

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

Žilina, 2025

Ing. Vadym Ishchuk



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Strojnícka
fakulta

Ing. Vadym Ishchuk

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

**Hodnotenie vplyvu poddajnosti konštrukcie koľajového vozidla na bezpečnosť
proti vykoľajeniu pomocou počítačových simulácií**

Na získanie akademického titulu **doktor**
(„**philosophiae doctor**“, v skratke „**PhD.**“)
v študijnom odbore Strojárstvo
v študijnom programe Koľajové vozidlá

Žilina 2025

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Žilinskej univerzite v Žiline, Strojníckej fakulte, Katedre dopravnej a manipulačnej techniky.

Predkladateľ: **Ing. Vadym Ishchuk**
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra dopravnej a manipulačnej techniky

Školiteľ: **doc. Ing. Ján Dižo, PhD.**
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Katedra dopravnej a manipulačnej techniky

Oponenti:

1. **doc. Ing. Bohuš Leitner, PhD.**
Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra požiarneho inžinierstva,
ul. 1. mája 32, 010 26 Žilina
2. **Ing. Severín Skotnický, PhD.**
3. **prof. Ing. Jozef Majerčák, PhD.**
Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta prevádzky a ekonomiky dopravy a spojov,
Katedra železničnej dopravy,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa 26.08.2025 o 9:00 hod. v miestnosti BA105 na KDMT, SjF, Univerzitná 8215/1, 010 26, Žilina, pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce schválenou odborovou komisiou v študijnom odbore Strojárstvo, v študijnom programe Koľajové vozidlá, vymenovanou dekanom Strojníckej fakulty, Žilinskej univerzity v Žiline.

S dizertačnou prácou je možné sa oboznámiť na referáte pre vedu a výskum dekanátu SjF, UNIZA, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.

prof. Dr. Ing. Juraj Gerlici, prof.h.c.
predseda komisie pre obhajobu dizertačnej práce

OBSAH

ÚVOD	5
1 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	6
2 TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE	7
3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	9
3.1 Tvorba poddajného modelu rámu podvozka Y25 a kostry vagóna Sgnss 60 ft	9
3.2 Modely železničných trati	12
3.3 Sumarizácia simulácií a parametrov	16
4 VÝSLEDKY	18
4.1 Bezpečnosť voči vykoľajeniu na trati Prievidza – Chrenovec	18
4.2 Bezpečnosť voči vykoľajeniu na trati Šurany – Úľany na Žitavou	18
4.3 Bezpečnosť voči vykoľajeniu na trati Jelšovce – Koniarovce	20
4.4 Bezpečnosť voči vykoľajeniu podľa normy EN 14 363 - metóda 1	21
4.5 Bezpečnosť voči vykoľajeniu podľa normy EN 14 363 - metóda 2	22
4.6 Bezpečnosť voči vykoľajeniu podľa normy EN 14 363 - metóda 3	23
4.7 Bezpečnosť voči vykoľajeniu podľa EN 15839 – S-oblúk	23
4.8 Diskusia	24
5 PRÍNOSY PRÁCE	26
ZÁVER	27
ANOTÁCIA	28
RESUMÉ	28
LITERATÚRA	30
ZOZNAM VYBRANEJ PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI	31

ÚVOD

Koľajové vozidlá sú zložité mechanické systémy, ktoré pracujú v rôznych dynamických podmienkach vrátane prechádzania oblúkov, prejazdu výhybiek a vplyvu nerovností trate. Analýza týchto systémov musí byť dostatočne presná a efektívna, aby sa zabezpečila ich bezpečná a spoľahlivá prevádzka. V poslednom čase sú široko a veľmi často využívané počítačové simulácie na štúdium dynamických vlastností a parametrov koľajových vozidiel.

Pri simuláciách koľajových vozidiel sa tradične používajú najmä modely tuhých telies, ktoré zjednodušujú simulovaný systém tým, že predpokladajú všetky telesá ako dokonale tuhé, teda nepoddajné. Hoci sú modely tuhých telies relatívne ľahko implementovateľné a výpočtovo efektívne, majú určité obmedzenia, ktoré môžu ovplyvniť presnosť simulačnej analýzy. Jednou z hlavných nevýhod modelov tuhých telies je nemožnosť zohľadniť vplyv deformácie v poddajných komponentoch koľajového vozidla, ako je skriňa vozňa, rámy podvozkov, dvojkoľesia atď.

Implementácia poddajných telies v simuláciách koľajových vozidiel odstraňuje tieto obmedzenia a ponúka niekoľko výrazných výhod.

Po prvé, implementácia poddajných telies do simulačného modelu umožňuje realistickejšie zobrazenie dynamických vlastností komponentov koľajových vozidiel. Deformácie a kmitanie, ktoré sa vyskytujú v poddajných telesách, majú významný vplyv na celkové prevádzkové vlastnosti a bezpečnosť železničných vozidiel vrátane chodových vlastností, stability jazdy atď. Dostatočne presným vytvorením simulačných modelov s poddajnými telesami v porovnaní s modelmi, ktoré pozostávajú iba z tuhých telies, je možné zachytiť účinky týchto deformácií a poskytnúť lepšie pochopenie dynamických vlastností simulačného systému.

Po druhé, simulácie poddajných telies umožňujú skúmať javy, ktoré je ťažké alebo nemožné analyzovať len pomocou modelov tuhých telies. Napríklad interakcia medzi koľajnicou a dvojkoľesím, známa ako kontakt kolesa s koľajnicou, je komplexný jav ovplyvnený rôznymi faktormi, ako je profil kolesa a koľajnice, nerovnosti trate a vlastnosti vypruženia. Simulačné výpočty koľajového vozidla s poddajným členom umožňujú podrobnú analýzu tejto interakcie a skúmanie javov vyskytujúcich v mieste tohto kontaktu.

Okrem toho, simulácie s poddajnými telesami uľahčujú posudzovanie a optimalizáciu konštrukcií koľajových vozidiel. Analýzou dynamických vlastností modelov s poddajnými komponentami môžu inžinieri vyhodnotiť vplyv konštrukčných úprav na rôzne charakteristiky koľajových vozidiel. To zahŕňa analýzu vplyvu zmien vlastností materiálov, konštrukčných konfigurácií a konfigurácií vypruženia na celkovú odozvu systému. Takéto simulácie uľahčujú návrh bezpečnejších a spoľahlivejších koľajových vozidiel tým, že poskytujú cenné údaje a uľahčujú identifikáciu potenciálnych problémov vo fáze návrhu koľajového vozidla.

1 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Simulačné modelovanie v oblasti železničnej dopravy zohráva v tomto kontexte dôležitú úlohu pri štúdiu dynamických, konštrukčných a bezpečnostných vlastností koľajových vozidiel. Vývoj simulačného modelovania úzko súvisí s pokrokom počítačovej techniky. V prvých obdobiach vývoja počítačov boli simulačné modely pomerne jednoduché a dokázali len približovať základné charakteristiky dopravných systémov. Moderné simulačné modely však majú vysoký stupeň presnosti a možno ich považovať za účinné nástroje výskumu a analýzy v oblasti koľajových vozidiel.

Väčšina výskumov v oblasti simulačných výpočtov používa modely založené na tuhých telesách. Takéto modely majú niekoľko výhod, avšak v porovnaní s modelmi pozostávajúcimi z poddajných telies sa často vyznačujú menšou presnosťou.

Poddajné telesá v súčasnosti priťahujú čoraz väčšiu pozornosť výskumníkov v rôznych oblastiach vrátane simulovania koľajových vozidiel. Dôvodom je potreba presnejších a realistickejších modelov schopných zohľadniť poddajnosť prvkov skúmaného systému. Analýza výskumu realizovaného na Slovensku, ako aj v iných krajinách Európy a sveta umožňuje posúdiť súčasné trendy a predpovedať smery vývoja v oblasti využívania poddajných telies v simulačných modeloch koľajových vozidiel.

Práca [1] sa zameriava na analýzu dynamického správania železničného vozidla s využitím experimentálnych údajov a numerických simulácií založených na tuho-poddajnom MBS modeli. Skúmanie dynamickej odozvy železničného vozidla pomocou tuho-poddajného MBS modelu ukázalo, že je dôležité zohľadniť interakciu medzi tuhými a poddajnými súčasťami. Matematický model, v ktorom sa rám podvozku a dvojkoľesia považujú za tuhé telesá a skriňa za poddajné teleso, bol overený pomocou experimentálnych údajov. Analýzy podvozku umožnili určiť základné frekvencie ohybových a torzných kmitov systému. Z porovnania experimentálnych a numerických výsledkov vyplynulo, že tuho-poddajný model poskytol presnejšie predpovede priemerných hodnôt bezpečnosti voči vykoľajeniu a zníženia zaťaženia kolesa v porovnaní s modelom pozostávajúcim iba z tuhých telies. Okrem toho sa zistilo, že poddajné kmity majú výrazný vplyv na dynamiku vozidla a nemožno ich ignorovať pri posudzovaní komfortu a bezpečnosti jazdy vozidla. Za výhodu daného výskumu je možné považovať porovnanie simulačných výpočtov s experimentálne nameranými hodnotami.

Štúdia [2] sa zameriava na vývoj účinného a pomerne presného vertikálneho dynamického modelu na analýzu jazdného pohodlia vysokorýchlostných železničných vozidiel. Ako je známe, so zvyšujúcou sa rýchlosťou sa zvyšuje vplyv dynamických faktorov na pohodlie, najmä v prípade ľahkých a dlhých skríň, v dôsledku čoho zohľadnenie poddajnosti karosérie je dôležitou úlohou. Autori dosiahli nasledovné výsledky. Bol vytvorený model osobného koľajového vozidla pozostávajúci z tuhých a poddajných telies v softvéri DYMOLA. Výsledky simulačných výpočtov boli následne porovnané s výsledkami simulačného modelu v softvéri VAMPIRE pozostávajúceho iba z tuhých telies. Ako ukazujú

závery tohto výskumu, tuhotolesový model dostatočne nezohľadňuje pohodlie jazdy v porovnaní s modelom s poddajnými komponentami.

Ďalší výskum, ktorý sa venuje tejto problematike, je článok od autorov [3] Práca sa venuje štúdiu dynamických charakteristík a únavovej pevnosti rámu podvozku metra mestskej hromadnej dopravy. Článok sa zaoberá problémom únavových trhlin v rámovej konštrukcii a analyzuje metódy ich detekcie. Tradičné metódy založené na metóde viazaných mechanických sústav a metóde konečných prvkov majú obmedzenia, pretože sú účinné len vtedy, keď existuje výrazný rozdiel medzi vlastnou frekvenciou konštrukcie a frekvenciou vonkajšieho zaťaženia. Na odstránenie týchto obmedzení autori používajú simulačnú metódu, ktorá je kombináciou modelu vozidla pozostávajúcich z tuhých a poddajných telies. V rámci štúdie bol zostrojený MBS model rámu vozidla, ktorý zohľadňuje tuho-poddajnú interakciu, čo umožnilo analyzovať dynamickú odozvu konštrukcie a skúmať jej vibračné charakteristiky. Potom sa vykonala analýza únavy s cieľom identifikovať oblasti s vysokým namáhaním.

Rovnako ako v predošlom prípade, v práci [4] sa navrhuje kombinovaný prístup spájajúci metódu viazaných mechanických sústav a metódu konečných prvkov na skúmanie únavovej pevnosti a životnosti rámu podvozku, pričom sa berie do úvahy vozidlo ako celok. Analýza sa vykonáva pomocou MBS softvéru SIMPACK, v ktorom bol vytvorený výpočtový model. Nebezpečné zóny konštrukcie sa určili pomocou metódy konečných prvkov v programe ANSYS. Potom sa na základe časového priebehu zaťaženia a Minerovej teórie akumulovaného poškodenia vykoná predpoveď únavovej pevnosti v softvérovom balíku n-soft.

Taktiež sa danej problematike významne venovalo venuje na pracovisku Katedry dopravnej a manipulačnej techniky Žilinskej univerzity v Žiline. Práce [5-8] boli v prvom rade venované tvorbe a implementácii poddajných komponentov do MBS modelov koľajových vozidiel. Práca [9] bola venovaná vplyvu poddajnosti na bezpečnosť proti vykoľajeniu .

2 TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Cieľom dizertačnej práce je vytvorenie simulačného modelu koľajového vozidla s poddajným komponentom. Implementácia poddajných telies do simulačného modelu umožňuje realistickejšie zobrazenie dynamických vlastností komponentov koľajových vozidiel. Simulačné modely s poddajnými telesami dávajú možnosť skúmať javy, ktoré je náročné alebo nemožné analyzovať len pomocou modelov tuhých telies. Hlavné ciele dizertačnej práce sú:

1. Navrhnutie a vytvorenie simulačného modelu koľajového vozidla v prostredí výpočtového programu Simpack s implementáciou poddajného komponentu do modelu.
2. Simulácia jazdy koľajového vozidla na vybranom úseku trate.

3. Analyzovanie vplyvov poddajného člena na stabilitu a bezpečnosť jazdy koľajového vozidla v rôznych dynamických podmienkach.

4. Porovnanie výsledkov simulačného výpočtu modelu s poddajným členom a modelu pozostávajúceho iba z tuhých telies.

5. Spracovanie a vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov.

Použité metódy:

V rámci tejto dizertačnej práce je použitá kombinácia teoretických prístupov a simulačných výpočtov na dosiahnutie komplexnej analýzy dynamických vlastností koľajového vozidla s implementáciou do simulačného modelu poddajného komponentu. Simulačné výpočty sú realizované pomocou simulačného programu Simpack, pričom sú zohľadnené rôzne scenáre a parametre pre dosiahnutie podrobnejších výsledkov.

Vedecké metódy výskumu:

Aplikácia konvergentného systému myslenia (celý myšlienkový postup je možné vopred algoritmizovať a postupovať určitým vopred známym smerom), a to najmä pomocou:

- Heuristickej metódy riadenej tvorivosti – cieľom metódy je nájsť nové riešenie, objaviť a zdokonaľiť doterajší spôsob, postup alebo systém riešenia,
- Gordonovej heuristickej metódy – cieľom je nájsť vhodnú analógiu riešenia problému a jej zdokonaleným postupom pokračovať ďalej v jeho riešení,
- Metódy návratu k predchádzajúcim nápadom – cieľom metódy je v zmenenej situácii vrátiť sa k predchádzajúcim nápadom pri zmenených podmienkach, ktoré boli v čase pôvodného riešenia ešte nerealizovateľné.

Význam práce:

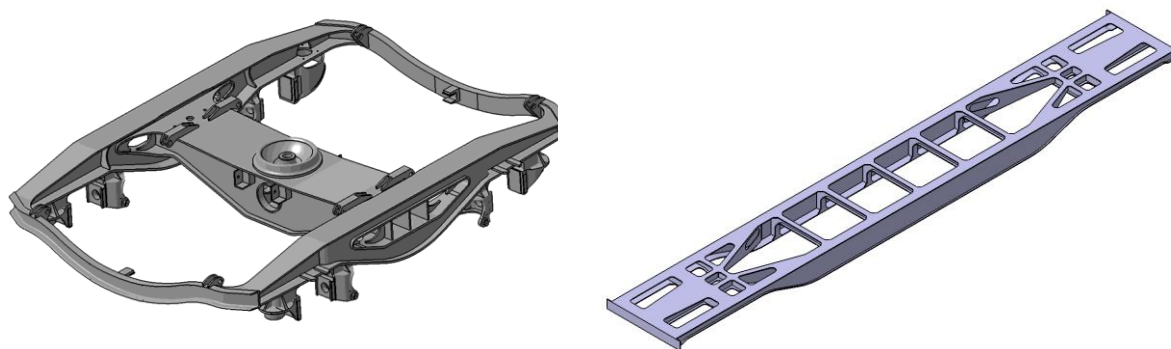
Výsledky tejto dizertačnej práce poskytujú užitočné informácie pre inžinierov, projektantov a vývojárov v oblasti koľajových vozidiel a železničnej dopravy. Správne chápanie dynamiky koľajového vozidla a vplyvu poddajného člena na dynamiku jazdy môže viesť k lepšiemu navrhovaniu a optimalizácii zložitého systému, akým koľajové vozidlo je, čo prispieva k bezpečnejšej a efektívnejšej prevádzke koľajových vozidiel počas jazdy po železničných tratiach.

3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Experimentálna časť sa venuje procesu tvorby komplexného simulačného modelu železničného nákladného vozňa so zavedením poddajných telies pomocou CAD softvéru CATIA V5, MKP softvéru ANSYS a MBS softvéru Simpack. Cieľom experimentálnej časti je analyzovanie a vytvorenie simulačného modelu koľajového vozidla s poddajným komponentom. A taktiež vykonanie simulačných analýz na rôznych simulačných tratiach pri rôznych podmienkach jazdy vozidla s cieľom dosiahnuť čo najrozsiahlejšiu škálu výsledkov. Následné spracovanie výsledkov a posúdenie vplyvov zmien konštrukcie na dynamiku a bezpečnosť jazdy koľajového vozidla, ako aj porovnanie dynamických vlastností vagóna s poddajnými členmi a bez nich.

3.1 Tvorba poddajného modelu rámu podvozku Y25 a kostry vagóna Sgnss 60ft

Ako bolo uvedené vyššie, na vytvorenie simulačného modelu s poddajným komponentom boli použité nasledovné softvéry: CAD softvér CATIA V5, FEM softvér ANSYS a MBS softvér Simpack. Etapa modelovania a implementácie poddajného člena sa začína vytvorením CAD modelu poddajného člena. Rám podvozku Y25 a kostra kontajnerového vozňa Sgnss 60ft boli vybrané ako poddajné komponenty, ktoré sa majú implementovať do MBS modelu železničného kontajnerového vozňa. Rám podvozku a kostry v prostredí softvéru CATIA je znázornený na obr. 1.



Obr. 1 Rám podvozku Y25 a kostra vagóna Sgnss 60ft v prostredí softvéru CATIA V5

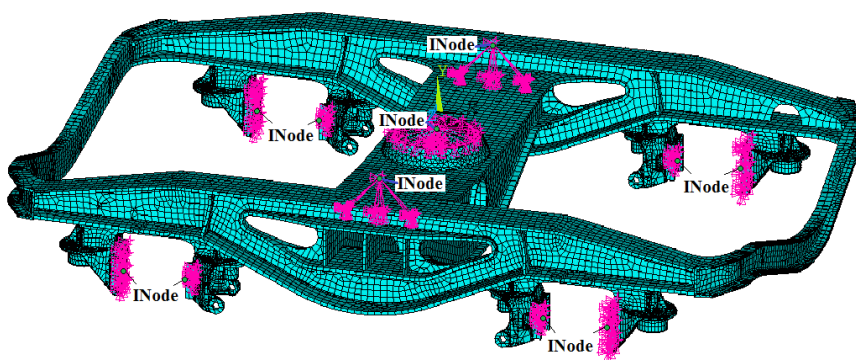
Po vytvorení CAD modelov nasleduje ich importovanie do MKP softvéru ANSYS. V tejto etape je potrebné vykonať niekoľko kľúčových krokov. Prvým krokom je vytvorenie MKP siete na analyzovanom komponente modelu a vykonanie modálnej analýzy.

Ďalším krokom je redukcia stupňov voľnosti MKP modelu, ktorá sa vykonáva v softvéri MKP a pozostáva z niekoľkých krokov:

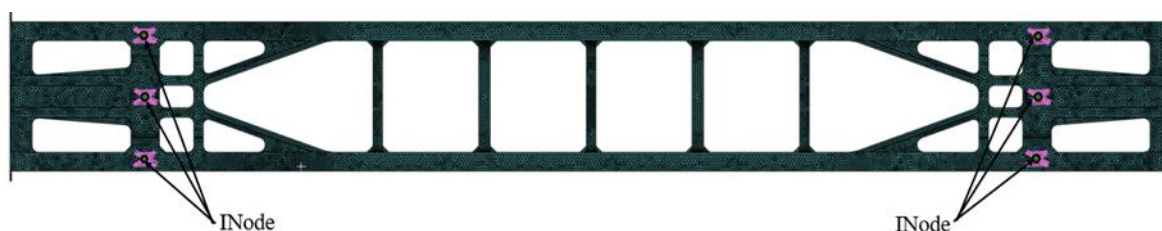
- určenie polohy uzlov vzájomného prepojenia. Poddajné teleso je v týchto uzloch navzájom spojené s ostatnými telesami vo viazanej mechanickej sústave koľajového vozidla;

- nastavenie pripojenia uzlov ku konštrukcii poddajného telesa,
- definovanie uzlov vzájomného prepojenia ako obmedzujúcich uzlov,
- redukcia počtu stupňov voľnosti.

Ako bolo uvedené vyššie, redukcia stupňov voľnosti zahŕňa definovanie uzlov vzájomného prepojenia "INode". Uzly prepojenia vo všeobecnosti vykonávajú pohyby vo všetkých troch smeroch a majú byť umiestnené tam, kde budú k rámu podvozku a kostry nákladného vozňa pripojené ďalšie komponenty (napr. ložiskové skrine, dvojkolesia, systém vypruženia - pružiny, tlmiče atď.). V tomto prípade ide o umiestnenie uzlov prepojenia na rázsochách, guľovom otočnom čape a klzniciach. Uzly vzájomného prepojenia na rázsochách sa používajú na pripojenie rámu podvozku s ložiskovými skriňami a prvkami vypruženia, zatiaľ čo uzly prepojenia na guľovom otočnom čape a klzniciach zabezpečujú pripojenie podvozku ku skriní. Na obr. 2 je znázornený MKP model rámu podvozku Y25 a na obr. 3 MKP model kostry nákladného vozňa Sgnss 60ft s uzlami vzájomného prepojenia vytvorený v MKP softvéri ANSYS.

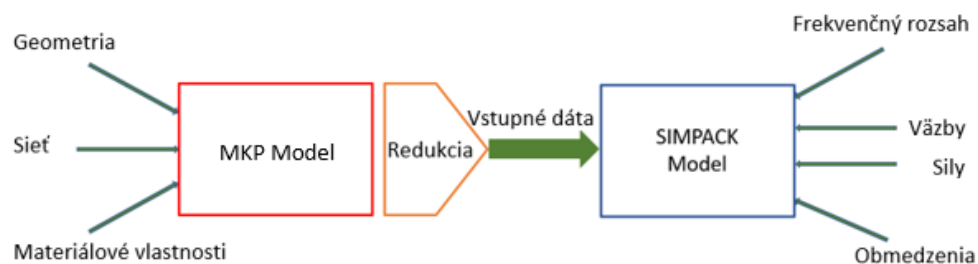


Obr. 2 Uzly vzájomného prepojenia na ráme podvozku Y25 v prostredí softvéru ANSYS



Obr. 3 Uzly vzájomného prepojenia na ráme vagóna Sgnss 60ft v prostredí softvéru ANSYS

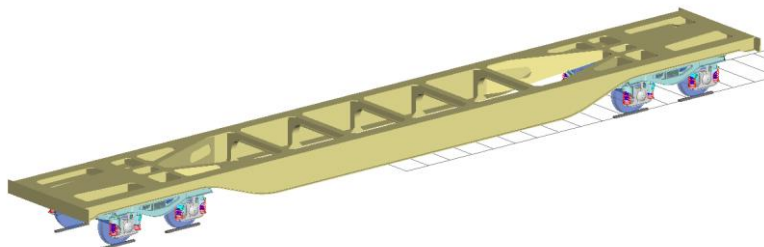
Na definovanie uzlov vzájomného prepojenia bol vytvorený textový skript. Postup, ktorý sa v tejto práci použil na vytvorenie poddajného komponentu pre implementáciu do MBS softvéru Simpack, je znázornený na obr. 4.



Obr. 4 Pracovný postup na vytvorenie MBS modelu s poddajným komponentom [7]

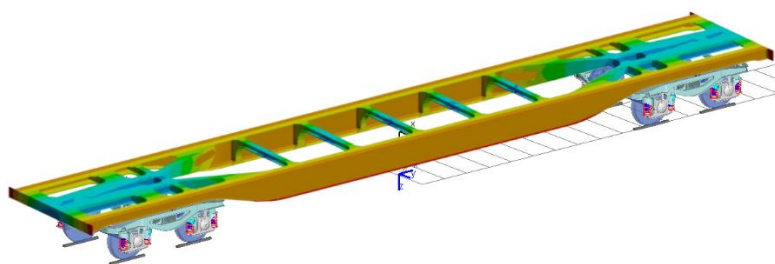
Ďalším krokom je implementácia modelu poddajného telesa do MBS softvéru Simpack. Po redukcii MKP modelu časti železničného vozidla sa musia vytvoriť vstupné súbory pre MBS softvér. Tieto súbory majú nasledovné formáty: “sub”, “cdb”, “iges”, “tcms”. S pomocou týchto vstupných súborov, ktoré boli vygenerované v MKP softvéri ANSYS, je potrebné v MBS softvéri Simpack vytvoriť špeciálny súbor nazývaný “flexible body input” (“fbi” súbor).

Na simulačné modelovanie boli vytvorené tri konfigurácie modelu vagóna, z ktorých každá predstavuje rôzne úrovne podrobnosti mechanickej konštrukcie. Prvá konfigurácia predstavuje východiskový model (obr. 5) podrobne opísaný v kapitole 5.3. Tento model pozostáva výlučne z tuhých telies a používa sa ako základný referenčný model na porovnanie dynamických vlastností s dvoma ďalšími konfiguráciami, v ktorých sú zavedené prvky poddajných telies. Hlavným účelom prvej konfigurácie je, že slúži ako kontrolný model na vyhodnotenie vplyvu poddajných prvkov na dynamické správanie systému v ďalších modeloch.



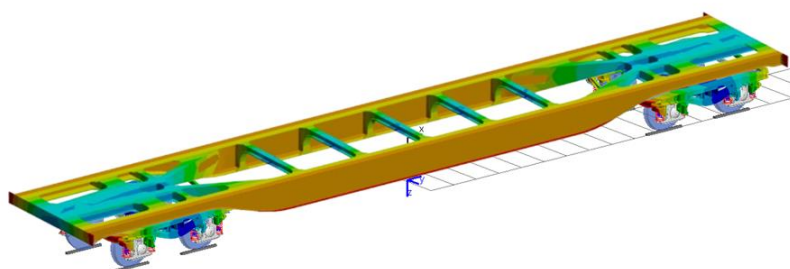
Obr. 5 MBS model vagóna Sgnss 60ft, tuhotelesový model

Druhá konfigurácia simulačného modelu (obr. 6) je hybridný systém, v ktorom je rám kontajnerového vozňa navrhnutý ako poddajné teleso, ktoré sa môže deformovať, zatiaľ čo rám podvozku zostáva tuhým telesom, ktoré nepredpokladá žiadne pružné deformácie. Tento prístup umožňuje presnejšie posúdiť vplyv poddajnosti rámu vozidla na dynamické správanie systému, pričom rám podvozku zostáva tuhý.



Obr. 6 MBS model vagóna Sgnss 60ft, model s poddajným rámom vagóna

Tretia konfigurácia vozňa (obr. 7) zahŕňa dva poddajné prvky: rám kontajnerového vozňa a rám podvozku. Pri tejto konfigurácii sú poddajné obe kľúčové štruktúry, ktoré ovplyvňujú dynamické správanie vozňa počas jazdy, čo umožňuje simulovať zložitejšie mechanické interakcie. Ostatné konštrukčné komponenty, ako sú dvojkoľesia, ložiskové skrine a iné komponenty podvozku, zostávajú modelované ako tuhé telesá, pretože ich poddajné vlastnosti sa na účely tejto štúdie považujú za nepodstatné.



Obr. 7 MBS model vagóna Sgnss 60ft, model s poddajným rámom vagóna a poddajným rámom podvozku

Typy a parametre poddajnosti vytvorených modelov vagóna je možné vidieť v tab. 1.

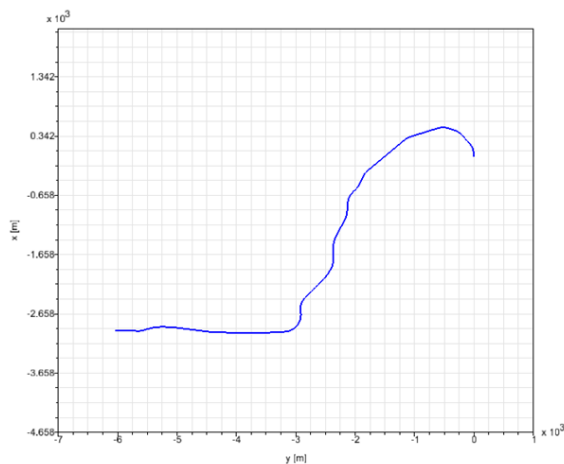
Tab. 1 Parametre poddajnosti modelov vagóna

	Poddajný rám vagóna	Poddajný rám podvozku
1. konfigurácia	Nie	Nie
2. konfigurácia	Áno	Nie
3. konfigurácia	Áno	Áno

3.2 Modely železničných tratí

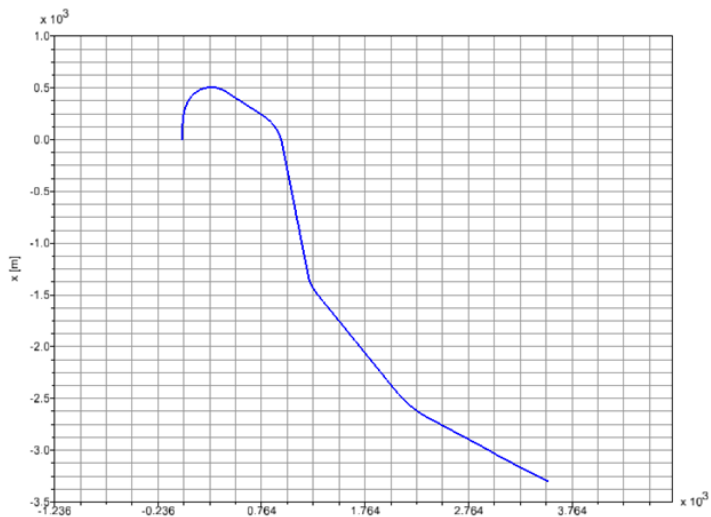
Na vykonanie simulácie boli použité rôzne modely železničných tratí, každý s jedinečnými charakteristikami a vlastnosťami. Tieto modely boli vybrané na základe skutočných úsekov železničnej siete a na základe noriem EN 14363 a EN 15 836 [10, 11] a pokrývajú širokú škálu prevádzkových podmienok, od úsekov s malými polomerami oblúkov a obmedzenými rýchlosťami až po vysokorýchlostné úseky s veľkými polomerami oblúkov, ako aj zložité S-oblúky.

Ako prvý model trate pre simulačné výpočty bol vybraný úsek železničnej trate Prievidza - Horná Štubňa zo stanice Prievidza do stanice Chrenovec. Dĺžka vybraného úseku, ktorý je znázornený na obr. 8, je 9 km. Trať má normálny rozchod 1435 mm s profilom koľajníc UIC60 a sklonom 1:40 s maximálnou traťovou rýchlosťou $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.



Obr. 8 Simulačný model trate v softvéri Simpack - trasovanie v horizontálnej rovine

Ďalším úsekom trate pre simulačné výpočty je úsek železničnej trate Nové Zámky – Zvolen zo stanice Šurany do stanice Úľany nad Žitavou. Dĺžka vybraného úseku, ktorý je znázornený na obr. 9, je 6 km. Maximálna dovolená rýchlosť na tomto úseku trate je $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.



Obr. 9 Simulačný model trate v úseku Šurany – Úľany nad Žitavou - trasovanie v horizontálnej rovine

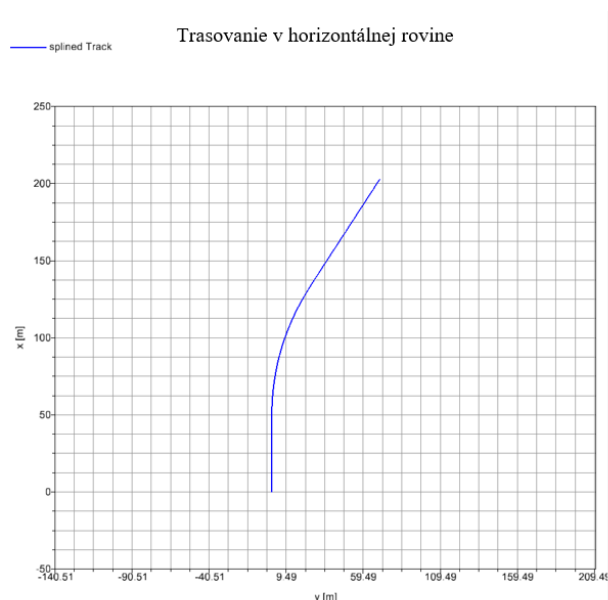
Tento simulačný model obsahuje aj nerovnosti, ktoré boli namerané na danom úseku trate. Zaradenie týchto nerovností do simulačného modelu umožňuje verifikovať a validovať simulačný model pri prejazde vozidla po nerovnej koľaji. Týmto spôsobom sa môže overiť presnosť simulácie a získať relevantné dáta o dynamickom správaní vozidla v reálnych podmienkach.

Tretím úsekom trate je úsek železničnej trate Nové Zámky – Prievidza zo stanice Jelšovce do stanice Koniarovce. Dĺžka vybraného úseku, ktorý je znázornený na obr. 10, sú 3 km. Maximálna dovolená rýchlosť na tomto úseku trate je $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

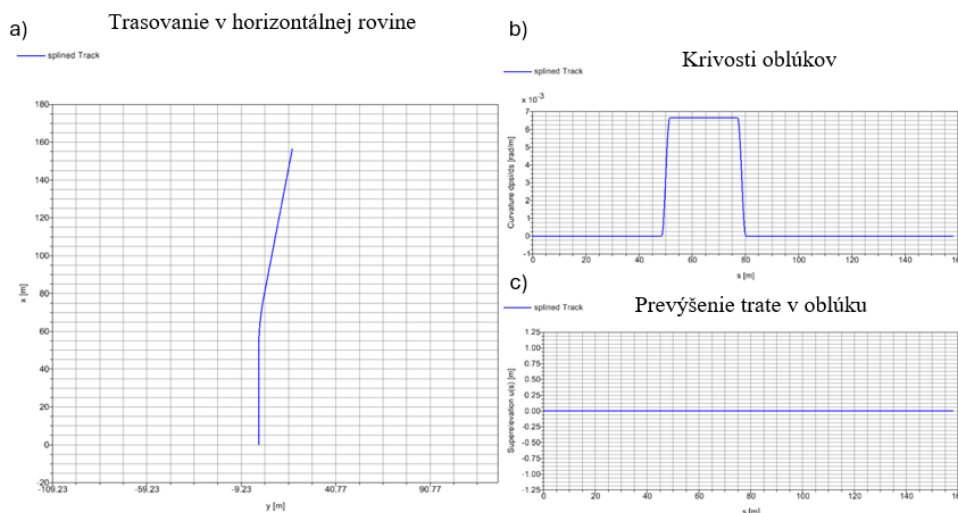


Obr. 10 Simulačný model trate v úseku Jelšovce - Koniarovce - trasovanie v horizontálnej rovine

Simulovanie bezpečnosti proti vykoľajeniu podľa metódy 1 [10] sa musí uskutočniť simulovaním zdvihu vonkajšieho kolesa nebehajúceho dvojkoľesia v smere jazdy na zbortenej koľaji v oblúku. Polomer oblúku sa rovná 150 m, rozchod koľaje je 1454 mm. Zbortenie sa dosahuje zmenou výšky prevýšenia vonkajšej koľajnice od kladného do záporného. Trasovanie trate v horizontálnej rovine a prepád na vonkajšej koľajnici je možné vidieť na obr. 11. Sledovanou hodnotou pri tomto type skúšky je bezpečnosť voči vykoľajeniu Y/Q pre vonkajšie koleso prvého dvojkoľesia v smere jazdy.



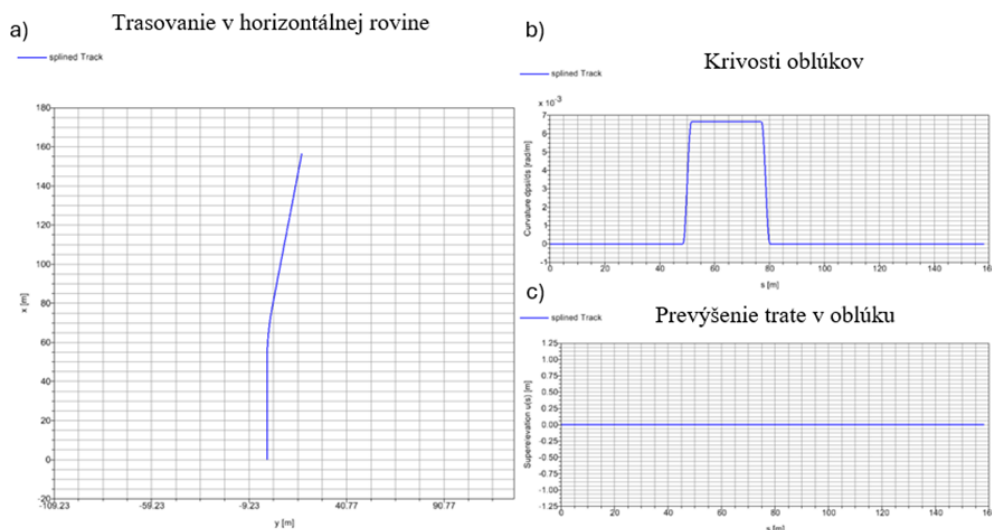
Obr. 11 Simulačný model trate v softvéri Simpack podľa normy EN 14363 – Metóda 1 – trasovanie v horizontálnej rovine



Obr. 12 Simulačný model trate v softvéri Simpack podľa normy EN 14363 – Metóda 2: a) trasovanie v horizontálnej rovine, b) krivosť oblúka, c) prevýšenie trate v oblúku

Skúška bezpečnosti proti vykoľajeniu podľa metódy 2 [10] pozostáva z dvoch samostatných častí, a to: zistenie minimálnych kolesových síl Q_{0min} pomocou skúšky skrútením a vodiacich kolesových síl Y prejazdom po rovinnom oblúku.

Simulácia určená na zistenie vodiacich kolesových síl sa musí uskutočniť na rovinnom oblúku s polomerom 150 m bez prevýšenia a bez prechodníc (obr. 13). Rýchlosť jazdy vozidla nemôže presiahnuť rýchlosť $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Počas skúšky musí vozidlo prejsť cez oblúk v oboch smeroch.



Obr. 13 Simulačný model trate v softvéri Simpack podľa normy EN 14363 – Metóda 2: a) trasovanie v horizontálnej rovine, b) krivosť oblúka, c) prevýšenie trate v oblúku

Ďalšou samostatnou časťou skúšky je meranie minimálnych kolesových síl Q_{0min} skrútením kostry vagóna a rámu prvého podvozka a potom nezávisle kostry a rámu zadného podvozka. Vozeň má pritom nulovú rýchlosť a nehýbe sa. V softvéri Simpack bola skúška skrútením nasimulovaná pomocou vstupnej funkcie, ktorá simuluje reálne testovacie zariadenie slúžiace na skrútenie vozňa.

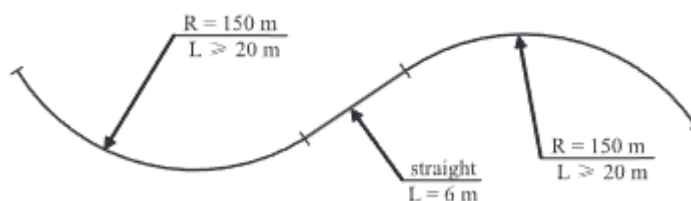
Analogicky ako pri metóde 2 skúška bezpečnosti voči vykoľajeniu podľa metódy 3 [10] pozostáva z dvoch nezávislých častí: meranie zvislých kolesových síl Q pomocou skúšky skrútením, ktorá simuluje zborenie koľaje (používa sa rovnaký model ako pri metóde 2), meranie odporu natočenia podvozku, ktorý vzniká pri prejazde vozidlom oblúkom s polomerom menším, než na aký bolo vozidlo konštruované.

Prvá časť slúži na meranie kolesových Q skrútením kostry vagóna a rámu prvého podvozka a potom nezávisle kostry a rámu zadného podvozka. Vozeň má pritom nulovú rýchlosť a nehýbe sa. V softvéri Simpack bola skúška skrútením nasimulovaná pomocou vstupnej funkcie.

Na rozdiel od metódy 1 a 2, v prípade metódy 3 je sledovanou veličinou súčiniteľ odľahčenia dvojkolesia $\Delta Q/Q_0$. Tento súčiniteľ je bezrozmerná veličina, ktorá vyjadruje relatívnu mieru odľahčenia (odstránenia zaťaženia) dvojkolesia vozidla voči jeho pôvodnému vertikálnemu zaťaženiu. Používa sa na hodnotenie stability vozidla najmä v kontexte odľahčenia kolies pri pohybe cez oblúky, nerovnosti alebo pri deformáciách rámu vozidla.

Druhá časť skúšky sa musí uskutočniť na skúšobnom stave, ktorý bol namodelovaný v simulačnom softvéri Simpack. Sledovanými hodnotami sú uhol natočenia podvozku voči skrini $\Delta\psi$ a moment odporu proti natočeniu M_z .

Podľa normy EN 15839 [11] trať, na ktorej sa vykonávajú skúšky bezpečnosti voči vykoľajeniu, má tvar písmena S a pozostáva z dvoch minimálne 20 m dlhých oblúkov s polomerom 150 m, ktoré sú prepojené priamym úsekom trate s dĺžkou 6 m. Trať je znázornená na obr. 14. S-oblúky sú často považované za synonymum pre vykoľajenie a odpojenie vozňov, pretože oblúky vedené v opačných smeroch výrazne zvyšujú náročnosť udržania vlakov na trati. Rám každého vozňa sa musí pri vjazde do S-oblúka natočiť jedným smerom, pričom pri výjazde z tohto oblúka sa musí natočiť opačným smerom. Tento pohyb kladie vysoké nároky na stabilitu vozidla a jeho schopnosť odolať dynamickým silám pôsobiacim počas jazdy.



Obr. 14 S-oblúk podľa EN 15839 [11]

3.3 Sumarizácia simulácií a parametrov

Kontakt koleso/koľajnica je jedným s najdôležitejších parametrov koľajového vozidla, ktorý významne ovplyvňuje dynamické, adhézne, trakčné vlastnosti vozidla a taktiež aj rozloženie síl v kontakte, ktoré následne ovplyvňujú bezpečnosť jazdy. Preto počas simulačných výpočtov musí byť

dostatočne a presne definovaný [12]. Pri simulácii výpočtu kontaktu kolesa s koľajnicou bol použitý model kontaktu koleso/koľajnica FASTSIM. Algoritmus FASTSIM na riešenie problému kontaktu koleso/koľajnica, ktorý navrhol prof. Kalker v 70. rokoch 20. storočia, našiel široké uplatnenie v počítačových simulačných programoch pre dynamiku koľajových vozidiel. Algoritmus je založený na zjednodušenej teórii valivého kontaktu. FASTSIM je dobre akceptovaná a najbežnejšia metóda v simuláciách viazaných mechanických sústav na určenie tangenciálnych kontaktných síl medzi koľajnicou a kolesom pri výpočtoch dynamiky vozidiel [13, 14].

Samotné kontaktné plochy kolesa a koľajnice v prostredí softvéru Simpack sú navzájom prepojené prostredníctvom kontaktných spojovacích čiar (angl. Contact Connection Line). Označujú línie alebo množinu bodov, ktoré spájajú jednotlivé kontaktné body medzi kolesom a koľajnicou a slúžia ako referencia na výpočet kontaktnej dynamiky, rozloženie síl v kontakte atď.

Ďalším dôležitým parametrom, ktorý ovplyvňuje presnosť simulačných výpočtov, je vzorkovacia frekvencia. V softvéri Simpack označuje vzorkovacia frekvencia frekvenciu alebo časový interval, s akým sa počas simulácie ukladajú výstupné údaje. Pre všetky typy simulačných výpočtov popísaných v tejto práci vzorkovacia frekvencia je 200 Hz. Vyššia vzorkovacia frekvencia znamená menšie časové kroky, tým pádom aj presnejší výpočet, ale zároveň sa zvýši veľkosť súborov a výpočtová náročnosť.

Taktiež zhrnutie všetkých typov simulácií, vstupných a výstupných parametrov, ktoré boli popísané vyššie, je možné vidieť v nasledovnej tab. 2.

Tab. 2 Zhrnutie typov simulácií, vstupných a výstupných parametrov

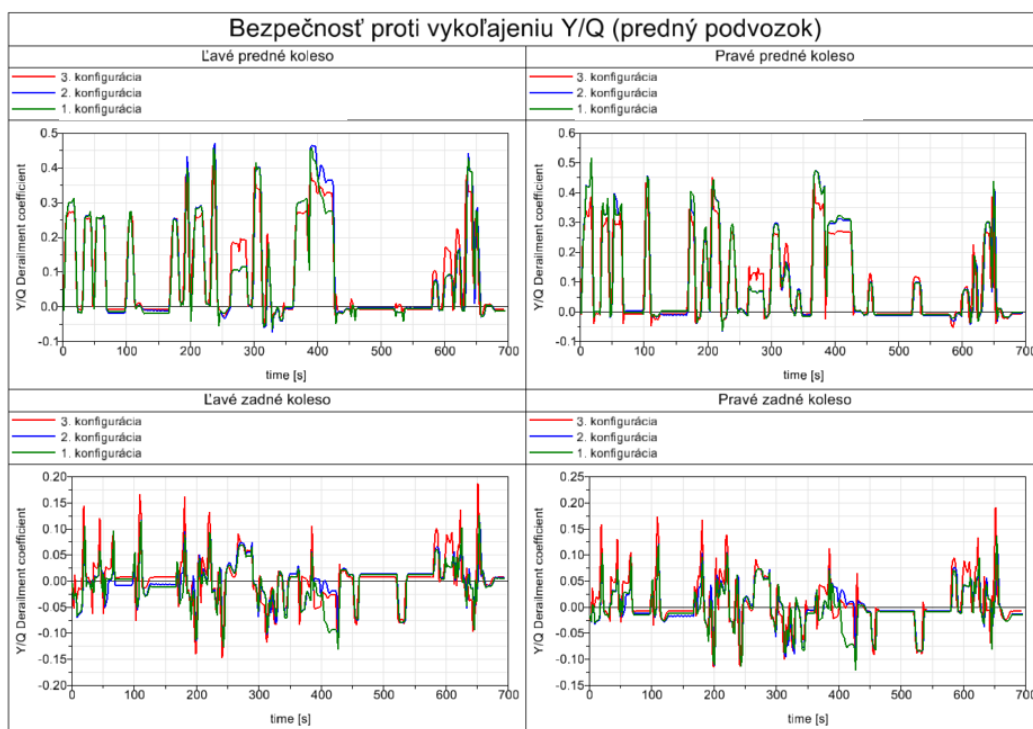
Trať	Rýchlosť jazdy [km·h ⁻¹]	Vzorkovacia frekvencia [Hz]	Nerovnosti trate	Min. polomer oblúka [m]	$(Y/Q)_{lim}$ [-]
Prievidza – Chrenovec	50	200	Nie	272	0,8
Šurany – Úľany nad Žitavou	80	200	Áno	380	0,8
Jelšovce - Koniarovce	100	200	Nie	450	0,8
EN 14363 – Metóda 1	8	200	Áno	150	1,2
EN 14363 – Metóda 2	8	200	Nie	150	1,2
EN 14363 – Metóda 3	-	200	-	-	$(\Delta Q/Q)_{lim} =$ 0,6
EN 15839 – S- oblúk	10	200	Nie	150	1,2

4 VÝSLEDKY

V tejto kapitole sú podrobne popísané výsledky uskutočnených simulačných analýz, ktoré prinášajú prehľad o tom, ako jednotlivé modelové parametre ovplyvňujú výsledky simulácií.

4.1 Bezpečnosť voči vykoľajeniu na trati Prievidza – Chrenovec

Výsledky simulačných výpočtov bezpečnosti proti vykoľajeniu Y/Q na úseku železničnej trati Prievidza - Chrenovec pre tri konfigurácie simulačných modelov sú znázornené v grafoch (obr. 15) a vykonané pre rýchlosť jazdy $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (maximálna dovolená rýchlosť na tomto úseku) na trati bez uvažovania nerovností.

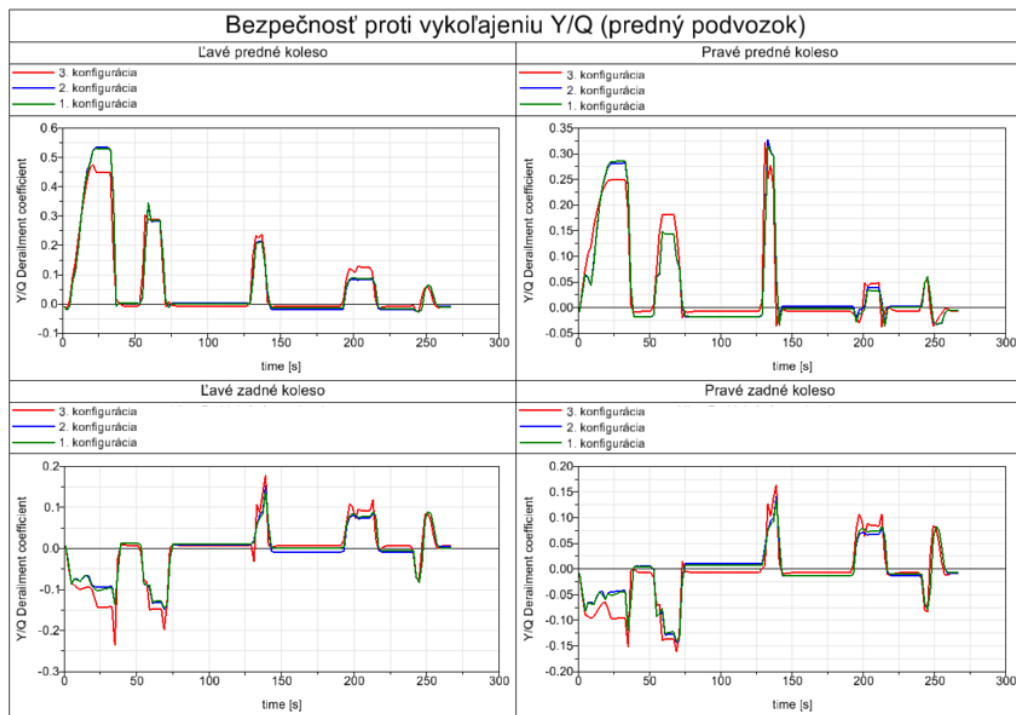


Obr. 15 Bezpečnosť proti vykoľajeniu Y/Q , predný podvozok, trať Prievidza - Chrenovec

Ako je možné vidieť z grafov (obr. 15), maximálna prípustná hodnota bezpečnosti proti vykoľajeniu $Y/Q_{max} = 0,8$ (pre oblúky s polomerom väčším ako 250 m) nebola dosiahnutá. Maximálna hodnota dosiahnutá pre pravé koleso je $Y/Q = 0,517$ a pre ľavé koleso je $Y/Q = 0,458$ v 1. konfigurácii, v prípade 2. konfigurácie - pre pravé koleso je $Y/Q = 0,512$ a pre ľavé koleso je $Y/Q = 0,47$. Hodnoty pre 3. konfiguráciu boli dosiahnuté nasledovné: pre pravé koleso je $Y/Q = 0,453$ a pre ľavé koleso je $Y/Q = 0,406$.

4.2 Bezpečnosť voči vykoľajeniu na trati Šurany – Úľany na Žitavou

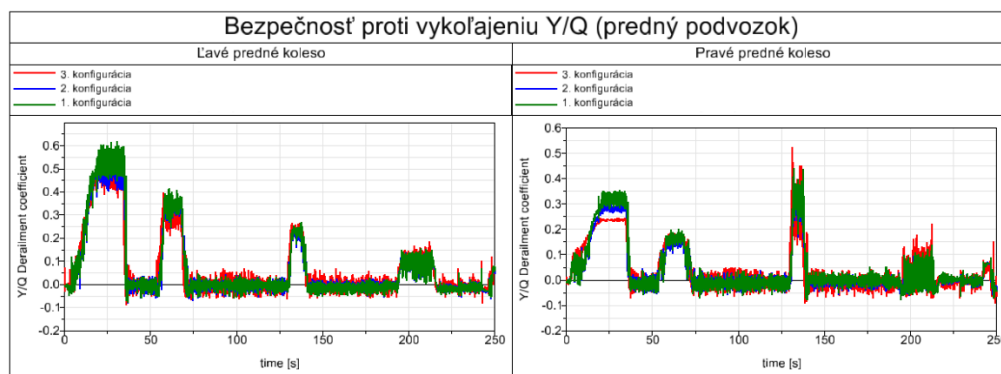
Výsledky simulačných výpočtov bezpečnosti proti vykoľajeniu Y/Q na úseku železničnej trati Šurany – Úľany nad Žitavou pre tri konfigurácie simulačných modelov boli znázornené v grafoch (obr. 16) a vykonané pre rýchlosť jazdy $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (maximálna dovolená rýchlosť na tomto úseku) bez uvažovania nerovností.



Obr. 16 Bezpečnosť proti vykoľajeniu Y/Q , predný podvozok, trať Šurany – Úľany nad Žitavou

Boli dosiahnuté nasledovné hodnoty: pre pravé koleso je $Y/Q = 0,31$ a pre ľavé koleso je $Y/Q = 0,53$ v prípade 1. konfigurácie, v prípade 2. konfigurácie - pre pravé koleso je $Y/Q = 0,327$ a pre ľavé koleso je $Y/Q = 0,535$. Hodnoty pre 3. konfiguráciu boli dosiahnuté nasledovné: pre pravé koleso je $Y/Q = 0,321$ a pre ľavé koleso je $Y/Q = 0,475$. Hodnoty, ktoré boli dosiahnuté pre ostatné kolesá, sú uvedené v tab. 9. Maximálna prípustná hodnota bezpečnosti proti vykoľajeniu $Y/Q_{max} = 0,8$ (pre oblúky s polomerom väčším ako 250 m) nebola dosiahnutá.

Ako bolo spomenuté hore, pre trať Šurany – Úľany nad Žitavou sú v modeli uvažované nerovnosti trate. Vďaka tomu môžeme vidieť vplyv nerovností na bezpečnosť voči vykoľajeniu pre rôzne konfigurácie modelov.



Obr. 17 Bezpečnosť proti vykoľajeniu Y/Q, predné dvojkoľesie, trať Šurany – Úľany nad Žitavou s nerovnosťami

Výsledky simulačnej analýzy na trati s nerovnosťami (obr. 17) a porovnanie s traťou bez nerovností sú uvedené v tab. 3.

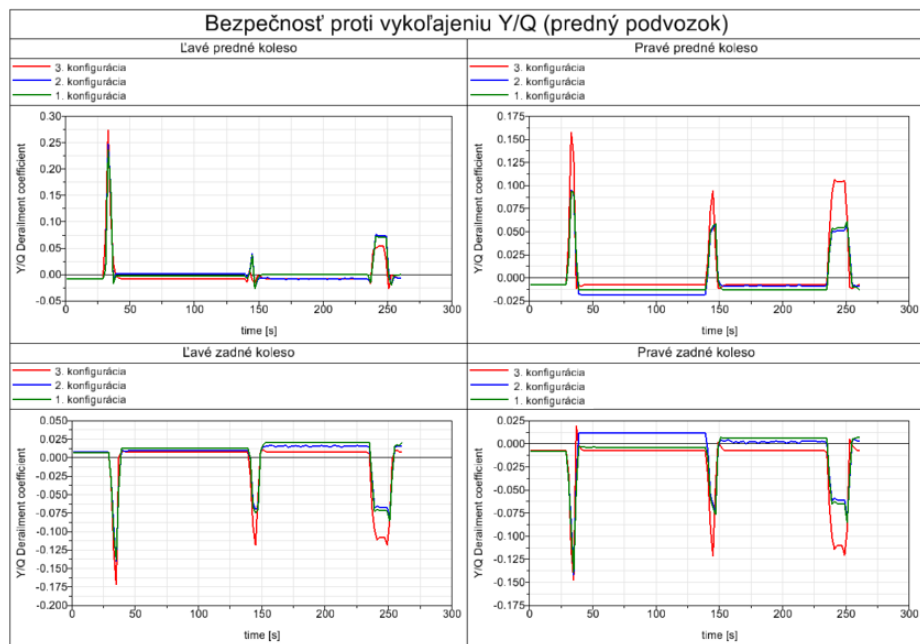
Tab. 3 Maximálne dosiahnuté hodnoty bezpečnosti proti vykoľajeniu Y/Q pre trať s nerovnosťami a bez nerovností

Bezpečnosť proti vykoľajeniu Y/Q [-]				
Predný podvozok – predné dvojkoľesie				
	Trať bez nerovností	Trať bez nerovností	Trať s nerovnosťami	Trať s nerovnosťami
	Pravé predné koleso	Ľavé predné koleso	Pravé predné koleso	Ľavé predné koleso
3. konfigurácia	0,321737	0,475226	0,25	0,46
2. konfigurácia	0,327627	0,535989	0,31	0,51
1. konfigurácia	0,315351	0,530864	0,33	0,54

Pri porovnaní všetkých troch konfigurácií na trati s nerovnosťami dosahuje 3. konfigurácia najnižšie hodnoty bezpečnosti voči vykoľajeniu Y/Q (pravé koleso: 0,25; ľavé koleso: 0,46). V porovnaní s 2. konfiguráciou (pravé koleso: 0,31; ľavé koleso: 0,51) ide o zníženie o 19,4 % na pravom kolese a o 9,8 % na ľavom kolese. V porovnaní s 1. konfiguráciou (pravé koleso: 0,33; ľavé koleso: 0,54) je pokles ešte výraznejší – o 24,2 % na pravom a o 14,8 % na ľavom kolese. Medzi 1. a 2. konfiguráciou sú rozdiely menšie – 2. konfigurácia má o 6,1 % nižšiu hodnotu Y/Q na pravom kolese a o 5,6 % na ľavom.

4.3 Bezpečnosť voči vykoľajeniu na trati Jelšovce – Koniarovce

Výsledky simulačných výpočtov bezpečnosti proti vykoľajeniu Y/Q na úseku železničnej trati Jelšovce - Koniarovce pre tri konfigurácie simulačných modelov sú znázornené v grafoch (obr. 73 a obr. 74). Simulácie boli vykonané pre rýchlosť jazdy 100 km·h⁻¹ bez uvažovania nerovností.

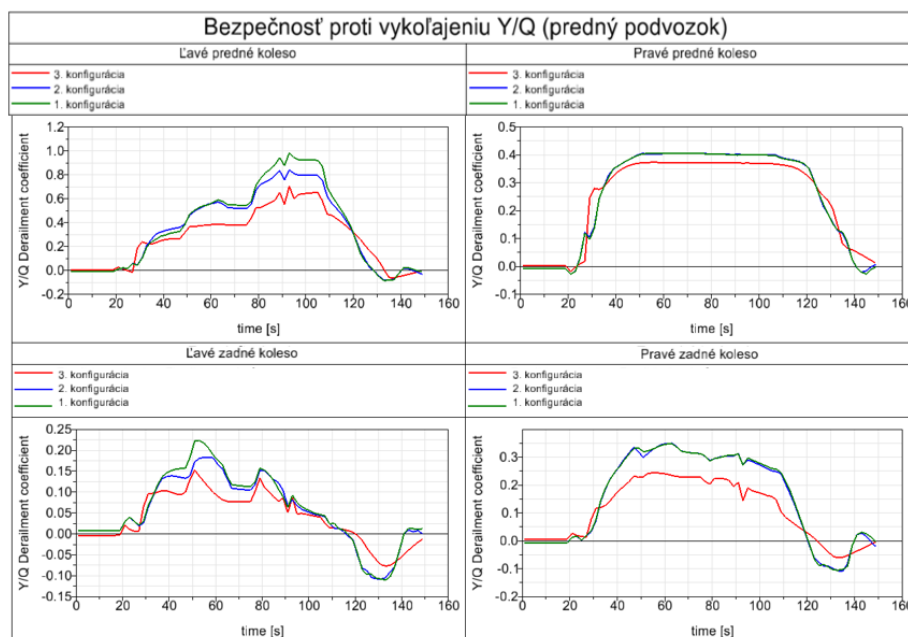


Obr. 18 Bezpečnosť proti vykoľajeniu Y/Q, predný podvozok, trať Jelšovce - Koniarovce

Boli dosiahnuté nasledovné hodnoty: pre pravé koleso je $Y/Q = 0,093$ a pre ľavé koleso je $Y/Q = 0,236$ pre 1. konfiguráciu, pre 2. konfiguráciu - pre pravé koleso je $Y/Q = 0,095$ a pre ľavé koleso je $Y/Q = 0,248$. Hodnoty pre 3. konfiguráciu sú nasledovné: pre pravé koleso je $Y/Q = 0,157$ a pre ľavé koleso je $Y/Q = 0,273$. Hodnoty, ktoré boli dosiahnuté pre ostatné kolesá, sú uvedené v tab. 11. Maximálna prípustná hodnota bezpečnosti proti vykoľajeniu $Y/Q_{\max} = 0,8$ (pre oblúky s polomerom väčším ako 250 m) nebola dosiahnutá.

4.4 Bezpečnosť voči vykoľajeniu podľa normy EN 14 363 - metóda 1

Analýza bezpečnosti proti vykoľajeniu podľa normy EN 14363 - metóda 1 bola vykonaná simulovaním zdvihu vonkajšieho kolesa nebehajúceho dvojkoľesia v smere jazdy na zbortenej koľaji v oblúku, čo je predné ľavé koleso v smere jazdy vozidla. Dosiahnuté hodnoty je možno pozorovať na grafe (obr. 19).



Obr. 19 Bezpečnosť proti vykoľajeniu Y/Q, predný podvozok, metóda 1

Ako je možné vidieť z obr. 19, najväčší rozdiel medzi hodnotami bezpečnosti proti vykoľajeniu vznikne na prednom ľavom kolese. Pri prvej konfigurácii, ktorá je východiskovým modelom a slúži na porovnanie s dvomi ďalšími konfiguráciami, hodnota bezpečnosti proti vykoľajeniu je $Y/Q = 0,98425$. Analogická hodnota, ktorá bola dosiahnutá pre druhú a tretiu konfiguráciu, je $Y/Q = 0,843149$ a $Y/Q = 0,704898$. Tým pádom, pri implementácii poddajnej kostry vagóna hodnota bezpečnosti proti vykoľajeniu poklesne o 16,74 %. Pri implementácii aj poddajnej kostry aj poddajného rámu podvozka je rozdiel 39,62 %. Medzi 2. a 3. konfiguráciou modelu vagóna sa rozdiel rovná 19,61 %.

4.5 Bezpečnosť voči vykoľajeniu podľa normy EN 14 363 - metóda 2

V tejto kapitole je možné vidieť výsledky analýzy bezpečnosti voči vykoľajeniu Y/Q podľa metódy 2. Skúška pozostávala z dvoch samostatných častí, a to: zistenie minimálnych kolesových síl Q_{0min} pomocou skúšky skrútením a vodiacich kolesových síl Y prejazdom po rovinnom oblúku.

Simulácia určená na zistenie vodiacich kolesových síl bola vykonaná na modeli trate s rovinným oblúkom s polomerom 150 m bez prevýšenia a bez prechodníc. Rýchlosť jazdy vozidla bola $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Ďalšou samostatnou časťou skúšky bolo analyzovanie minimálnych kolesových síl Q_{0min} skrútením kostry vagóna a rámu prvého podvozka a potom nezávisle kostry a rámu zadného podvozka.

Rovnako ako aj pri metóde 1, hodnota bezpečnosti proti vykoľajeniu pri 1. konfigurácii je $Y/Q = 0,947$. Analogická hodnota, ktorá bola dosiahnutá pre 2. a 3. konfiguráciu, je $Y/Q = 0,888$ a $Y/Q = 0,825$. Tým pádom, pri implementácii poddajnej kostry vagóna (2. konfigurácia) hodnota bezpečnosti proti

vykoľajeniu poklesne o 6,64 %. Pri implementácii aj poddajnej kostry vagóna aj poddajného rámu podvozka (3. konfigurácia) je to pokles o 14,79 %. Medzi 2. a 3. konfiguráciou sa rozdiel rovná 7,64 %.

4.6 Bezpečnosť voči vykoľajeniu podľa normy EN 14 363 - metóda 3

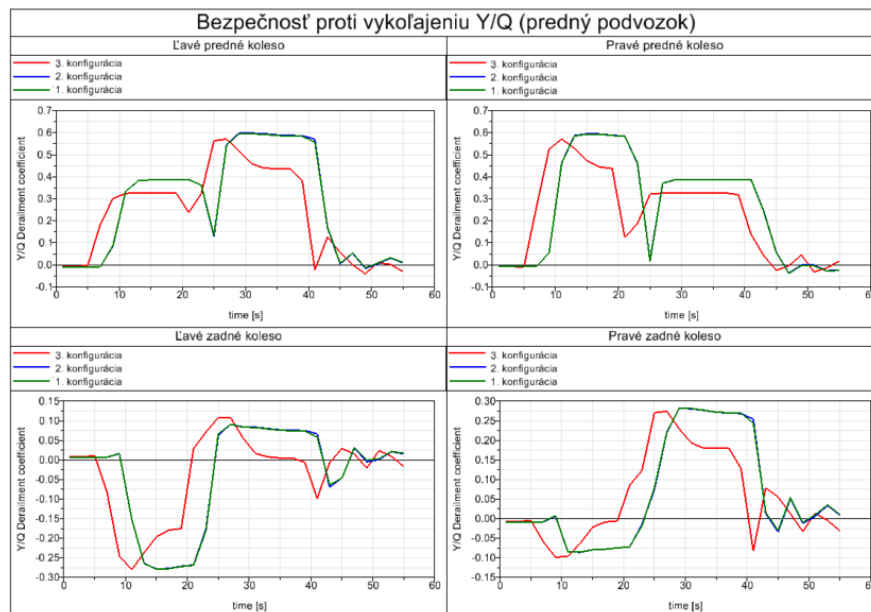
V tejto kapitole je možné vidieť výsledky analýzy bezpečnosti voči vykoľajeniu podľa metódy 3. Skúška pozostávala z dvoch samostatných častí, a to: meranie súčiniteľa odľahčenia dvojkoľesia $\Delta Q/Q_0$ prostredníctvom skúšky skrútením a súčiniteľa X podvozkov prostredníctvom skúšky odporu proti natočeniu podvozku.

Súčiniteľ odľahčenia $\Delta Q/Q_0 = 0.76125$ pre 1. konfiguráciu nespĺňa podmienku $(\Delta Q/Q_0)_{\max} = 0,6$. Stredná hodnota súčiniteľa odľahčenia kolesa $\Delta Q/Q_0$ prevyšuje limitnú hodnotu o 26,88 %. Opačnú situáciu je možné pozorovať pri použití modelov s poddajnými telesami (2. konfigurácia, 3. konfigurácia). Tieto dve konfigurácie modelov spĺňajú limitnú podmienku. Pre 2. konfiguráciu s poddaným rámom vagóna súčiniteľ je $\Delta Q/Q_0 = 0,47$ menší než maximálne prípustná hodnota $(\Delta Q/Q_0)_{\max} = 0,6$ o 21,97 % a pre 3. konfiguráciu s poddajnými rámami kostry vagóna a podvozku rozdiel $\Delta Q/Q_0 = 0,4475$ je 25,42 %. Na základe výsledkov simulačných výpočtov je možné konštatovať, že súčiniteľ odľahčenia dvojkoľesia $\Delta Q/Q_0$ pre 1. konfiguráciu nevyhovuje požadovanej limitnej hodnote $(\Delta Q/Q_0)_{\max} = 0,6$. Naopak, pri modeloch s poddajnými telesami sú limitné podmienky splnené. Tieto výsledky poukazujú na význam poddajnosti v simulačných modeloch pre zlepšenie bezpečnosti proti vykoľajeniu. Implementácia poddajných telies výrazne prispieva k spresneniu požiadaviek na stabilitu jazdy a bezpečnosť voči vykoľajeniu.

V druhej časti skúšky vykonanej podľa metódy 3 bol výsledný súčiniteľ X podvozku, ktorý sa rovná 0,1307, pre všetky tri typy simulačných MBS modelov identický. Tento parameter, ktorý vyjadruje odpor podvozku proti natočeniu voči skrini vozidla, je ovplyvnený vlastnosťami vzpruženia, trením v klaniciach a charakteristikami trenia v guľovom otočnom čape. Dané charakteristiky sú rovnako nastavené pre všetky tri modely. Limitná hodnota $X_{\lim} = 0,14$ nebola prekročená.

4.7 Bezpečnosť voči vykoľajeniu podľa EN 15839 – S-oblúk

Výsledky simulačných výpočtov bezpečnosti proti vykoľajeniu Y/Q na úseku železničnej trate podľa normy EN 15839 – S-oblúk pre tri konfigurácie simulačných modelov sú znázornené v grafoch (obr. 20) a vykonané pre rýchlosť jazdy $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bez uvažovania nerovností.



Obr. 20 Bezpečnosť proti vykoľajeniu Y/Q, predný podvozok, S-obľúk

Boli zistené nasledovné hodnoty bezpečnosti proti vykoľajeniu pre jednotlivé konfigurácie. V prípade 1. konfigurácie bola dosiahnutá hodnota Y/Q pre pravé koleso 0,593 a pre ľavé koleso 0,595. Pri 2. konfigurácii bola hodnota Y/Q pre pravé koleso 0,595 a pre ľavé koleso 0,598. Pre 3. konfiguráciu, zahŕňajúcu poddajný rám vagóna a rám podvozku boli dosiahnuté hodnoty Y/Q pre pravé koleso 0,57 a pre ľavé koleso 0,571. Maximálna prípustná hodnota bezpečnosti proti vykoľajeniu, ktorá je $Y/Q_{\max} = 1,2$ (platná pre oblúky s polomerom 150 m), nebola prekročená.

4.8 Diskusia

Ako je možné vidieť z výsledkov, najväčší vplyv poddajnosti na bezpečnosť voči vykoľajeniu je možné pozorovať pri analýzach podľa metód 1 až 3. Na rozdiel od prejazdov na reálnych úsekoch trate, kde tento vplyv je minimálny alebo vôbec nepozorovateľný okrem prípadu pre trať Šurany – Úľany nad Žitavou s uvažovaním nerovností trate. Je to možné vysvetliť tým, že pri analýze bezpečnosti proti vykoľajeniu Y/Q podľa metód definovaných v norme EN 14363 dochádza ku skúškam, pri ktorých deformácia nosných komponentov výrazne vplýva na výsledky. Je to možné vidieť pri skúške skrútením (metóda 2 a 3), pri ktorej dochádza k skrúteniu rámu vagóna a rámov podvozka alebo pri prejazde vozidla cez prepadnutú koľaj (metóda 1), kde poddajnosť komponentov je tiež podstatná. Tak isto dochádza k skrúteniu nosných komponentov pri prejazde vagóna po trati s nerovnosťami. V týchto prípadoch poddanosť telies zohráva veľký vplyv na výsledky. Bezpečnosť voči vykoľajeniu 2. a 3. konfigurácie podľa metódy 1 a 2 v porovnaní s 1. konfiguráciou majú nižšie hodnoty a tým pádom aj lepšie jazdné vlastnosti. V prípade metódy 3 model s tuhými telesami vôbec nesplnil limity normy EN 14363 [15]. Zavedenie poddajných telies viedlo k zníženiu hodnoty Y/Q skoro až do 40 %. Taktiež nárast

hodnôt bezpečnosti voči vykoľajeniu Y/Q je možné pozorovať na trati Šurany – Úľany nad Žitavou s nerovnosťami pre 1. konfiguráciu. V prípade 2. a 3. konfigurácie je možné pozorovať pokles hodnôt.

Pri vykonávaní simulácií jázd na reálnych železničných tratiach bez nerovností trate nebol pozorovaný významný vplyv poddajnosti konštrukčných prvkov vozidla na bezpečnosť proti vykoľajeniu. Tento jav je možné vysvetliť absenciou výrazných skrútení rámov podvozka a kostry vozňa v podmienkach reálnej trate bez uvažovania nerovností. Keďže deformácie rámových štruktúr sú v týchto prípadoch minimálne, ich vplyv na rozloženie síl v kontaktnom bode koleso/koľajnica sa prejavuje len v obmedzenej miere. Z toho vyplýva, že účinok poddajnosti je relevantnejší v podmienkach extrémnych záťažových stavov, kde dochádza k výraznejšiemu torznému namáhaniu konštrukcie vozidla.

5 PRÍNOSY PRÁCE

Prínosy pre prax:

- určenie, overenie, potvrdenie správnosti výpočtového postupu pre riešenie konkrétneho typu vedeckého problému,
- spracovanie prípadovej štúdie dynamickej analýzy špecifikovaného vozidla pri simulovanej jazde po definovanej koľaji s poddajným členom,
- formulácia záverov a odporúčanie pre prax.

Prínosy pre vedu a teóriu:

- predikcia jazdných vlastností železničného vozňa na základe jeho geometrických parametrov, rozloženia hmotnosti, špecifických vlastností pružných väzieb a geometrii prechádzanej koľaje s implementáciou poddajného člena do modelu,
- posúdenie vlastností železničného vozňa s poddajným členom pri prechode trate s definovanou geometriou,
- spracovanie a vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov.

Prínosy pre pedagogiku:

- abstrahovanie špecifických vedomostí získaných aplikáciou empirických experimentálnych a výpočtových simulačných metód na skúmanú problematiku,
- syntéza výsledkov a formulovanie záverov, ktoré upresnia, prípadne modifikujú odbornú problematiku prednášanú pre študentov univerzitného inžinierskeho alebo doktorandského štúdia,
- rozšírenie vstupov pre úspešnú aplikáciu didaktických zásad používaných vo vysokoškolskej výučbe.

ZÁVER

Dizertačná práca bola zameraná na problematiku dynamických vlastností koľajových vozidiel. V práci sú podrobne opísane javy, ktoré sa vyskytujú pri pohybe koľajových vozidiel na priamych úsekoch trate alebo počas jazdy v oblúkoch.

Vykonala sa aj analýza vedeckej a odbornej technickej literatúry o aktuálnom stave v oblasti simulačného modelovania so zavedením poddajných telies do MBS modelov.

Ďalšou etapou bolo vypracovanie praktickej časti úlohy výskumu v rámci dizertačnej práce. Na tento účel bol v simulačnom softvéri Simpack vytvorený model kontajnerového vagóna typu Sgnss 60ft pozostávajúci z tuhých telies. Simulačný model pozostáva z plošinovej kostry a dvoch dvojnápravových podvozkov Y25. Zavedenie modelu pozostávajúceho len z tuhých telies je potrebné na ďalšie porovnanie jeho vlastností so simulačnými modelmi, v ktorých sú zavedené poddajné telesá, konkrétne poddajný rám podvozku a poddajná kostra vagóna. Následne bol v tejto práci podrobne opísaný proces zavedenia poddajných komponentov do MBS modelu kontajnerového vagóna typu Sgnss 60ft. Simulačné výpočty sa vykonali na modeloch reálnych úsekov trate, a to Prievidza - Chrenovec, Šurany - Úľany nad Žitavou s nerovnosťami trate a bez nerovností, Jelšovce – Koniarovce, ktoré boli vytvorené v prostredí softvéru Simpack a taktiež na tratiach podľa normy EN 14 363 – metóda 1, metóda 2, metóda 3 a na trati podľa normy EN 15839 – S-oblúk.

Na záver boli spracované výsledky, pri ktorých sa ukázalo, že zavedenie poddajných telies má zásadný význam najmä pri simuláciách, kde dochádzalo k deformačným stavom rámových štruktúr, ako sú torzné namáhania podvozkov a skrine vozidla pri dynamických skúškach podľa normy EN 14363 alebo pri prejazde na nerovnej trati. V takýchto prípadoch poddajnosť výrazne ovplyvňuje rozloženie síl v kontaktnom bode koleso/koľajnica, čo má priamy dopad na bezpečnosť proti vykoľajeniu a hodnoty koeficientu Y/Q .

Na druhej strane, pri simuláciách zameraných na jazdné vlastnosti vozidla na reálnych úsekoch trate bez nerovností, kde deformácie rámových štruktúr boli minimálne, je využitie poddajných telies menej opodstatnené. V týchto prípadoch model pozostávajúci z tuhých telies poskytol dostatočne presné výsledky a jeho použitie je efektívnejšie z hľadiska výpočtovej a časovej náročnosti.

Takže je možné konštatovať, že zavedenie poddajných telies do modelu viazanej mechanickej sústavy koľajové vozidlo má významný vplyv v konkrétnych typoch riešených úloh a pred začiatkom simulačných výpočtov treba detailne analyzovať typ výpočtu za účelom efektívneho využitia softvéru a času potrebného na riešenie úlohy.

ANOTÁCIA

Železničná doprava je vo vyspelých krajinách významným prvkom infraštruktúry, ktorý má medzi hlavnými druhmi dopravy dôležité postavenie. Jej kľúčovou úlohou v hospodárstve je zabezpečiť efektívny a udržateľný spôsob prepravy tovaru a cestujúcich. Koľajové vozidlá ako kľúčový prvok železničnej dopravy sú zložené mechanické systémy, ktoré sú prevádzkované v náročných dynamických podmienkach, vrátane prechádzania oblúkov, prejazdu výhybiek a jazdy po nerovnostiach na koľajniciach.

Dostatočne presná analýza týchto systémov je nevyhnutná pre zabezpečenie ich bezpečnej a spoľahlivej prevádzky. S narastajúcim záujmom o výskum dynamických vlastností a parametrov koľajových vozidiel sa čoraz viac využívajú počítačové simulácie.

Tradičné modely tuhých telies v simuláciách koľajových vozidiel sú síce výpočtovo efektívne, ale majú určité obmedzenia v presnosti. Táto práca skúma výhody implementácie poddajných telies do viazaných mechanických sústav (MBS) koľajových vozidiel v simulačných modeloch, ktoré umožňujú realistickejšie zobrazenie dynamických vlastností komponentov koľajových vozidiel. Tieto simulácie umožňujú aj štúdium komplexných javov, ako je kontakt kolesa s koľajnicou a uľahčujú hodnotenie a optimalizáciu konštrukcií koľajových vozidiel.

Cieľom dizertačnej práce je vytvorenie simulačného modelu koľajového vozidla s poddajným komponentom. Práca zdôrazňuje metodiky, výzvy a pokroky v oblasti výskumu implementácie poddajných telies pre zlepšenie presnosti a efektívnosti simulačných výpočtov koľajových vozidiel.

RESUMÉ

Rail transport is an important infrastructure element in developed countries and has a prominent position among the main modes of transport. Its key role in the economy is to provide an efficient and sustainable method for the transport of goods and passengers. Rail vehicles, as a key element of rail transport, are complex mechanical systems, operating under dynamic conditions, including curve crossing, switching, and the impact of irregularities on the rails.

Sufficiently accurate analysis of these systems is essential to ensure their safe and reliable operation. With the growing interest in research on the dynamic properties and parameters of rail vehicles, computer simulations are increasingly being used.

Traditional rigid body models in rail vehicle simulations, although computationally efficient, have some limitations in accuracy. This thesis explores the benefits of implementing flexible bodies in multibody system (MBS) of rail vehicle in simulation models to enable a more realistic representation of the dynamic properties of rail vehicle components. These simulations also allow the study of complex phenomena, such as wheel-rail contact, and facilitate the evaluation and optimization of rail vehicle constructions.

The aim of the dissertation is to create a simulation model of a rail vehicle with a flexible component. The thesis highlights the methodologies, challenges, and research advances in the implementation of flexible bodies to improve the accuracy and efficiency of rail vehicle simulations.

LITERATÚRA

- [1] SHARMA, S. K., SHARMA, R. Ch., CHOI, Y., LEE, J., 2023. *Experimental and Mathematical Study of Flexible–Rigid Rail Vehicle Riding Comfort and Safety*. Applied Sciences.
- [2] ÇATI, Y., DÜZGÜN, M., KRACHT, F. E., 2024. *Development of a New Vertical Dynamic Model of a Rail Vehicle for the Analysis of Ride Comfort*. Applied Sciences.
- [3] LIAO, A., HUANG, X., FANG., Y., 2017. *Fatigue Analysis for Bogie Frame Based on Rigid-Flexible Coupling Simulation*. Zhendong Ceshi Yu Zhenduan/Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis. 37(2), 392-397.
- [4] LAN, Q., SONG, F., 2021. *Fatigue Simulation of Railway Car Bogie Frame Based on Multi-body Dynamics and Finite Element Analysis*. Journal of Physics: Conference Series. 1885(4).
- [5] DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., SKOČILASOVÁ, B., 2015. *Computational Modelling of the Rail Vehicle Multibody System Including Flexible Bodies*. In: Communications. 17(3), 31-36.
- [6] DIŽO, J., HARUŠINEC, J., BLATNICKÝ, M., 2015. *Multibody System of a Rail Vehicle Bogie with a Flexible Body*. Manufacturing Technology. 15(5).
- [7] ISHCHUK, V., DIŽO J., BLATNICKÝ M., SEMENOV, S., MIKHAILOV, E., SOLČANSKÝ, S., 2023. *A process of modelling a rail vehicle multibody system with a deformable body*. In: Transportation Research Procedia. 74, 442-449. ISSN 2352-1465.
- [8] ISHCHUK, V., DIŽO J., BLATNICKÝ M., MOLNÁR, D., SOLČANSKÝ, S., 2023. *Výpočty a simulácie viazaných mechanických sústav koľajových vozidiel s poddajným telesom*. In: Súčasné problémy v koľajových vozidlách. 193-201. ISBN 978-80-89276-61-5.
- [9] ISHCHUK, V., DIŽO J., BLATNICKÝ M., LOVSKA, A., SEMENOV, S., MIKHAILOV, E., 2025. *Safety against derailment of a container freight wagon with flexible components according to the EN 14363 standard – the Method 1*. In: Transportation Research Procedia. (bude opublikovaný).
- [10] EN 14363. *Railway applications Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles European Committee for standardization*.
- [11] EN 15839:2024. *Railway applications - Testing and simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - Running safety under longitudinal compressive force*.
- [12] GERLICI, J., LACK, T., 2004. *Kontakt železničného dvojkoľesia a koľaje*. EDIS. ISBN 9788080703172.
- [13] KALKER, J.J., 1982. *A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact*. Vehicle System Dynamics, 11(1) (1982), 1–13.
- [14] KALKER, J.J., 1990. *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contac*. Springer The Netherlands.

ZOZNAM VYBRANEJ PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

Publikácie v karentových časopisoch

- [1] LOVSKA, A., GERLICI, J., DIŽO, J., **ISHCHUK, V.**, 2024. The Strength of Rail Vehicles Transported by a Ferry Considering the Influence of Sea Waves on Its Hull. In: Sensors. 24(1), 183.
- [2] SEMENOV, S., MIKHAILOV, E., KLIUIEV, S., DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, 2024. Improving the energy efficiency of a tram's running gear. In: Acta Polytechnica. 63(3), 216-226.
- [3] **ISHCHUK, V.**, KRAVCHENKO, K., BLATNICKÝ, M., LOVSKA, A., DIŽO, J., 2025. Research into the Possibilities of Improving the Adhesion Properties of a Locomotive. In: Machines. 13(1).

Publikácie zaradené v databáze Web of Science (WOS) a Scopus

- [4] **ISHCHUK, V.**, DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., SOLČANSKÝ, S., 2023. Assessment of derailment quotient of locomotive bogie. In: Engineering for rural development proceedings 22th international scientific conference, proceedings, may 24-26, 2023, Jelgava. St. vyd. - Jelgava: Latvia University of Agriculture, 152-157.
- [5] DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, SOLČANSKÝ, S., 2023. Comparison of selected outputs of rail vehicle bogie variant solutions. In: Engineering for rural development proceedings 22th international scientific conference, proceedings, may 24-26, 2023, Jelgava. St. vyd. - Jelgava: Latvia University of Agriculture, 131-137.
- [6] BLATNICKÝ, M., MOLNÁR, D., DIŽO, J., **ISHCHUK, V.**, 2023. Vehicle slalom passage analysis. In: Engineering for rural development proceedings 22th international scientific conference, proceedings, may 24-26, 2023, Jelgava. St. vyd. - Jelgava: Latvia University of Agriculture, 51-57.
- [7] SOLČANSKÝ, S., GERLICI, J., **ISHCHUK, V.**, MOLNÁR, D., 2023. Simulation of freight wagon running on test track at different speeds and load distribution from point of view of derailment safety and lateral forces. In: Engineering for rural development proceedings 22th international scientific conference, proceedings, may 24-26, 2023, Jelgava. St. vyd. - Jelgava: Latvia University of Agriculture, 857-863.
- [8] PAVELČÍK, V., DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, MOLNÁR, D., 2023. Analysis of the test bench design influence on the cooling performance of a rail vehicle brake disc. In: Communications - Scientific Letters of the University of Žilina. 25(3), B194-B200.
- [9] MIKHAILOV, E., SEMENOV, S., KOVTANETS, M., DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, 2023. Increasing the efficiency of transportation of cargoes with a cylindrical shape. In: Communications - Scientific Letters of the University of Žilina. 25(4), B294-B300. ISSN 13354205.
- [10] SEMENOV, S., MIKHAILOV, E., KRAVCHENKO, O., DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, 2023. Improvement of the soft containers use in transportation of the bulk cargo. In: Communications - Scientific Letters of the University of Žilina. 25(4), B278-B284.

- [11] BLATNICKÝ, M., DIŽO, J., MOLNÁR, D., **ISHCHUK, V.**, 2023. Analysis of a Vehicle Body Pitch under Braking. In: Transport Means - Proceedings of the International Conference. 1, 25-30. ISSN 1822296X.
- [12] BARTA, D., **ISHCHUK, V.**, MOLNÁR, D., DIŽO, J., 2023. Structural Design of a Small Three-wheeled Vehicle for the Transport of Bulk Materials. In: Transport Means - Proceedings of the International Conference. 1, 428-434.
- [13] DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, KOZÁKOVÁ, K., SEMENOV, S., MIKHAILOV, E., 2023. A Mathematical Model of the Diesel-Mechanical Power Transmission of a Railway Vehicle. In: Transport Means - Proceedings of the International Conference. 1, 237-243.
- [14] DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, MOLNÁR, D., MELNIK, R., KOZIAK, S., 2023. Assessment of the Suitability of a Hydraulic Arm for a Smaller Category Skidder. In: Transport Means - Proceedings of the International Conference. 1, 392-396.
- [15] GERLICI, J., VATULIA, G., LOVSKA, A., SKURIKHIN, D., HARUŠINEC, J., SUCHÁNEK, A., **ISHCHUK, V.**, 2023. The Strength of the Open Wagon Body when Transporting Containers. In: Transport Means - Proceedings of the International Conference. 1, 440-445.
- [16] MOLNÁR, D., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, BARTA, D., 2023. Design of the Brake Unit of a Three-wheeled Vehicle for the Transport of Bulk Material. In: Transport Means - Proceedings of the International Conference. 1, 504-510.
- [17] DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, MOLNÁR, D., KURTULÍK, J., 2023. Assessment of a Single-Axle Tractor Trailer Stability. In: Lecture Notes in Networks and Systems. 807, 474-483.
- [18] BLATNICKÝ, M., MOLNÁR, D., **ISHCHUK, V.**, SUCHÁNEK, A., 2023. Design and Sizing of Structural Units of Technical Equipment Working in the Amusement Industry. In: Lecture Notes in Networks and Systems. 807, 255-268.
- [19] **ISHCHUK, V.**, DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., MOLNÁR, D., LOVSKA, A., FOMIN, O., 2023. A calculation and analysis of a cylindrical part of a steam boiler of a steam locomotive miniature model. In: Transportation Research Procedia. 74, 411-417.
- [20] **ISHCHUK, V.**, DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., SEMENOV, S., MIKHAILOV, E., SOLČANSKÝ, S., 2023. A process of modelling a rail vehicle multibody system with a deformable body. In: Transportation Research Procedia. 74, 442-449.
- [21] MOLNÁR, D., BLATNICKÝ, M., DIŽO, J., **ISHCHUK, V.**, 2023. Numerical Analysis of the Wheel Camber of the Front Axle of a Passenger Car During Cornering. In: Transportation Research Procedia. 74, 379-386.
- [22] DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, KOSTRZEWSKI, M., SEMENOV, S., MIKHAILOV, E., 2023. Passive safety in railway vehicles: a review. In: Transportation Research Procedia. 74, 403-410.

- [23] BLATNICKÝ, M., DIŽO, J., **ISHCHUK, V.**, MELNIK, R., BARTA, D., MIŠÁK, P., 2023. Comparison of driving stability of three-wheeled vehicles with an electric powertrain while driving in a curve. In: Transportation Research Procedia. 74, 672-679.
- [24] DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, KOZIAK, S., MOLNÁR, D., ŠALANTAY, P., 2023. Multibody simulations in analyses of the vehicles' dynamics. In: Transportation Research Procedia. 74, 664-671.
- [25] **ISHCHUK, V.**, DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., MOLNÁR, D., SOLČANSKÝ, S., 2023. Výpočty a simulácie viazaných mechanických sústav koľajových vozidiel s poddajným telesom. In: Súčasné problémy v koľajových vozidlách: zborník prednášok. 1. vyd. Žilina: Vedeckotechnická spoločnosť pri Žilinskej univerzite, 193-201.
- [26] DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, LOVSKA, A., KRAVCHENKO, O., 2023. Derivation of a simplified mathematical model of a rail vehicle powertrain with a hydrodynamic converter. In: Súčasné problémy v koľajových vozidlách: zborník prednášok. 1. vyd. Žilina: Vedeckotechnická spoločnosť pri Žilinskej univerzite, 91-99.
- [27] DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, MOLNÁR, D., SEMENOV, S., MIKHAILOV, E., 2023. The NVH analysis in rail vehicles: a literature review. In: Súčasné problémy v koľajových vozidlách: zborník prednášok. 1. vyd. Žilina: Vedeckotechnická spoločnosť pri Žilinskej univerzite, 81-89.
- [28] **ISHCHUK, V.**, DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., LOVSKA, A., MOLNÁR, D., 2024. A Steam Locomotive Miniature Model Design. In: LOGI - Scientific Journal on Transport and Logistics. 15(1), 61-72.
- [29] DIŽO, J., LOVSKA, A., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, MOLNÁR, D., 2024. Derivation of mathematical model of mechanism for drive of transport means additional device. In: Engineering for Rural Development. 23, 636-643.
- [30] KLIUJEV, S., SEMENOV, S., MIKHAILOV, E., DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, 2024. Increasing the traffic safety level of rolling stock by wheel condition monitoring using an automated measuring complex. In: Communications - Scientific Letters of the University of Žilina. 26(3), B167-B174.
- [31] **ISHCHUK, V.**, DIŽO, J., LOVSKA, A., BLATNICKÝ, M., 2024. Assessment of Dynamic Properties of Two Different Designs of Freight Wagon Bogies. In: Transport Means - Proceedings of the International Conference. 36-40.
- [32] DIŽO, J., LOVSKA, A., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, 2024. A Mathematical Model of a Passenger Rail Vehicle While Vertical Oscillation. In: Transport Means - Proceedings of the International Conference. 212-218.
- [33] BLATNICKÝ, M., DIŽO, J., LOVSKA, A., **ISHCHUK, V.**, 2024. Design of hydraulic lift system of technical equipment working in amusement industry. In: Acta Technica Jaurinensis. 17(4), 169-176.
- [34] LOVSKA, A., **ISHCHUK, V.**, DIŽO, J., BLATNICKÝ, M., 2025. Analysis of Running Properties of a Rail Multiple-Unit with a Diesel and a Hydrogen Powertrain. In: Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. F230, 527-536.

[35] **ISHCHUK, V.**, BLATNICKÝ, M., MOLNÁR, D., DIŽO, J., ČIERŇAVA, D., 2025. Dimensional Calculation of the Main Beam of a Technical Equipment Intended for the Amusement Industry. In: Mechanisms and Machine Science. 174, 68-80.

[36] LOVSKA, A., SOLČANSKÝ, S., **ISHCHUK, V.**, DIŽO, J., 2025. Investigation of the Freight Wagon Dynamics Under Specific Operational Conditions. In: Mechanisms and Machine Science. 174, 625-634.

[37] MOLNÁR, D., BLATNICKÝ, M., **ISHCHUK, V.**, ČIERŇAVA, D., 2025. Design of a Drive Unit for Technical Equipment Working in the Amusement Industry. In: Mechanisms and Machine Science. 174, 17-28.

Úžitkové vzory

[38] Kryška ľuka pivvahona [Klapka vysokostenného vozňa] = u202401153 [157733, 21.11.2024] / Žilinská univerzita v Žiline [Prihlasovateľ] ; Gerlici, J., Lovska, A., Dižo, J., Kravchenko, O., Šťastniak, P., Harušinec, J., Suchánek, A., Brezáni, M., **Ishchuk, V.**, Kozáková, K.. – Kyjev (Ukrajina) : Ministerstvo rozvitku ekonomiki, torgivli ta sil's'kogo gospodarstva Ukraïni. Ukrajinskyj instytut promyslovoi vlasnosti.

[39] Univerzálny pivvahon [Univerzálny vysokostenný vozeň] = u202402476 [158655, 06.03.2025] / Žilinská univerzita v Žiline [Prihlasovateľ] ; Gerlici, J., Lovska, A., Dižo, J., Kravchenko, O., Šťastniak, P., Harušinec, J., Suchánek, A., Brezáni, M., **Ishchuk, V.**, Kozáková, K.. – Kyjev (Ukrajina) : Ministerstvo rozvitku ekonomiki, torgivli ta sil's'kogo gospodarstva Ukraïni. Ukrajinskyj instytut promyslovoi vlasnosti.

[40] Pasažyrskyj vahon z posylenoju ramoju [Osobný vozeň so zosilneným rámom] = u202401161 [157336, 03.10.2024] / Žilinská univerzita v Žiline [Prihlasovateľ] ; Gerlici, J., Lovska, A., Dižo, J., Kravchenko, O., Šťastniak, P., Harušinec, J., Suchánek, A., Brezáni, M., **Ishchuk, V.**, Kozáková, K.. – Kyjev (Ukrajina) : Ministerstvo rozvitku ekonomiki, torgivli ta sil's'kogo gospodarstva Ukraïni. Ukrajinskyj instytut promyslovoi vlasnosti.

[41] Modulna vantažna odynycia dľa perevezeň dovhomirnych vantaživ [Modulárna nákladná jednotka na prepravu dlhého tovaru] = u202402477 [158656, 06.03.2025] / Žilinská univerzita v Žiline [Prihlasovateľ] ; Gerlici, J., Lovska, A., Dižo, J., Kravchenko, O., Šťastniak, P., Harušinec, J., Suchánek, A., Brezáni, M., **Ishchuk, V.**, Kozáková, K.. – Kyjev (Ukrajina) : Ministerstvo rozvitku ekonomiki, torgivli ta sil's'kogo gospodarstva Ukraïni. Ukrajinskyj instytut promyslovoi vlasnosti.