokumentu vůbec uvedena), nýbrž k jeho nerotačním komponentám.



Obr. 4: Koncepce podvozků osobních vozů, použito s laskavým svolením autora Petra Voltra

Pojmenování kategorie podvozky není úplně nejpřesnější. Jedná se zde hlavně o parametry jejich rámu, které ale bohužel výrazně ovlivňují další součásti. A to právě ty k nim pevně připojené alespoň v některé ze souřadnicových os. Výrazné postavení má v této oblasti kolébka. Vyskytuje se několik různých uspořádání, u nichž se její vliv různí.

Podvozky bezkolébkové jsou v tomto ohledu jednoduché a převzaty byly hodnoty charakterizující rám podvozku.

U kolébkových podvozků, kde se kolébka nachází nad sekundárním vypružením byly vybrány jako reprezentativní údaje hmotnost, moment J_x a J_y rámu podvozku a moment J_z jako prostý součet momentů rámu podvozku a kolébky.

U kolébkových podvozků, kde se nachází sekundární vypružení mezi kolébkou a skříní byla situace přesně opačná. J_z je hodnota, která ve zdrojové zprávě přísluší rámu podvozku, hodnoty hmotnosti a momentů J_x a J_y jsou uvedeny jako součet údajů u rámu podvozku a kolébky. Hmotnosti lze sečíst jednoduše jako dvě čísla, u momentů J_x a J_y je to však horší, jelikož nejsou v tabulce vztaženy ke shodné ose. Proto bylo nutno nejdříve určit výškovou souřadnici těžiště soustavy z_p dle rovnice:

$$z_p = \frac{m_r \cdot z_r + m_k \cdot z_k}{m_r + m_k}. \quad (12)$$

Poté mohly být dle Steinerovy věty sečteny jednotlivé momenty. Postup výpočtu je uveden v následujících rovnicích:

$$\begin{aligned} J_{px} &= J_{kx} + J_{rx} + m_r \cdot (z_T - z_r) + m_k \cdot (z_k - z_r) \\ J_{py} &= J_{ky} + J_{ry} + m_r \cdot (z_T - z_r) + m_k \cdot (z_k - z_r) \\ J_{pz} &= J_{rz}. \end{aligned} \quad (13)$$

Aby situace byla ještě složitější, hodnoty momentů pro části podvozků, které jsou potřeba k výpočtu, jsou ve zdroji uvedeny ve dvojích jednotkách ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$ a $\text{lb}_f \cdot \text{in} \cdot \text{sec}^2$). Jelikož hodnoty uvedené s jednotkou první mají podezřele malou hodnotu, bylo nutno si dle následující rovnice vypomoci jednotkou imperiální:

$$1 \cdot \text{lb}_f \cdot \text{in} \cdot \text{sec}^2 \cong 4,4482 \cdot \text{N} \cdot 0,0254 \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^2 \cong 0,1133 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2. \quad (14)$$

Bylo zjištěno, že ačkoliv numericky čísla odpovídají, hodnotou jsou o dva řády menší, než by měla být. Zajímavé je, že u dvojkolí se takovýto problém neobjevuje.

U skříní byly přebrány hodnoty tak, jak byly uvedeny ve zdroji. Jelikož jsou zde uvedeny poloměry setrvačnosti, je nutno je přepočítat na momenty dle rovnice:

$$J = j^2 \cdot m. \quad (15)$$

3.2 Engineering Data on Selected High Speed Passenger Trucks [4]

Je druhým stěžejním dokumentem, který poskytuje data o podvozcích a skříní vozidel z celé řady zemí.

Hmotnost je v tomto dokumentu vyjadřována jednotkou $\text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$. Aby ji šlo porovnat s hmotnostmi v ostatních dokumentech, byla tato přepočtena na kilogramy dle rovnice:

$$1 \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{sec}^2}{\text{cm}} = 100 \cdot \text{kg} \cdot \frac{\text{sec}^2}{\text{m}} = 100 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^{-2}} = 981 \cdot \text{kg}. \quad (16)$$

Z rozboru je vidět, že je zde vlastně uváděna hmotnost vztažená na jednotku zrychlení. Jelikož se nacházíme na Zemi, v přepočtu byla uvažována hodnota tíhového zrychlení $9,81 \text{ m/s}^2$.

Hodnoty v kategoriích podvozků a skříní byly přebírány shodným přístupem jako u zprávy předešlé. U vozových skříní byla ze třech druhů hmotností vybrána jako reprezentativní hmotnost pohotovostní.

Co se týče výšek skříní, vyskytují se zde též jisté nejasnosti. Při zběžném porovnání samotných hodnot s předchozím dokumentem jsou tyto podstatně nižší. Ačkoliv není v textu informace uvedena (práce se zabývá spíše podvozky), jedná se pravděpodobně o výšky měřené od podlahy vozů a nikoliv od temene kolejnice jako v ostatních zdrojích. Bylo tedy přistoupeno k sečtení těchto hodnot s výškami podlahy, které jsou v tabulce též uváděny. Tím se hodnoty z dokumentů k sobě přiblížily a je tedy možné s nimi stejně pracovat.

3.3 Optimization of Rail Profiles to Improve Vehicle Running Stability in Switch Panel of High-Speed Railway Turnouts [5]

Jedná se o dokument zabývající se spíše železničním svrškem, nicméně jsou zde v komplexní podobě uvedeny parametry vysokorychlostní jednotky CRH2. Možná právě proto vyvstávají otázky o správnosti některých údajů.

Hodnota udávající moment setrvačnosti vozidlové skříně k ose x je podezřele veliká. Je přibližně o řád větší než hodnota u vozidel srovnatelných. Jelikož nebyly nalezeny žádné informace, které tuto hodnotu ospravedlňují, byla hodnota upravena a do tabulek zapsána jako o řád menší.

Dále budí rozpory rozměr, který je popsán jako polovina vzdálenosti mezi těžišti skříní (half of distance between mass centres of car bodies). Jednak není úplně zřejmé, k čemu by takováto informace byla, druhak hodnota je poměrně malá, a to 8,5 metru. Vyplývalo by z toho, že jednotlivé vozy mají délku okolo 17 metrů, což se nezdá pravděpodobné. Z celé řady faktů to tedy vypadá, že rozměr bude asi správně, nicméně bude udávat polovinu vzdálenosti mezi těžišti podvozků. Aby měl popis takovýto význam, stačí v anglické větě změnit pouze jedno písmeno.

3.4 Modeling and validation of Gatimaan Express with Matlab/Simulink [6]

V tomto dokumentu údaje svou hodnotou zapadají do očekávaných hodnot, nicméně se totéž nedá říci o jednotkách. Autor zde udává momenty setrvačnosti v kg/m^2 , což je mimořádně podivné. Význam takovéto jednotky se v souvislosti s momenty setrvačnosti nepodařilo prokázat. Existuje proto podezření, že jde o systematickou chybu. S hodnotami bylo nakonec pracováno stejně, jako by měly jednotku $\text{kg}\cdot\text{m}^2$.

3.5 Dynamic, stability and safety analysis of wagons on MD52 bogies with modified suspension springs [7]

Dokument se zabývá podvozkem Md52 na úzkém rozchodu 1000 milimetrů. Je zde též uvedeno několik tabulek s parametry. Tabulka uvádí průměr kol 725 milimetrů, což je uvěřitelná hodnota. V tabulce další je však uvedena výška těžiště dvojkolí nad temenem kolejnice 460 milimetrů, což zase odpovídá průměru kol 920 milimetrů.

Je zde tedy určitý rozpor mezi těmito dvěma informacemi. Jelikož se podvozky Md52 vyráběly též pro normální rozchod a průměr kol 920 mm na normálně rozchodných vozidlech je velice rozšířený, nabízí se otázka, které z uvedených údajů se vztahují ke kterému podvozku. Jelikož toto nebylo rozklíčováno, nemohla být data z této zprávy vůbec čerpána.

3.6 Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions [8]

Z tohoto dokumentu byly čerpány hodnoty hmotnosti a hmotových momentů setrvačnosti skříní různých nákladních vozů s podvozky 18-100. Jsou zde uvedeny údaje pouze pro osu y .

U vozu výsypného (typ 20-9749) je však hodnota momentu setrvačnosti na pohled podivná. Vzhledem ke skutečnosti, že ve zdroji [16] je uveden moment setrvačnosti u stejného typu vozu více než dvojnásobný a s přihlédnutím k tomu, že podobně nízké hodnoty jsou uváděny pouze u momentů setrvačnosti plošinových vozů, jedná se pravděpodobně o hodnotu chybnou, nebo o hodnotu patřící jinému konstrukčnímu celku. Proto byla tato informace zahozena a pro příslušný vůz byly údaje čerpány z jiného dokumentu.

4 Odvození vztahů

Po nalezení dostatečného množství údajů v literatuře je čas sebrat odvalu a odhodlat se do další kapitoly. Ta už by mohla obsahovat nejen nekonečné statě únavného textu, nýbrž i nějaké grafy a závěry. Úvahám se ovšem nevyhneme ani na tomto místě.

Víme, že pro tělesa se spojitě rozloženou hmotností platí jisté zákonitosti, ať už se jedná o momenty setrvačnosti či polohu těžiště. Otázkou zůstává, jestli tyto poznatky jsou jednoduše převeditelné i na jednotlivé celky železničních vozidel. To, že vztahy nemůžou platit úplně přesně je pochopitelné. Zda-li však budou odpovídat alespoň rámcově, to se dozvíme v této kapitole.

Nejjednodušším a v práci použitým způsobem, jak toto dokázat je stanovení údajů výpočtem u těch částí, u kterých už jsou hodnoty známy. Vzájemným porovnáním lze poté zjistit případnou závislost. Postup práce byl tedy následující, u všech kategorií velice podobný.

Vyšetřovaný celek byl nahrazen náhradním tělesem o vypovídajících rozměrech. Nutno dodat, že rozměry jsou voleny též s ohledem na jejich dostupnost. Pokud by byly nalezeny vynikající závislosti momentů a polohy těžiště na rozměrech, které jsou ještě vzácněji známy než vyšetřované veličiny, neměla by úvaha žádného praktického významu.

Pro náhradní tělesa se spojitě rozloženou hmotností byly vypočteny momenty setrvačnosti, výsledky byly seřazeny do tabulky (nachází se mezi přílohami práce). Z hodnot skutečných a vypočtených byl sestaven bodový graf. Body byly proloženy přímkou procházející počátkem pravoúhlé soustavy souřadnic, byla vyčíslena její směrnice. Výsledný vztah pro odhad momentu setrvačnosti byl získán ze vzorce, dle kterého byl vypočten moment setrvačnosti tělesa podělením pravé strany směrnici přímky.

4.1 Dvojkolí

S dvojkolími byla práce nejjednodušší, proto od nich začneme. Jedná se o součást, kterou obsahuje téměř každé železniční vozidlo. Pro férovost argumentace je dobré zmínit, že vozidla bez dvojkolí se vyskytují na kolejích též. Jedná se ale spíše o ojedinělé konstrukce, kterými se v této práci nebudeme zabývat.

4.1.1 Těžiště

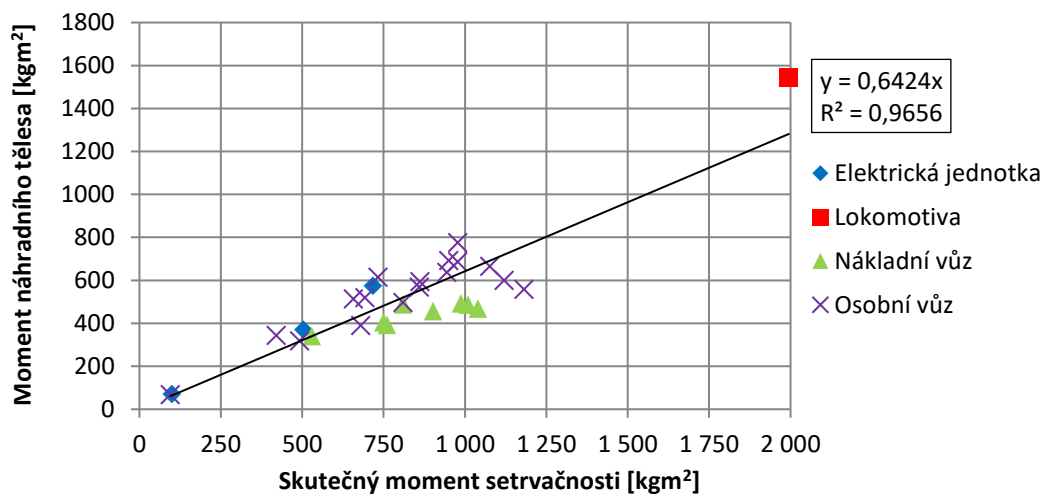
Hodnota těžiště dvojkolí v ose z je velice jednoduše stanovitelná, neboť se shoduje s poloměrem kola. V ose y se zdá, že těžiště by se mělo nacházet přesně v polovině jeho rozchodu. Tento předpoklad však platí pouze pro dvojkolí samotné. Budeme-li uvažovat další, bez vypružení připojené celky ke dvojkolí (ozubené kolo pro pohon, nápravová převodovka, dobíjecí generátor u osobních vozů a jiné), situace se může velice rychle změnit. V této oblasti však nebyl shromážděn dostatek údajů potřebných pro vyhodnocení. Proto zde nebyla žádná další analýza prováděna a bylo pracováno s tímto jednoduchým předpokladem.

4.1.2 Momenty setrvačnosti

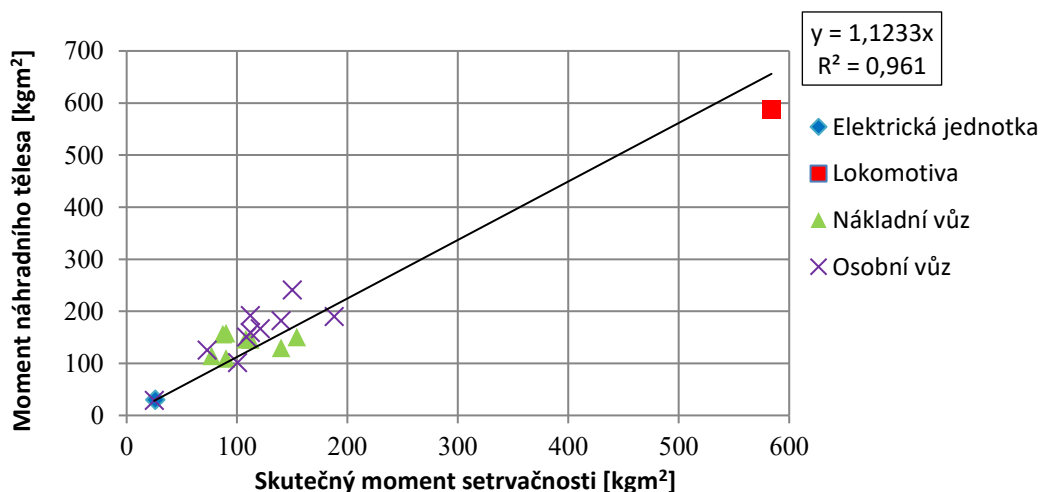
Pro nalezení vztahu pro výpočet momentu setrvačnosti byla dvojkolí nahrazena fiktivním válcem o průměru rovném průměru kol a délce rovné rozchodu koleje. Momenty takovýchto válců byly vypočteny dle rovnic:

$$J_x = J_z = \frac{m_d}{12} (3r^2 + k^2),$$

$$J_y = \frac{1}{2} m_d r^2.$$
(17)



Obr. 5: Momenty dvojkolí a náhradního tělesa k osám x a z



Obr. 6: Momenty dvojkolí a náhradního tělesa k ose y

Vypočtené hodnoty byly seřazeny do tabulky, ze které byl vytvořen bodový graf (obr. 5 a obr. 6). Každé dvojkolí tvoří vlastní bod se souřadnicemi obsahujícími hodnotu skutečného a vypočteného momentu setrvačnosti. Body byla proložena přímkou procházející počátkem pravoúhlé soustavy souřadnic, a byla odečtena její směrnice. Touto směrnici byly vyděleny pravé strany předchozích rovnic. Výsledné vztahy pro výpočet momentu setrvačnosti dvojkolí

k osám x , y , z mají tedy podobu dle rovnic (18), přičemž číselné hodnoty konstanty g obsahuje tabulka 1.

Význam konstanty g lze intuitivně rozklíčovat. Pokud bude $g = 1$, poté vypočtené momenty náhradních těles přesně číselně odpovídají momentům skutečných součástí a lze předpokládat, že hmota je v soustavě rozložena rovnoměrně. Pro $g < 1$ je moment skutečného tělesa menší než moment vypočtený pro homogenní těleso. Musí z toho tedy vyplývat nerovnoměrné rozložení hmoty. Konkrétně v tomto případě bude více hmoty soustředěno dále od vyšetřované ose. A konečně $g > 1$ značí, že vypočtená hodnota je vyšší než skutečná, tudíž má těleso více hmoty soustředěno k ose.

$$\begin{aligned} J_{dx} = J_{dz} &= \frac{m_d}{12 \cdot g_{dx}} (3r^2 + k^2) \\ J_{dy} &= \frac{1}{2 \cdot g_{dy}} m_d r^2 \end{aligned} \quad (18)$$

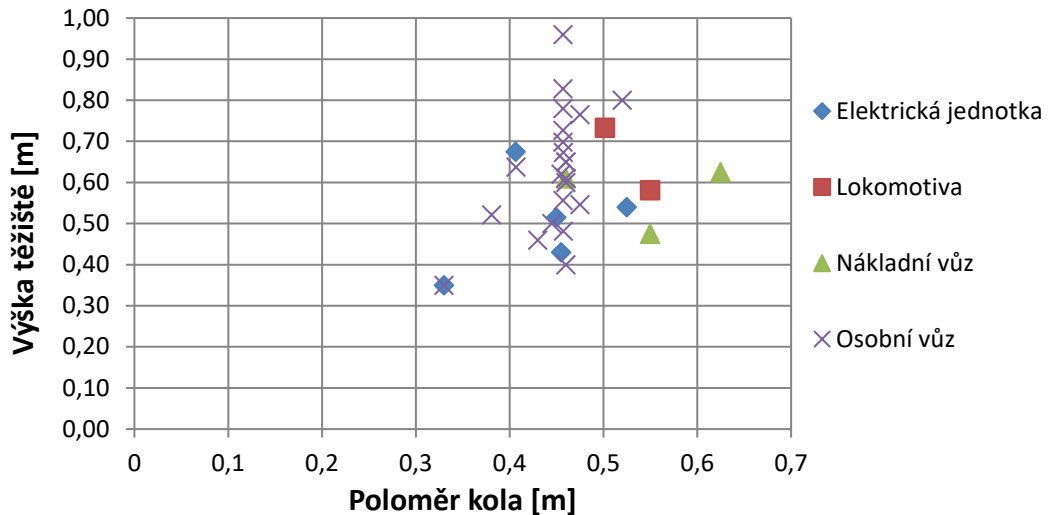
Jelikož se jedná o rotačně symetrický díl, bude moment setrvačnosti ve dvou osách nabývat stejných hodnot. Hodnoty v ose z budou tedy stejné jako v ose x . Jako ve všech oblastech se zde bohužel najdou také výjimky. Nejlépe bude toto patrné u dvojkolí hnaných tlakovým motorem. Zde totiž značná část hmotnosti motoru spočívá bez vypružení na nápravě. Samotný motor pak zvyšuje moment setrvačnosti dvojkolí různě v závislosti na vyšetřované ose. Tímto směrem bychom se však velice rychle dostali do slepé uličky, neboť pro vlastní rozbor chybí dostatek vstupních dat. Proto je v práci uvažováno, že se moment v těchto směrech neliší a bylo zde pracováno s údaji pro osu x .

4.2 Podvozky

Touto kategorií spíše rozumíme samotný rám podvozku s pevně spojenými (bez vypružení) konstrukčními celky, které se však mohou v závislosti na vyšetřované ose různit.

4.2.1 Těžiště

Výška těžiště podvozku je v přehledu méně často uváděnou charakteristikou, nicméně přesto v dostatečném počtu zastoupenou pro provedení vyšetřování. Problém nastává s charakteristikou druhou, ke které by bylo vhodné výšku těžiště vztáhnout. U podvozků se totiž zřídka udávají jeho rozměry, nejčastěji uváděnými parametry je jeho rozvor a , rozchod koleje k a poloměr kola r . Jediným známým rozměrem ležícím v ose z , který by mohl s výškou těžiště jednoznačně souviset a je k dispozici, je tedy poloměr kola. Na obr. 7 se nachází graf s výškou těžiště vztáženou právě na něj. Ukazuje se však, že i podvozky se stejným poloměrem kol mohou mít těžiště v různé výšce, tudíž zde nebude možno určit žádný obecně platný vztah. Závěrem lze pouze říci, že podvozky s menším poloměrem kola budou mít pravděpodobně níže položeno těžiště, a naopak.



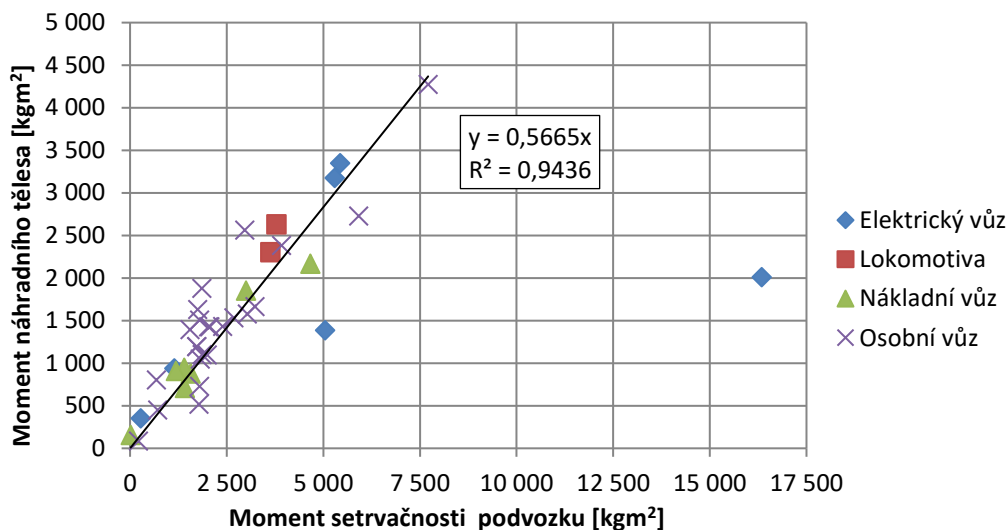
Obr. 7 Nezávislost souřadnice těžiště rámu podvozku na poloměru kola

4.2.2 Momenty setrvačnosti

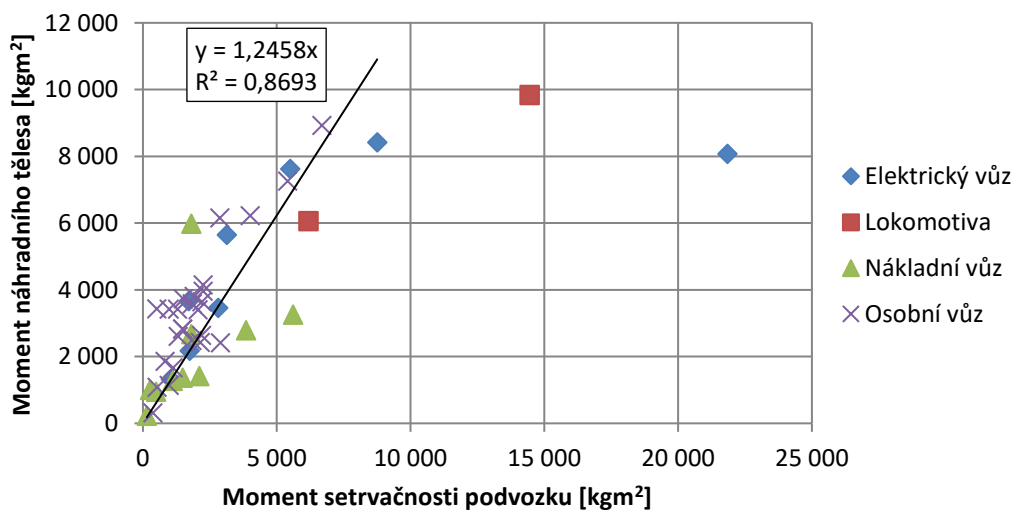
Pro odhady hodnot bylo myšleno podvozek nahradit kvádrem o rozměrech shodujících se s jeho výškou, šířkou a délkou. Jelikož se však nepodařilo u většiny podvozků hodnoty těchto rozměrů dohledat, musel být postup upraven. Náhrada kvádrem zůstala, jen jeho délka byla stanovena jako rozvor náprav zvětšený o průměr kola, šířka jako 3/2 rozchodu a výška jako průměr kola. Tomu odpovídají pro momenty setrvačnosti rovnice:

$$\begin{aligned}
 J_x &= \frac{m_p}{12} \left[\left(\frac{3}{2} \cdot k \right)^2 + r^2 \right] \\
 J_y &= \frac{m_p}{12} \left[(a + 2 \cdot r)^2 + r^2 \right] \\
 J_z &= \frac{m_p}{12} \left[\left(\frac{3}{2} \cdot k \right)^2 + (a + 2 \cdot r)^2 \right]
 \end{aligned} \tag{19}$$

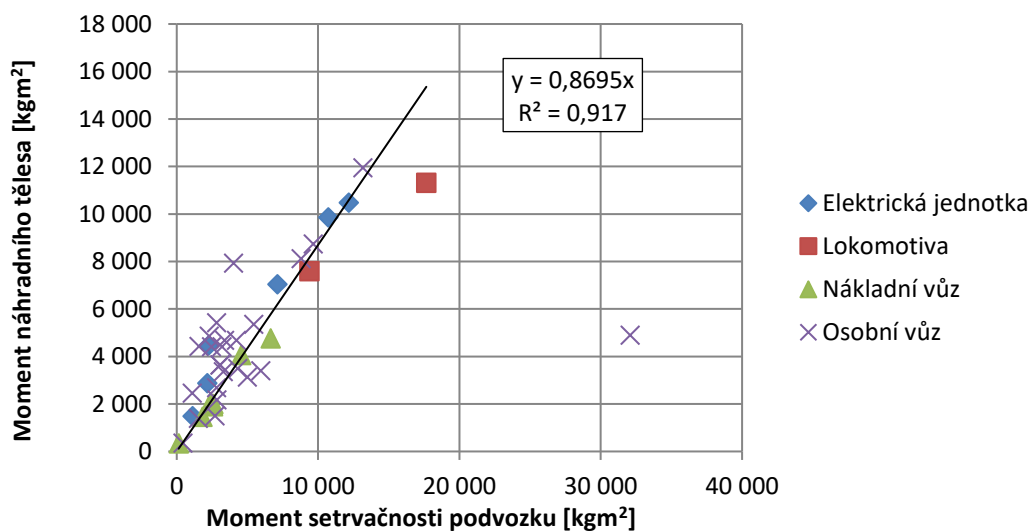
Po vykreslení hodnot do grafů je však patrné, že se zde vyskytují ojedinělé body, které jsou od shluku většiny výrazně vzdáleny. Zpravidla nabývají jejich skutečné momenty setrvačnosti vyšší hodnoty a odhady dle vzorců (19) toto nereflektují. Jelikož nebyla nalezena žádná korekce vztahů, která by tomuto jevu zabránila, byly takovéto hodnoty z další analýzy vyřazeny. Jinak by svou odlehlostí výrazně ovlivňovaly směrnice hledaných závislostí. V grafech byly hodnoty pro ilustraci ponechány. Taktéž se tomu stalo v tabulce v příloze, kde byly navíc označeny přeškrtnutím.



Obr. 8: Moment setrvačnosti podvozku a náhradního tělesa k ose x



Obr. 9: Moment setrvačnosti podvozku a náhradního tělesa k ose y



Obr. 10: Moment setrvačnosti podvozku a náhradního tělesa k ose z

Vztahy pro odhady momentů setrvačnosti podvozků poté mají následující tvar. Hodnoty konstanty g obsahuje tabulka 1.

$$\begin{aligned}
 J_{px} &= \frac{m_p}{12 \cdot g_{px}} \left[\left(\frac{3}{2} \cdot k \right)^2 + r^2 \right] \\
 J_{py} &= \frac{m_p}{12 \cdot g_{py}} \left[(a + 2 \cdot r)^2 + r^2 \right] \\
 J_{pz} &= \frac{m_p}{12 \cdot g_{pz}} \left[\left(\frac{3}{2} \cdot k \right)^2 + (a + 2 \cdot r)^2 \right]
 \end{aligned} \tag{20}$$

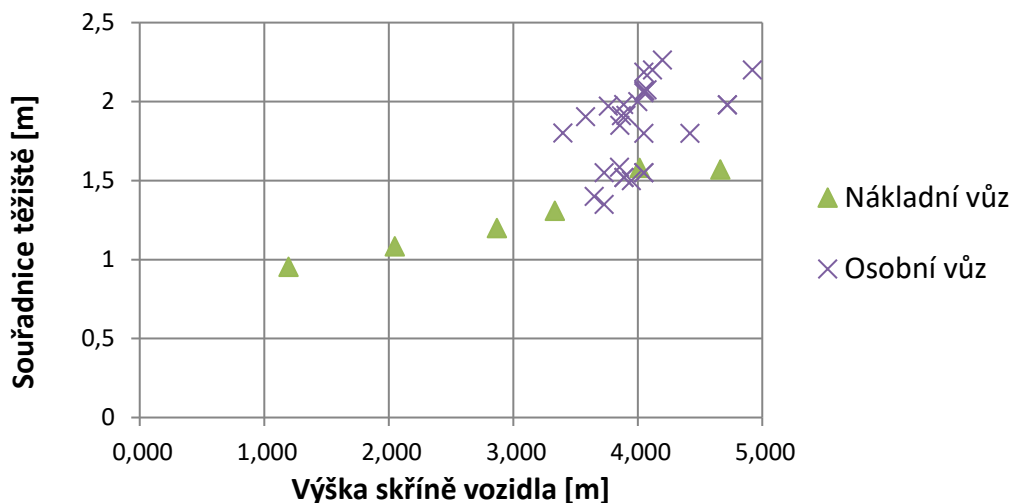
4.3 Skříně

4.3.1 Těžiště

Těžiště skříní železničních vozů bylo do grafu vyneseno též. Nutno podotknouti, že v některých dokumentech, například [4] (osobní vozy) se přímo uvádí, že pokud poloha těžiště nebyla známa, tak byla odhadnuta. V ose z byla zasazena do třetiny výšky od podlahy ke střeše.

Jako vztažná veličina byla pro náš rozbor vybrána celková výška skříně. Již zmíněný graf je k vidění na obr. 11. Data z oblasti jednotek a lokomotiv nebyly k dispozici.

Co se týče závislostí, zdá se to v této oblasti jako nadlidský úkol stanovit jednoznačné vztahy. Graf jistý trend pouze naznačuje. Jednoznačně může být prohlášeno, že výška těžiště bude narůstat s výškou skříně. Případná aproximační funkce nebude v žádném případě vycházet z nuly, nýbrž z nějaké vyšší hodnoty a bude záviset na druhu vozidla.



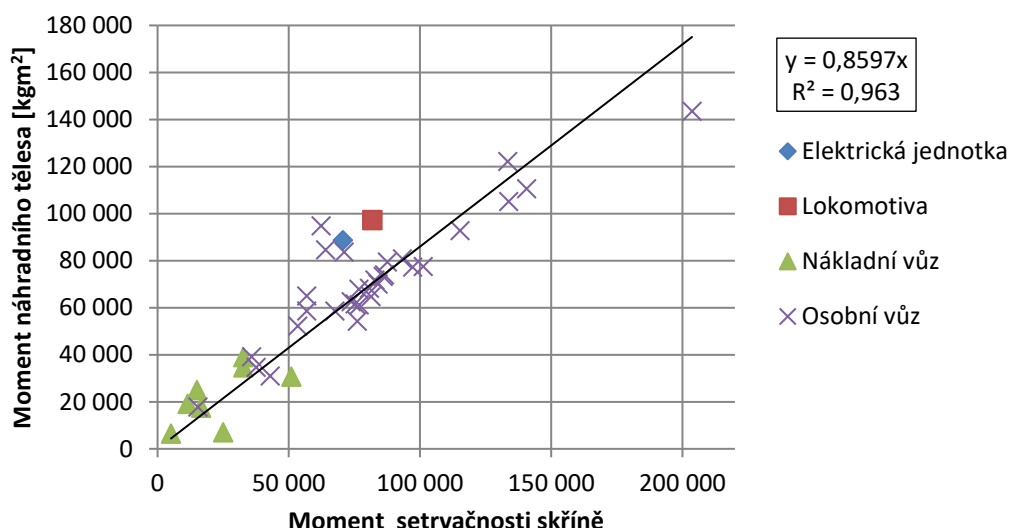
Obr. 11 Nezávislost souřadnice těžiště na výšce skříně

4.3.2 Momenty setrvačnosti

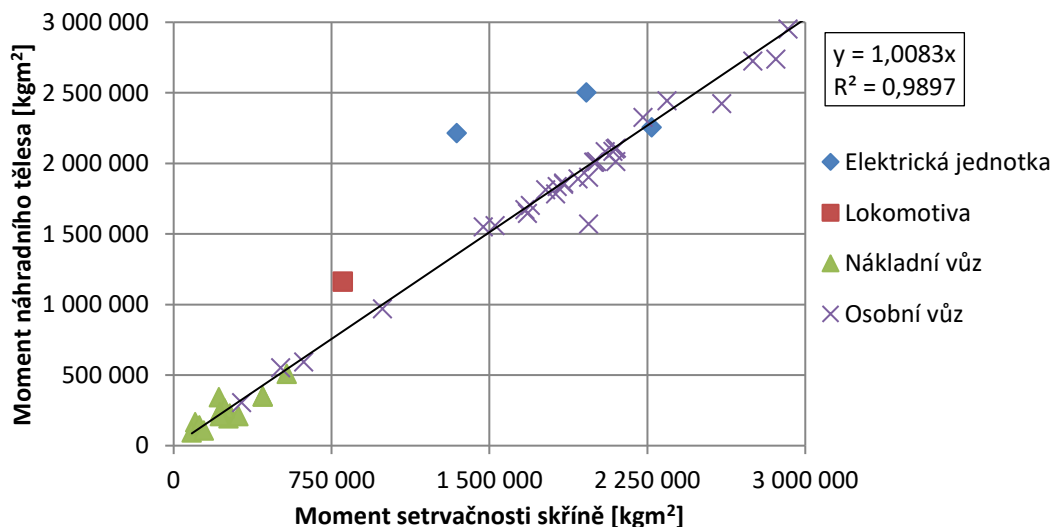
Skříň byla, tak jako podvozky, nahrazena pro účely výpočtů náhradním kvádrem o délce, šířce, výšce a hmotnosti s ní shodnou. Aby výška byla skutečně reprezentativním rozměrem a předešlo se případným nejasnostem, bývá tato udávána jako výška vozidla nad temenem kolejnice.

Následující vzorce vyjadřují momenty setrvačnosti náhradního tělesa.

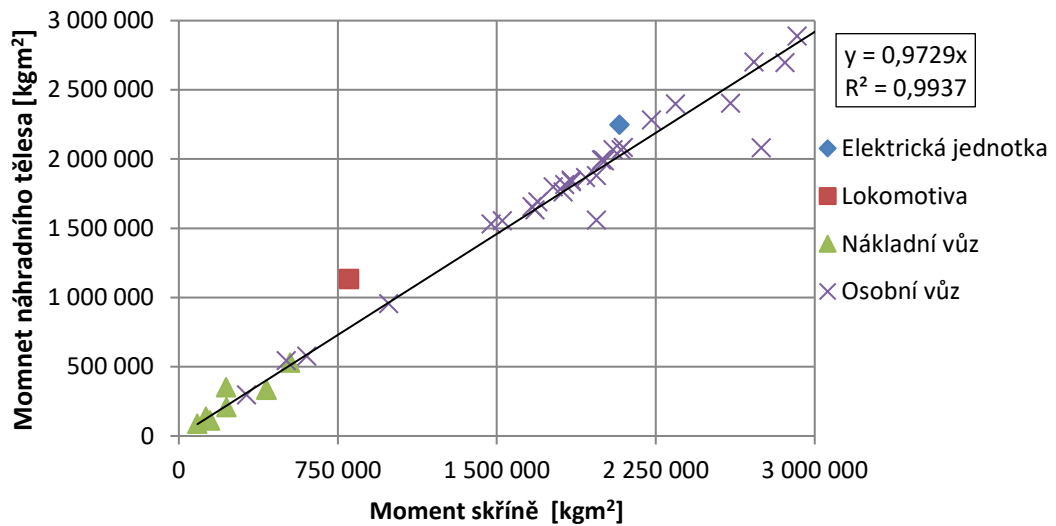
$$\begin{aligned}
 J_x &= \frac{m_s}{12}(v^2 + \check{s}^2) \\
 J_y &= \frac{m_s}{12}(d^2 + v^2) \\
 J_z &= \frac{m_s}{12}(d^2 + \check{s}^2)
 \end{aligned}
 \tag{21}$$



Obr. 12: Moment setrvačnosti skříně a náhradního tělesa k ose x



Obr. 13: Moment setrvačnosti skříně a náhradního tělesa k ose y



Obr. 14: Moment setrvačnosti skříně a náhradního tělesa k ose z

Po vykreslení hodnot do grafu, proložení dat lineární závislostí a podělení předcházejících rovnic směrnici přímky byly obdrženy následující vzorce pro odhad momentů setrvačnosti skříní. Tabulka 1 obsahuje číselné hodnoty konstanty g .

$$\begin{aligned}
 J_{sx} &= \frac{m_s}{12 \cdot g_{sx}} (v^2 + \check{s}^2) \\
 J_{sy} &= \frac{m_s}{12 \cdot g_{sy}} (d^2 + v^2) \\
 J_{sz} &= \frac{m_s}{12 \cdot g_{sz}} (d^2 + \check{s}^2)
 \end{aligned} \tag{22}$$

Tabulka 1: Hodnoty konstanty g pro dvojkolí (18), podvozky (20), skříně (22)

g	Osa x	Osa y	Osa z
Dvojkolí	0,64	1,12	0,64
Podvozek	0,56	1,25	0,87
Skřín	0,86	1,01	0,97

5 Závěr

V průběhu práce byl vysvětlen význam základních pojmů z mechaniky tuhých těles. Bylo prostudováno na 40 odborných prací. Z vybraných byla přejata data důležitá pro celý rozbor. Byl stanoven postup, dle kterého byla data srovnána vedle sebe a zařazena do tabulek. V průběhu procházení prací bylo poukázáno na nejasnosti a byla odůvodněna případná úprava údajů při přejímání.

Pro každou ze tří kategorií bylo vybráno náhradní těleso se spojitě rozloženou hmotností a byly předloženy vztahy pro výpočet jeho momentů setrvačnosti k osám symetrie. Vypočtené momenty byly zapsány do tabulek a porovnány s momenty konstrukčních celků prostřednictvím grafů. V případě, že graf jasnou závislost neprokázal, byl výsledek pouze okomentován slovně a žádné matematické vztahy nebyly určovány, ježto by stejně neměly valnou vypovídací hodnotu.

Častěji se však vyskytoval případ, kde bylo na první pohled patrné, že bude možno data popsat přímkovou funkcí. Taková byla grafem proložena a její směrnice byla zaznamenána. Výstupní vztahy jsou poté kombinací vztahů pro výpočet momentů setrvačnosti homogenních těles a směrnic proložených závislostí.

Literatura

- [1] KITAJGORODSKIJ, Alexandr Isaakovič a Lev Davidovič LANDAU. Fyzika pro každého. Praha: Horizont, 1975. ISBN 40-061-75.
- [2] JAVORSKIJ, B.M. a A.A. DETLAF. Průručka fyziky. Slovenské vydavateľstvo technickej literatury Bratislava, 1965. ISBN 63-110-65.
- [3] BING, Alan J.; BERRY, Shaun R. a HENDERSON, Hal B. Design Data on Suspension Systems of Selected Rail Passenger Cars. U. S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration. July 1996.
- [4] SHAPIRO, Stephen M. Engineering Data on Selected High Speed Passenger Trucks. The Budd Company Technical Center, 300 Commerce Drive Fort Washington PA 19034. July 1978, č. FRA/ORD-78/29.
- [5] WANG, Ping; MA, Xiaochuan; WANG, Jian; XU, Jingmang a CHEN, Rong. Optimization of Rail Profiles to Improve Vehicle Running Stability in Switch Panel of High-Speed Railway Turnouts. Online. Mathematical Problems in Engineering. 2017, roč. 2017, s. 1-13. ISSN 1024-123X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1155/2017/2856030>. [cit. 2024-04-29].
- [6] JHA, P. K. a GOKHALE, S. S. Modeling and validation of Gatimaan Express with Matlab/Simulink. Online. In: . S. 441-457. Dostupné z: <https://doi.org/10.2495/CR160401>. [cit. 2024-04-29].
- [7] SAVIZ, Mohammad Reza. Dynamic, stability and safety analysis of wagons on MD52 bogies with modified suspension springs. IJTPE Journal. 2015, č. 25. ISSN 2077-3528.
- [8] FOMIN, Oleksij a LOVSKA, Alyona. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. Online. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021, roč. 2, č. 7 (110), s. 6-14. ISSN 1729-4061. Dostupné z: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>. [cit. 2024-04-29].
- [9] O'BRIEN, Eugene J.; BOWE, Cathal; QUIRKE, Paraic a CANTERO, Daniel. Determination of longitudinal profile of railway track using vehicle-based inertial readings.
- [10] RIGUEIRO, Maria Constança Simões. Avaliação dos Efeitos Dinâmicos em Pontes Ferroviárias de Alta Velocidade de Pequeno e Médio Vão. Departamento de Engenharia Civil Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2007.
- [11] SPIRYAGIN, Maksym; WOLFS, Peter; SZANTO, Frank a COLE, Colin. Simplified and advanced modelling of traction control systems of heavy-haul locomotives. Online. Vehicle System Dynamics. 2015, roč. 53, č. 5, s. 672-691. ISSN 0042-3114. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1008016>. [cit. 2024-04-29].
- [12] ZELENKA, Jaromír. Analýza vodících vlastností dieselelektrické lokomotivy s novým podvozkem CZ LOKO pomocí simulačních výpočtů. Vědeckotechnický sborník ČD. 2009, č. 28. ISSN 1211-2321.
- [13] GERLICI, Juraj; LOVSKA, Alyona; VATULIA, Glib; PAVLIUCHENKOV, Mykhailo; KRAVCHENKO, Oleksandr et al. Situational Adaptation of the Open Wagon Body to Container Transportation. Online. Applied Sciences. 2023, roč. 13, č. 15. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app13158605>. [cit. 2024-04-29].(2)

- [14] JÖNSSON, Per-Anders. Multibody simulation model for freight wagons with UIC link suspension. Stockholm: Royal Institute of Technology Aeronautical and Vehicle Engineering Rail Vehicles SE-100 44 Stockholm, 2007.
- [15] ZHANG, Duo; TANG, Yinying; PENG, Qiyuan; DONG, Chunjiao a YE, Yunguang. Effect of mass distribution on curving performance for a loaded wagon. Online. *Nonlinear Dynamics*. 2021, roč. 104, č. 3, s. 2259-2273. ISSN 0924-090X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06386-3>. [cit. 2024-04-29].
- [16] FOMIN, Oleksij; LOVSKA, Alyona; IVANCHENKO, Dmytro; ZINCHENKO, Sergii a PÍŠŤĚK, Václav. Study of loading of the load-bearing structure of hopper wagons on Y25 bogies. Online. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2021, č. 2, s. 32-41. ISSN 2461-4262. Dostupné z: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001686>. [cit. 2024-04-29].
- [17] MOLATEFI, H; HECHT, M a KADIVAR, M H. Critical speed and limit cycles in the empty Y25-freight wagon. Online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2006, roč. 220, č. 4, s. 347-359. ISSN 0954-4097. Dostupné z: <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT67>. [cit. 2024-04-29].
- [18] HOFFMANN, Mark. Dynamics of European two-axle freight wagons. Kongens Lyngby: Technical University of Denmark Informatics and Mathematical Modelling Building 321, DK-2800 Kongens Lyngby, Denmark, 2006. ISSN 0909-3192.
- [19] VOLTR, Petr. Rekonstrukce dvounápravového nákladního vozu. Diplomová práce, vedoucí Jaromír Zelenka. Univerzita Pardubice, Doprná fakulta Jana Pernera, Dislokované pracoviště Česká Třebová, 2009.
- [20] Laags. [online]. Internetová prezentace firmy, dostupné z: <https://www.railcargo.com/en/dam/jcr:43b0b467-e054-4e35-87e2-69a9c49cd331/laags-fs.pdf>. [cit. 2024-04-29].
- [21] LOKVENC, Michal. Interakce vozidlo-kolej v podmínkách ČHEŽ. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Doprná fakulta Jana Pernera, 2023.
- [22] IWNICK, Simon. Manchester Benchmarks for Rail Vehicle Simulation. Online. *Vehicle System Dynamics*. 1998, roč. 30, č. 3-4, s. 295-313. ISSN 0042-3114. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00423119808969454>. [cit. 2024-04-29].
- [23] MELNIK, Rafał a KOZIÁK, Seweryn. Rail vehicle suspension condition monitoring – approach and implementation. Online. *Journal of Vibroengineering*. 2017, roč. 19, č. 1, s. 487-501. ISSN 1392-8716. Dostupné z: <https://doi.org/10.21595/jve.2016.17072>. [cit. 2024-04-29].
- [24] SUAREZ, Berta; FELEZ, Jesus; MAROTO, Joaquin a RODRIGUEZ, Pablo. Sensitivity analysis to assess the influence of the inertial properties of railway vehicle bodies on the vehicle's dynamic behaviour. Online. *Vehicle System Dynamics*. 2013, roč. 51, č. 2, s. 251-279. ISSN 0042-3114. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00423114.2012.725851>. [cit. 2024-04-29].
- [25] SUN, Yan; COLE, Colin a BOSOMWORTH, Chris. Early Detection of Wheel Flats Using Wagon Body Acceleration Measurements. Centre for Railway Engineering, CQ University North Rockhampton, QLD 4702, Australia. 2010; str. 230–239.
- [26] SHARMA, Rakesh Chandmal. Ride Analysis of an Indian Railway Coach using Lagrangian Dynamics. Online. *International Journal of Vehicle Structures and Systems*. 2011, roč. 3, č. 4. ISSN 0975-3540. Dostupné z: <https://doi.org/10.4273/ijvss.3.4.02>. [cit. 2024-04-29].

- [27] Rozměry vozu. [Online]. Dostupné z: <https://indiarailinfo.com/faq/post/length-of-icf-lhb-coaches/1195/>. [cit. 2024-04-29].
- [28] Rozměry vozu Hbbills-310, elektronická prezentace. Dostupné z: <https://gueterwagenkatalog.dbcargo.com/catalogue/by-wagon-category/h-covered-high-capacity-sliding-wall-wagons/Hbbills-310-9120606/>. [cit. 2024-04-29].
- [29] Lokomotiva 744. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lokomotiva_744/. [cit. 2024-04-29].
- [30] YANG, Juping; WANG, Junguo a ZHAO, Yongxiang. Simulation of nonlinear characteristics of vertical vibration of railway freight wagon varying with train speed. Online. Electronic Research Archive. 2022, roč. 30, č. 12, s. 4382-4400. ISSN 2688-1594. Dostupné z: <https://doi.org/10.3934/era.2022222>. [cit. 2024-04-29].
- [31] SONG, In-Ho; KIM, Jun-Woo; KOO, Jeong-Seo a LIM, Nam-Hyoung. Modeling and Simulation of Collision-Causing Derailment to Design the Derailment Containment Provision Using a Simplified Vehicle Model. Online. Applied Sciences. 2020, roč. 10, č. 1. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app10010118>. [cit. 2024-04-29].
- [32] BOSSO, N; SOMA, A. a GUGLIOTTA, A. Multibody Simulation of a Freight Bogie with Friction Dampers. Proceedings of the 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conference Washington, DC, April 23-25,2002.
- [33] BOSSO, Y. Q. a DHANASEKAR, M. A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system. International Journal of Solids and Structures 39 (2002) 1337–1359.
- [34] BUSTOS, Alejandro; TOMAS-RODRIGUEZ, Maria; RUBIO, Higinio a CASTEJON, Cristina. On the nonlinear hunting stability of a high-speed train bogie. Online. Nonlinear Dynamics. 2023, roč. 111, č. 3, s. 2059-2078. ISSN 0924-090X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07937-y>. [cit. 2024-04-29].
- [35] DUMITRIU, Mădălina; GHEȚI, Marius Alin; BONDREA, I.; COFARU, N.F. a INȚĂ, M. On the longitudinal vibration of the railway bogie. Online. MATEC Web of Conferences. 2019, roč. 290. ISSN 2261-236X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929008008>. [cit. 2024-04-29].
- [36] BRACCIALI, Andrea a MEGNA, Gianluca. Track friendliness of an innovative freight bogie. 11th INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTACT MECHANICS AND WEAR OF RAIL/WHEEL SYSTEMS DELFT, THE NETHERLANDS. Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Firenze, via Santa Marta 3, 50139 Firenze, Italy. 2018.
- [37] Rozměry vozu Hbbills-311, elektronická prezentace. Dostupné z: <https://gueterwagenkatalog.dbcargo.com/catalogue/by-wagon-category/h-covered-high-capacity-sliding-wall-wagons/Hbbills-311-9120612/>
- [38] *Bazon.by*. Online. Dostupné z: <https://vagon.by/>. [cit. 2024-04-29].
- [39] KRATOCHWILLE, Rainer. Zum Nutzen schaltbarer Schlingerdämpfer in Trassierungselementen mit veränderlicher Gleiskrümmung. Dissertation. Universität Hannover, 2004.
- [40] BANÍK, Ivan; BANÍK, Rastislav a ZÁMEČNÍK, Jozef. Fyzika netradične: mechanika. Bratislava: Alfa, 1989. ISBN 80-050-0041-3.

Seznam příloh

- Příloha 1 Tabulka údajů dvojkolí
Příloha 2 Tabulka údajů podvozků
Příloha 3 Tabulka údajů skříní

Příloha 1 [1/1]: Tabulka údajů dvojkolí

Údaje nacházející se v podbarvených buňkách byly pro jejich nedostupnost odhadnuty.

Převzaté údaje										Vypočtené hodnoty pro náhradní těleso	
Druh vozidla	Popis	Označení	k [m]	r [m]	m_d [kg]	J_{dx} [kgm ²]	J_{dy} [kgm ²]	J_{dz} [kgm ²]	Zdroj	J_x, J_z [kgm ²]	J_y [kgm ²]
LOK	Tlakový pohon	744	1,435	0,55	3 878	1 995	584	2 215	[12]	1545	587
NV		BA004	1,435	0,46	1 032	530	90	530	[18]	341	109
NV			1,435	0,42	1 290	760	77	760	[15]	392	114
NV		Y25	1,435	0,46	1 225	750	140	750	[32]	405	130
NV		Eanos802	1,435	0,46	1 380	902	108	906	[17]	456	146
NV		Hbbills311	1,435	0,46	1 490	988	90	988	[18]	492	158
NV		G69	1,435	0,43	1 570	810	112	810	[18]	487	145
NV		Kpbs	1,435	0,46	1 420	1 040	154	1 040	[18]	469	150
NV			1,435	0,460	1 474	1 009	87	1 021	[19]	487	156
EJ		CRH2	1,435	0,43	1 850	717		717	[5]	574	171
OV	Pioneer III		1,435	0,46	1 562	657		657	[3]	513	163
OV		GSI-G70	1,435	0,407	1 073	492		492	[3]	317	89
EJ		GSI-G70	1,435	0,406	1 252	504		504	[3]	370	103
OV	Amtrak car	GSI-G70	1,435	0,457	1 940	944		944	[3]	637	203
EJ		BDe 4/4	0,760	0,330	548	100	26	100	[21]	71	30
OV		Bt	0,760	0,330	520	95	25	95	[21]	68	28
OV	Fiat	Y0270S	1,435	0,460	1 813	1 120	112	1 120	[22]	599	192
OV			1,435	0,50	1 925	950	150	950	[22]	691	241
OV		MD76	1,435	0,457	2 024	1 076		1 076	[3]	664	211
OV	Kawasaki		1,435	0,458	2 086	978		978	[3]	685	218
OV	Nipon Sharyo		1,435	0,458	2 358	978		978	[3]	775	247
OV	Comeng		1,435	0,457	1 870	733		733	[3]	614	195
OV			1,435	0,46	1 180	680	73	680	[9]	390	125
OV			1,435	0,46	1 503	810	112	810	[23]	496	159
OV			1,435	0,46	1 720	860	140	860	[24]	568	182
OV			1,435	0,43	1 120	420	100	420	[25]	344	101
OV	ICF Coach		1,638	0,45	1 487	1 181	109	1 181	[26]	558	151
OV	ICE2	GDS300	1,435	0,46	1 795	862	188	862	[39]	593	190
OV			1,435	0,46	1 570	693	121	693	[34]	519	166

Příloha 2 [1/2]: Údaje podvozků

Údaje nacházející se v podbarvených buňkách byly pro jejich nedostupnost odhadnuty. Přeskrtnutá data byla z analýzy pro značně odlišné hodnoty vyřazena.

Převzaté údaje												Hodnoty vypočtené pro náhradní těleso		
Druh	Popis	Označení	a [m]	k [m]	r [m]	m_p [kg]	J_{px} [kgm ²]	J_{py} [kgm ²]	J_{pz} [kgm ²]	z_p [m]	Zdroj	J_x [kgm ²]	J_y [kgm ²]	J_z [kgm ²]
EV	ICE3 Velaro		2,50	1,435	0,46	3 500		1 715			[9]	1 598	3 658	4 763
EV		Y226	2,90	1,435	0,46	4415	16341	3137	7120	0,43	[4]	2 009	5 645	7 045
EV	Hnací vůz ICE2		3,00	1,435	0,52	5 600		21 840			[10]	2 657	8 074	9 741
EV		CRH2	2,70	1,435	0,43	3 100	5 045	2 806	2 247		[5]	1 388	3 465	4 471
EV		Y225	2,60	1,435	0,45	7004	5289	5498	10718	0,52	[4]	3 177	7 623	9 855
EV	Man ET 403		2,60	1,435	0,53	7004	5436	8755	12167	0,54	[4]	3 348	8 420	10 481
EV		GSI-G70	2,59	1,435	0,41	2132	1142	1749	2150	0,67	[3]	940,5	2 176	2 882
EV		BDe 4/4	1,80	0,760	0,33	2440	277	1034	1112	0,35	[21]	352,8	1 319	1 495
LOK	6 náprav		3,80	1,435	0,50	4 903	3 629	14 453	17 659	0,73	[11]	2 304	9 838	11 319
LOK	4 nápravy	744	2,40	1,435	0,55	5 400	3 788	6 186	9 383	0,58	[12]	2 630	6 057	7 597
NV			1,80	1,435	0,42	1 575		257			[30]	701	1 007	1 523
NV			1,80	1,435	0,43	1 961	1 563	1 114	2 574		[31]	878	1 277	1 913
NV			1,68	1,435	0,43	1 585	1 421	494	1 812		[31]	710	947	1 461
NV			1,80	1,435	0,42	355	15	146	134		[15]	158	227	343
NV		Y25	1,80	1,435	0,46	4 750	4 667	5 610	6 631		[36]	2 169	3 264	4 763
NV			1,80	1,435	0,46	4 058	3 001	3 853	4 564		[36]	1 853	2 788	4 069
NV		Y25	1,80	1,435	0,46	2 070	1 400	2 100	2 400		[32]	945	1 422	2 075
NV		Eanos802	1,80	1,435	0,46	1 990	1 188	1 484	2 582	0,61	[17]	909	1 367	1 995
NV			1,68	1,435	0,55	3600		1801		0,48	[33]	1 753	2 673	3 700
NV			2,90	1,435	0,63	3823		1801		0,63	[33]	1 974	5 985	6 963
OV		Y28	2,56	1,435	0,46	2413	1865	1318	3295	0,65	[4]	1 102	2 606	3 367
OV		P-III	2,59	1,435	0,46	3139	2392	507	1563	0,96	[4]	1 431	3 432	4 426
OV		MD76	2,60	1,435	0,46	988	710	530	1530	0,83	[3]	450	1 086	1 398
OV	Fiat	Y0270S	2,56	1,435	0,46	2615	1722	1476	3067	0,60	[22]	1 194	2 824	3 649
OV			2,56	1,435	0,46	2 615	1 722	1 476	3 067		[23]	1 194	2 824	3 649

Příloha 2 [2/2]: Údaje podvozků

Druh	Popis	Označení	a [m]	k [m]	r [m]	m_p [kg]	J_{px} [kgm ²]	J_{py} [kgm ²]	J_{pz} [kgm ²]	z_p [m]	Zdroj	J_x [kgm ²]	J_y [kgm ²]	J_z [kgm ²]
OV			3,00	1,435	0,46	1 610			2 820		[34]	735	2 175	2 683
OV			2,60	1,435	0,46	3 300	1 800	2 200	3 370	0,61	[24]	1 507	3 640	4 682
OV	ICF coach		2,50	1,676	0,45	2 346	1 546	2 893	4 298		[26]	1 394	2 418	3 496
OV	ICE2		2,50	1,435	0,46	2 373		1 832			[10]	1 084	2 480	3 229
OV		Y32	2,56	1,435	0,45	3 394	2 683	1 844	4 221	0,50	[4]	1 535	3 591	4 677
OV		Y224	2,70	1,435	0,43	3 718	3 230	2 245	5 435	0,46	[4]	1 665	4 156	5 362
OV	Fiat Eurofa		2,60	1,435	0,46	3453	3032	1911	32081	0,40	[4]	1 577	3 809	4 899
OV		Z1040	3,00	1,435	0,52	5003	3919	5401	9647	0,80	[4]	2 383	7 256	8 737
OV	Minden Deutz	MD	2,50	1,435	0,48	2275	1811	2141	4993	0,77	[4]	1 050	2 429	3 136
OV		DT200	2,50	1,435	0,46	5993	5910	4011	8801	0,62	[4]	2 728	6 222	8 122
OV		LRC	2,46	1,435	0,38	4326	1856	2249	2821	0,52	[4]	1 880	3 961	5 422
OV		BT10	2,60	1,435	0,46	2403	1999	2192	5945	0,78	[4]	1 095	2 641	3 401
OV		ER200	2,50	1,524	0,48	8368	7712	6688	13166	0,55	[4]	4 273	8 929	11 944
OV	Metroliner		2,59	1,435	0,46	5621	2963	2866	4009	0,56	[4]	2 562	6 153	7 932
OV		GSI-G70	2,59	1,435	0,41	1822	676	822	1100	0,64	[3]	804,0	1 861	2 463
OV	Amtrak car	GSI-G70	2,59	1,435	0,46	3130,7	2028	1289	3203	0,70	[3]	1 427	3 423	4 414
OV	Kawasaki		2,59	1,435	0,46	3130,7	2062	976	2460	0,48	[3]	1 427	3 425	4 416
OV	Nipon Shario	NT319	2,50	1,435	0,46	1601,2	1794	1126	2840	0,67	[3]	730	1 668	2 174
OV	Comeng		2,44	1,435	0,46	1138	1780	980	2700	0,73	[3]	519	1 145	1 505
OV		Bt	1,80	0,760	0,33	590	216	365	441	0,35	[21]	85	319	361
OV	ICE2	GDS300	2,50	1,435	0,46	3 570	1 749	1 509	2 285	0,65	[39]	1 630	3 731	4 858
OV			2,56	1,435	0,45	3 200		2 050			[35]	1 452	3 408	4 428

Příloha 3 [1/3]: Údaje skříní

Údaje nacházející se v podbarvených buňkách byly pro jejich nedostupnost odhadnuty. Přeskrtnutá data byla z analýzy pro značně odlišné hodnoty vyřazena.

Převzaté údaje												Hodnoty vypočtené pro náhradní těleso		
Druh	Popis	e [m]	d [m]	$š$ [m]	v [m]	m_s [kg]	J_{sx} [kgm ²]	J_{sy} [kgm ²]	J_{sz} [kgm ²]	z_s [m]	Zdroj	J_x [kgm ²]	J_y [kgm ²]	J_z [kgm ²]
EJ	ICE3 Velaro	17,375	25	3	3,8	47 800		1 960 000			[9]	93 369	2 502 492	2 480 822
EV	ICE2	11	20,56	3,07	3,84	60 768		1 344 000			[10]	122 399	2 215 293	2 188 349
EV	CRH2		25	3,38	3,7	42 400	70 600	2 270 000	2 080 000		[5]	88 738	2 256 705	2 248 700
LOK	744	8,6	17,4	3,06	4,173	43 600	81 810	802 700	802 700		[12], [29]	97 292	1 163 299	1 134 049
NV	Gondola; 12-757	8,67	12,8	3,22	3,746	13 100		260 100			[8]	26 638	194 177	190 178
NV	Covered; 11-217	10	13,9	3,249	4,688	12 700		265 600			[8]	34 431	226 858	214 771
NV	Flat; 13-401	9,72	13,4	3,24	1,31	11 100		102 000			[8]	11 298	167 680	175 803
NV	Tank; 15-1443-06	9,72	13,4	3,09	4,62	15 050		223 900			[8]	38 744	251 968	237 173
NV	Open; 12-295	8,65	12,7	3,18	3,295	14 600		308 000			[13]	25 513	209 446	208 540
NV	Hbbills310	10	16,01	2,99	4,295	15 176	32 675	422 084	413 250		[14], [28]	34 636	347 489	335 466
NV		9,21	13	2,892	2,05	23 800	15 000	214 000	224 000	1,085	[15]	24 923	343 518	351 771
NV	Hopper; 20-9749	7,8	13,5	3,154	4,5	15 600		242 300			[16]	39 257	263 250	249 857
NV	Hopper; 20-9749	7,8	13,5	3,154	4,5	14 100		219 800			[16]	35 482	237 938	225 832
NV	Eanos802	10,7	14,5	2,994	3,334	11 400	11 389	219 667	225 378	1,31	[17]	19 076	210 297	208 253
NV	Hbbills311	10	15,99	3,01	4,665	15 176	32 675	422 084	413 250	1,57	[18], [37]	38 980	350 872	334 808
NV	G69	5,7	10,58	2,75	4,015	8 860	16 600	86 000	88 000	1,58	[18]	17 486	94 548	88 230
NV	Kpbs	8	13,86	1,259	2,87	8 610	25 000	121 400	127 700	1,20	[18]	7 047	143 741	138 969
NV		8	12,78	2,92	1,195	7 797	5103	143558	148215	0,955	[19], [20]	6 468	107 050	111 663
NV		8	12,78	2,92	1,195	37 052	51002	537356	525094		[19], [20]	30 736	508 713	530 630
OS	Pioneer III	18,13	26	3,2	3,87	34 890	86 000	1 999 368	1 999 368	1,91	[3]	73 318	2 009 015	1 995 243
OS	French A9U	19	26,4	2,825	4,057	31 784	81 368	1 919 904	1 919 904	2,069	[4]	64 734	1 889 634	1 867 176
OS	EurofinaA4B6	19	26,4	2,835	4,05	30 019	76 848	1 813 243	1 813 243	2,069	[4]	61 137	1 784 512	1 763 586
OS	French A8TU	18,1	25,5	2,83	4,05	37 965	97 190	2 102 613	2 748 761	2,056	[4]	77 231	2 109 105	2 082 550
OS	Japan NTL	17,5	25	3,38	4	33 943	101 235	1 766 434	1 766 434	2,001	[4]	77 571	1 813 101	1 800 158
OS	French Trailer RTG	16,54	25,51	2,93	3,65	29 724	76 094	1 680 921	1 680 921	1,4	[4]	54 265	1 644 949	1 633 214

Druh	Popis	e [m]	d [m]	\check{s} [m]	v [m]	m_s [kg]	J_{sx} [kgm ²]	J_{sy} [kgm ²]	J_{sz} [kgm ²]	z_s [m]	Zdroj	J_x [kgm ²]	J_y [kgm ²]	J_z [kgm ²]
OS	German ET403	19	27,16	2,795	4,2	31 981	76 734	2 008 562	2 008 562	2,263	[4]	67 831	2 012 927	1 986 735
OS	Italian ALE601	18,2	27,4	2,87	3,765	32 962	75 255	2 096 904	2 096 904	1,971	[4]	61 562	2 101 124	2 084 813
OS	Trailer TGV	18,3	18,3	2,814	3,4	19 090	42 896	507 502	507 502	1,801	[4]	30 988	551 152	545 359
OS	French Z7001	17,4	28	2,85	4,075	45 028	115 271	3 030 631	3 030 631	2,075	[4]	92 788	3 004 133	2 972 301
OS	Canadian LRC	18,136	25,908	3,175	3,582	27 370	53 415	1 526 447	1 526 447	1,905	[4]	52 257	1 560 210	1 553 938
OS	English HST	16	23	2,62	3,888	21 386	35 865	990 916	990 916	1,981	[4]	39 173	969 697	954 991
OS	Russian ER200	18,8	26	3,08	4,12	31 784	84 034	1 820 921	1 820 921	2,2	[4]	70 087	1 835 481	1 815 648
OS	German Mainline Coach	19	26,4	2,925	4,05	28 155	67 554	1 667 558	1 667 558	2,186	[4]	58 557	1 673 709	1 655 298
OS	Amcoach	18,136	26,01	3,2	3,906	34 826	86 389	1 995 145	1 995 145	1,913	[4]	73 995	2 007 623	1 993 064
OS	Metroliner	18,136	25,908	3	3,854	47 677	62 287	2 750 178	2 713 368	1,585	[4]	94 770	2 725 821	2 702 566
OS	Cab Kawasaki GSI-G70	18,14	26	3,2	3,89	32 314	80 669	1 851 751	1 851 751	1,52	[3]	68 323	1 861 104	1847930
OS	Trailer	18,14	26	3,2	3,89	29 562	73 799	1 694 047	1 694 047	1,52	[3]	62 504	1 702 604	1 690 552
OS	Lirr M3 MU	18,14	25,9	3,25	3,95	36 440	87 547	2 049 750	2 049 750	1,5	[3]	79 454	2 084 406	2 069 101
OS	Amtrak Superliner II Bi-Level	18,14	25,91	3,1	4,92	50 917	203 666	2 917 765	2 917 765	2,2	[3]	143 484	2 951 182	2 889 249
OS	Cab Kawasaki MBTA Bi-Level	19,05	26	3,05	4,72	39 959	133 819	2 229 748	2 229 748	1,98	[3]	105 162	2 325 209	2 282 000
OS	Trailer Kawasaki Bi-level	19,05	26	3,05	4,72	41 998	140 647	2 343 526	2 343 526	1,98	[3]	110 528	2 443 858	2 398 445
OS	Nipon Sharyo cab	18,13	25,91	3,2	4,05	36 412	93 215	2 086 586	2 086 586	1,55	[3]	80 842	2 086 804	2 068 105
OS	Nipon Shario trailer	18,13	25,91	3,2	4,05	32 327	82 757	1 852 496	1 852 496	1,55	[3]	71 773	1 852 689	1 836 088
OS	Comeng	18,13	25,04	3,05	4,42	50 848	133 445	2 860 200	2 860 200	1,8	[3]	122 200	2 739 597	2 696 233
OS	BDe 4/4	11,5	17,5	2,2	3,73	22 210	37540	617035	604067	1,55	[21]	34 708	592 568	575 776
OS	Bt	11,5	17,5	2,2	3,73	11 410	15310	321983	319661	1,35	[21]	17 831	304 422	295 795
OS		19	26,4	2,825	4,05	32 000	56800	1970000	1970000	1,8	[22]	65 022	1902300	1 879 842
OV		19	24	3	3,6	32 000	56 800	1 970 000	1 970 000		[23]	58 560	1 570 560	1 560 000

Druh	Popis	e [m]	d [m]	\check{s} [m]	v [m]	m_s [kg]	J_{sx} [kgm ²]	J_{sy} [kgm ²]	J_{sz} [kgm ²]	z_s [m]	Zdroj	J_x [kgm ²]	J_y [kgm ²]	J_z [kgm ²]
OV	ICF Coach		21,77	3,245	4,025	37 960	63 950	1 470 750	1 473 430		[26], [27]	84 558	1 550 456	1 532 518
OV	ICE1: Bvmz802	19	26	3,000	3,856	42 083	71 121	2 603 689	2 603 689	1,85	[39]	83 706	2 422 819	2 402 238
OV	ICE2	19	26	3,000	3,856	33 930		2 100 000			[39]	67 489	2 012 696	1 996 102