
Analýza jazdných vlastností modifikovaného vozidla a jeho komponentov v dôsledku zmeny pohonného ústrojenstva a ovplyvnenie vzájomného pôsobenia kontaktu koleso/koľajnica

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2560

Vadym Ishchuk, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: vadym.ishchuk@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2563

Alyona Lovska, prof. Ing., Dr.Sc. Tech.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: alyona.lovska@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2660

Miroslav Blatnický, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: miroslav.blatnicky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2569

Sebastián Solčanský, Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: sebastian.solcansky@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2563

Analysis of the running properties of the modified vehicle and its components as a result of the change in the powertrain and the influence of the wheel/rail contact interaction

Abstract: The presented article is focused on analysis of running properties of a modified railway vehicle and its components due to a change of the powertrain and influence of the mutual effects in a wheel/rail contact. The modification of a vehicle consists in a change of a standard diesel-electric powertrain by a new powertrain, which includes as a source of power the hydrogen fuel cells. This modification represents a quite significant modification of a vehicle structure, mainly a change of mass and position of centre of gravity individual articles of a vehicle. The analysis of running properties is performed by means of simulation computations in a commercial simulation software *Simpack*. Simulation model of a vehicle is called as a multibody model. This model consists of rigid bodies, which are connected by flexible modelling elements. Simulation analyses are performed for an original vehicle and for vehicle with hydrogen fuel cells. There are analysed cases of running on two types of tracks. There is found out based on the obtained results, that the modified vehicle with the hydrogen cells has similar force distribution in a wheel/rail contact, however, the axle load of the modified vehicle does not meet required criteria.

Keywords: railway vehicle, wheel/rail contact, running properties, powertrain.

ÚVOD

Súčasnú environmentálnu požiadavku na znižovanie emisií dopravných prostriedkov tlačia výrobcovia dopravných prostriedkov do hľadania nových inovátnych technických riešení, ktoré budú významnou mierou znižovať produkciu škodlivých emisií počas prevádzky. Tieto smery sa týkajú aj železničnej dopravy. Efektívnym spôsobom je elektrifikácia železničných tratí. Sú však miesta, kde elektrifikácia železničnej trate nie je možná alebo nie je efektívna, preto sa v týchto územiach využívajú koľajové vozidlá nezávislej trakcie. Ide o koľajové vozidlá, ktoré sú buď tvorené lokomotívou s dieselovým motorom ťahajúcej vagóny alebo ide o ucelené vlakové jednotky. Druhý typ koľajových vozidiel je v súčasnosti oveľa viac využívaný, keďže poskytuje viaceré výhody. Aj tieto jednotky sú poháňané dieselovým motorom, ktorý produkuje počas svojej prevádzky nežiaduce plynné emisie, vrátane CO_2 .

V súčasnosti existuje niekoľko spôsobov, ako znížiť produkciu nežiaducich plynných emisií. Sú také, ktoré zahŕňajú používanie akumulátorov, ktoré ale neposkytujú dostatočný dojazd takéhoto koľajového vozidla. Modernejším a aktuálnym spôsobom a cestou znižovania produkcie škodlivých emisií je použitie vodíkových palivových článkov ako zdroja energie na pohon koľajového vozidla.

Druh pohonu vlakovej jednotky založený na inštalácii vodíkových palivových článkov je aj predmetom prezentovaného výskumu. Ide o diesel-elektrickú vlakovú jednotku r. 861 vyrábanú spoločnosťou *ŽOS Vrútky, a.s.* (obr. 1). Táto jednotka je pôvodne poháňaná diesel-elektrickou pohonnou sústavou. Modifikovaná jednotka zahŕňa inštaláciu novej, modernej a ekologickej hnacej sústavy, ktorá využíva vodíkové palivové články.



Obr. 1. Ilustrácia vlakovej jednotky r. 861

Takáto úprava vlakovej jednotky však vyžaduje pomerne výrazný zásah do jej konštrukcie. Ide o výmenu, resp. odstránenie nepotrebných komponentov pôvodného diesel-elektrického pohonu a inštaláciu komponentov nových, potrebných pre správnu a bezchybnú prevádzku jednotky na poháňanú vodíkovými palivovými článkami.

Keďže komponenty jednotky (pôvodnej aj novej) majú pomerne vysokú hmotnosť a sú umiestnené v takých miestach, kde sa predpokladá ich významný vplyv na jazdné vlastnosti jednotky, je potrebné vykonať nevyhnutné analýzy, ktoré umožňujú predikovať jazdné vlastnosti jednotky, ako aj ovplyvnenie vzájomného pôsobenia kontaktu koleso koľajnica.

1 SIMULAČNÝ MBS MODEL VOZIDLA (VLAKOVEJ JEDNOTKY)

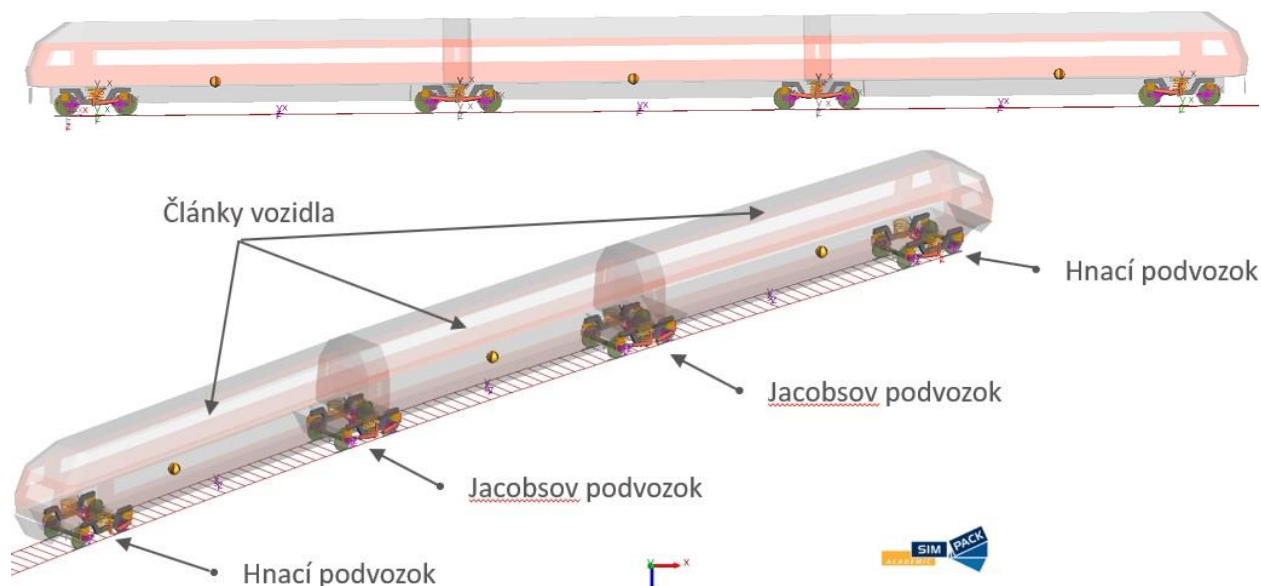
Analýzy jazdných vlastností modifikovaného koľajového vozidla a jeho komponentov v dôsledku zmeny pohonného ústrojenstva a ovplyvnenie vzájomného pôsobenia kontaktu koleso koľajnica boli vykonané s prostredím komerčného programu *Simpack*, konkrétne v jeho špecializovanom výpočtovom module určenom pre koľajové vozidlá, ktorý sa nazýva *Simpack/Rail*. Ide o moderný výpočtový softvér, ktorý nachádza široké využitie pri analyzovaní a posudzovaní vlastností rôznych druhov mechanických sústav. Pokiaľ ide o modul *Simpack/Rail*, tento obsahuje špecializované modelovacie prvky, ktoré umožňujú vytvorenie modelu vlakovej jednotky ako celku. Ide hlavne o prvky skriň jednotlivých článkov jednotky, prvky podvozkov a tiež veľmi dôležitý modelovací prvok, a to model kontaktu koleso koľajnica. Bližší opis vytvoreného modelu koľajovej jednotky r. 861 je uvedený v nasledujúcej kapitole.

1.1 MBS model vlakovej jednotky r. 861 v programe *Simpack*

Hierarchia modelu vlakovej jednotky r. 861 v programe *Simpack/Rail* má určité špecifiká, ktoré umožňujú realistické simulačné analýzy tejto vlakovej jednotky pri rôznych jazdných podmienkach. Pre simulačný model v programe *Simpack/Rail* sa používa skratka *MBS* model, čo znamená multibody model.

MBS model jednotky zohľadňuje všetky komponenty, ktoré významnou mierou ovplyvňujú dynamické vlastnosti jednotky počas jazdy. Je to trojčlánkové vozidlo so štyrmi podvozkami. Teda, *MBS* model pozostáva z týchto hlavných telies: skrine jednotlivých článkov (tri skrine - tri tuhé telesá), rámy podvozkov - štyri tuhé telesá, ložiskové skrine - 16 tuých telies, dvojkolesia - 8 tuých telies. Okrem týchto telies model zahŕňa aj ďalšie potrebné komponenty, ktoré sú nevyhnutné pre úplnosť modelu.

Čo sa týka ďalších komponentov, tie berú do úvahy skutočné realistické vyhotovenie vozidla. Vozidlo je vybavené dvomi podvozkami, ktoré nesú koncové články (čelné články) vozidla a ďalej dvomi podvozkami typu *Jacobs*. Tieto podvozky typu *Jacobs* sú charakteristické tým, že na jednom podvozku spočívajú vždy dva konce prilahlých článkov. Teda, v tomto konkrétnom prípade, na jednom podvozku typu *Jacobs* je nesený jeden koniec čelného článku a jeden koniec vloženého článku. Analogicky, na druhom podvozku typu *Jacobs* spočíva jeden koniec vloženého článku a jeden koniec čelného článku.



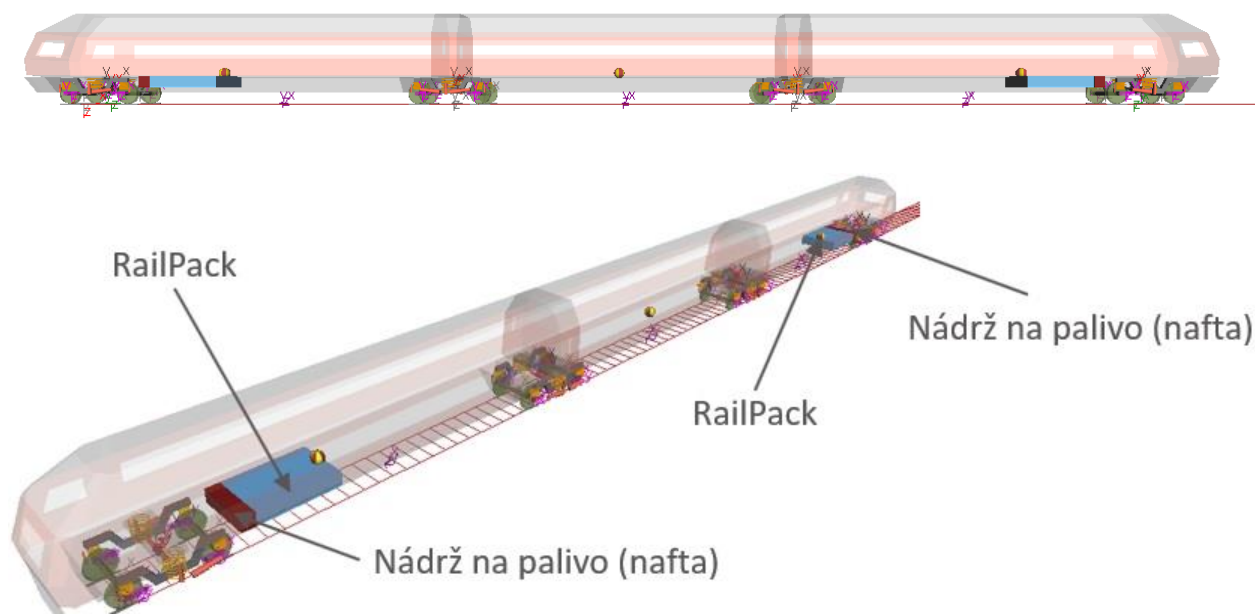
Obr. 2. Pôvodný MBS model vozidla vytvorený v programe Simpack/Rail

Vlaková súprava je vybavená dvojstupňovým vypružením, ktoré zabezpečuje dostatočné pohodlie pre cestujúcich a zároveň zaručuje vhodné chodové vlastnosti v koľaji. Primárne vypruženie je tvorené oceľovými pružinami v kombinácii s hydraulickými tlmičmi. Sekundárne vypruženie má zložitejšiu konštrukciu, keďže je tvorené vzduchovými pružiacimi prvkami a kombinuje aj ďalšie prvky vypruženia. Východzí model vlakovej jednotky vytvorenej v programe Simpack/Rail je zobrazený na obr. 2.

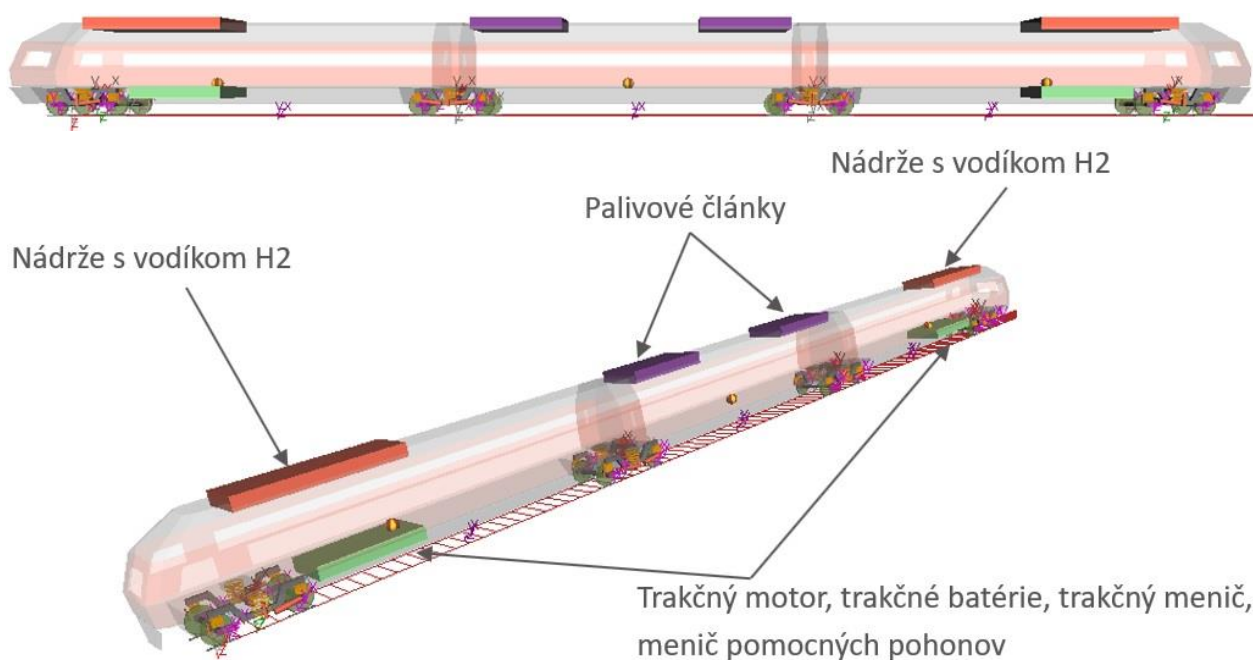
Tento východzí model je model, ktorom sú zatiaľ preddefinované prednastavené hmotnostné a zotrvačné parametre jednotlivých telies vozidla. Tieto parametre sú potom upravené, resp. predpísané

na základe reálnych hodnôt daných výrobcou vozidla. Ide najmä o definovanie hmotností a momentov zotrvačnosti pre telesá, ako sú skrine článkov, rámov podvozkov, dvojkolesí a podobne. Ďalej sú definované polohy ťažísk pre komponenty pohonu, a to jednak pre pôvodný pohon tvorený diesel-elektrickým hnacím systémom, ako aj pre nový pohonný systém zahŕňajúci implementáciu vodíkových palivových článkov a potrebných prídavných komponentov.

Ako druhý krok bol východzí model jednotky upravený tak, aby zodpovedal jednotke s pôvodnou pohonnou sústavou, ktorá zahŕňala naftový motor a ďalšie potrebné komponenty. Tieto boli zakomponované v tzv. RailPack jednotke (obr. 3).



Obr. 3. MBS model vozidla s pôvodnou pohonnou sústavou vytvorený v programe Simpack/Rail



Obr. 4. MBS model vozidla s pohonnou sústavou s vodíkovými palivovými článkami vytvorený v programe Simpack/Rail

Tretí model vlakovej jednotky vychádzal z pôvodného modelu (obr. 2), pričom boli definované komponenty zodpovedajúce rozloženiu komponentov vlakovej jednotky s vodíkovým pohonom. Obrázok 4 zobrazuje MBS model vlakovej jednotky vytvorený v programe Simpack/Rail, ktorý zodpovedná rozloženiu komponentov s vodíkovým pohonom.

Po vytvorení MBS modelov vlakových jednotiek s pôvodným dieselovým pohonom a novým pohonom na vodíkové palivové články boli definované ďalšie nevyhnutné vstupné parametre pre vykonanie simulačných výpočtov.

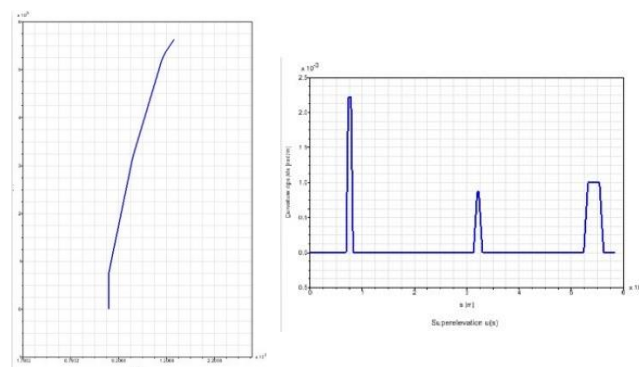
Ide o vytvorenie vhodného modelu trate, definovanej jazdnej rýchlosti, pri ktorej sa bude jednotka počas analýz pohybovať a tiež určenie sledovaných výstupných veličín.

V prezentovanom výskume sa porovnávajú vlakové jednotky pohybovali po dvoch železničných tratiach, konkrétne išlo o tieto úseky tratí: Jelšovce - Koniarovce a úsek trate Prievidza - Chrenovec. So zvolenými úsekmi tratí súvisí aj definovaná rýchlosť jazdy vlakových jednotiek. Na trati Jelšovce - Koniarovce bola definovaná rýchlosť jazdy 100 km·h⁻¹ a na trati Prievidza - Chrenovec to bola rýchlosť jazdy 50 km·h⁻¹. Tieto dva úseky boli vhodne zvolené aj preto, že bolo možné skúmať jazdné vlastnosti modifikovaného vozidla pri vyššej aj nižšej rýchlosti a zároveň jazdu v menších oblúkoch trate (úsek trate Prievidza - Chrenovec) a tiež pri vyšších rýchlostiach a v oblúkoch s menšími polomermi (úsek trate Jelšovce - Koniarovce).

Ako výstupné veličiny ilustrujúce ovplyvnenie vzájomného pôsobenia kontaktu koleso/koľajnica boli vybrané tri výstupy, a to zvislá kolesová sila Q ,

vodiaca sila Y a pomer zvislej kolesovej sily Q a vodiacej sily Y nazývanej bezpečnosť proti vykoľajeniu Y/Q .

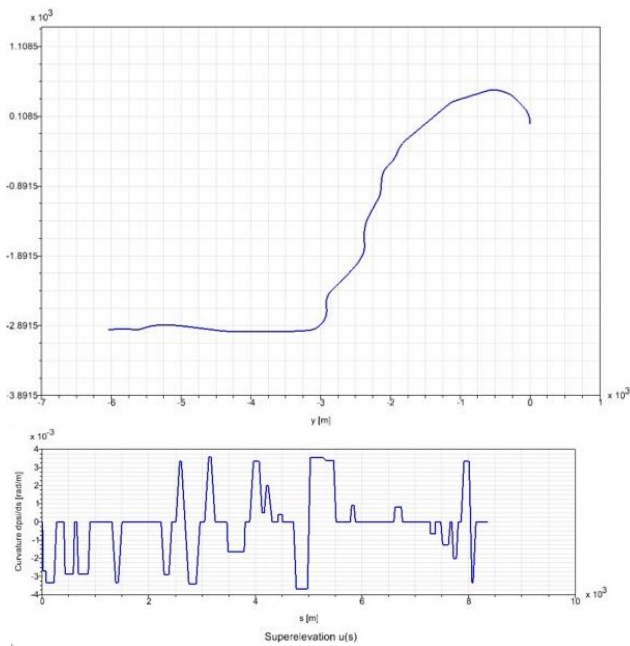
Na obr. 5 vľavo je zobrazené trasovanie železničnej trate Jelšovce - Koniarovce v horizontálnej rovine spolu so zobrazením polomerov krivosti oblúkov (obr. 5 vpravo).



Obr. 5. Horizontálne trasovanie trate Jelšovce - Koniarovce (vľavo) a krivosti oblúkov (vpravo)

Tu je možné vidieť, že táto trať má malý počet oblúkov a veľkým polomerom, preto je možné touto traťou prechádzať vyššou rýchlosťou. Ako bolo spomenuté vyššie, je to rýchlosť 100 km·h⁻¹.

Na druhej strane, je to úsek železničnej trate medzi mestom Prievidza a Chrenovec, ktorá má oveľa väčší počet oblúkov, pričom tieto oblúky sú pravotočivé aj ľavotočivé a majú rôzne polomery. Rýchlosť pohybu vozidla počas simulácií tu bola nižšia, a to 50 km·h⁻¹, pretože vyššia rýchlosť by znamenala ohrozenie bezpečnosti jazdy z hľadiska vykoľajenia vozidiel, ktoré na tejto trati premávajú. Horizontálne trasovanie trate a krivosti oblúkov sú znázornené na obr. 6.



Obr. 6. Horizontálne trasovanie trate Prievidza - Chrenovec (hore) a krivosti oblúkov (dole)

2 VÝSLEDKY SIMULAČNÝCH VÝPOČTOV

V tejto časti príspevku sú prezentované výsledky simulačných analýz jazdy vozidla pri podmienkach opísaných v predchádzajúcich kapitolách, t. j. na uvedených tratiach (obr. 5 a obr. 6), pri uvedených

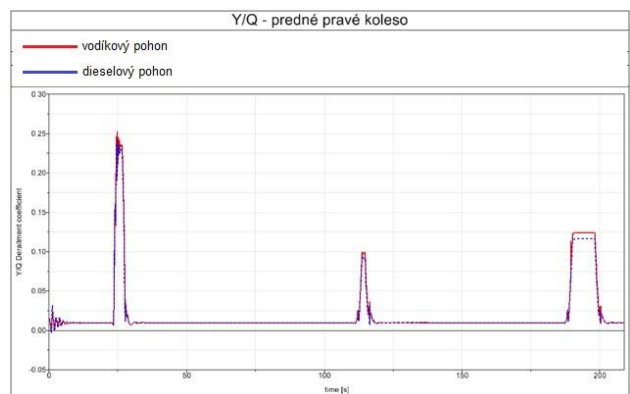
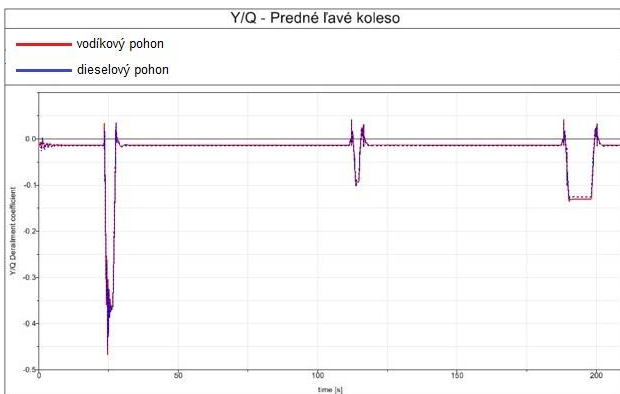
jazdných rýchlostiach a pri uvedených rozložených hmotnostiach pre dieselový pohon a vodíkový pohon (obr. 3 a obr. 4).

Ako výstupné pozorované veličiny sú zvolené silové pomery v kontakte koleso/koľajnica ako reprezentatívny výstup pre vyhodnotenie jazdných vlastností vozidla. Ide o vyhodnotenie bezpečnosti proti vykoľajeniu Y/Q , vodiacich síl Y a zvislých kolesových síl Q . Výstupy sú zobrazené pre prvé dvojkolesie pre obidve kolesá, teda pre ľavé koleso prvého dvojkolesia a pre pravé koleso prvého dvojkolesia.

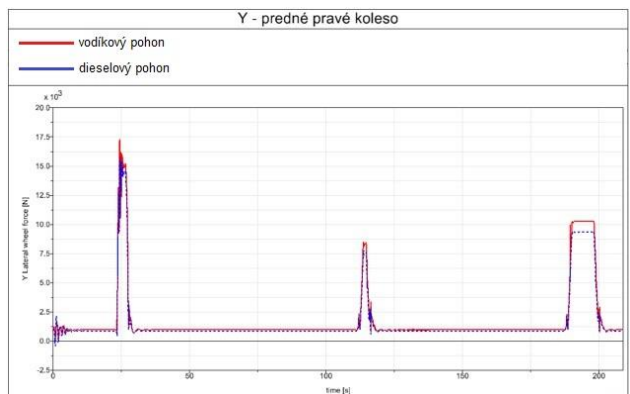
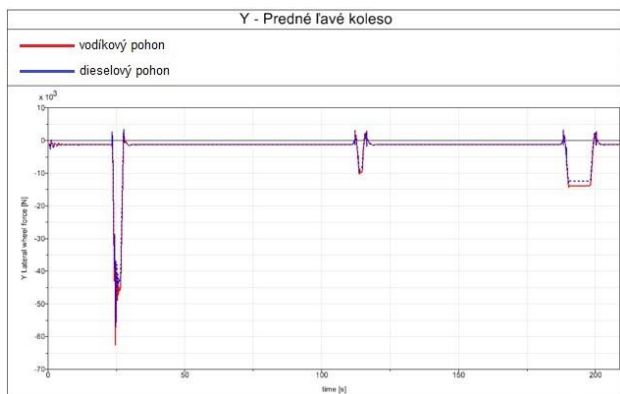
Porovnávané sú výstupy pre vozidlo s pôvodným dieselovým pohonom - modré krivky a pre vozidlo s novým vodíkovým pohonom - červené krivky.

Najskôr sú uvedené výstupné priebehy pre trať Jelšovce - Koniarovce, teda pre rýchlosť jazdy 100 km·h⁻¹.

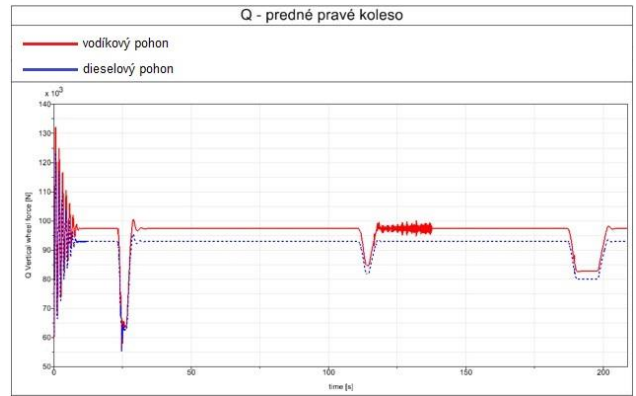
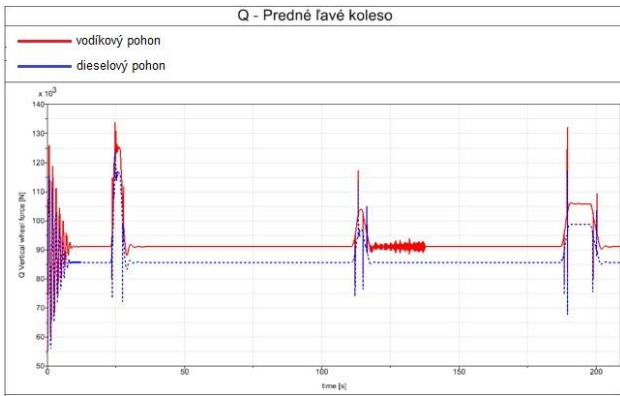
Ako prvý výstup zo simulačných výpočtov môžeme vidieť na obr.7 priebehy bezpečnosti proti vykoľajeniu. Z výsledkov môžeme vidieť, že obidva druhy pohonom vozidla dosahujú na danej trati v princípe zhodné hodnoty bezpečnosti proti vykoľajeniu, pričom na ľavom kolese prvého dvojkolesia sú dosiahnuté vyššie hodnoty, a to konkrétne v prvom oblúku. V žiadnom pozorovanom úseku neboli prekročené maximálne dovolené hodnoty ani pre dieselový a ani pre vodíkový pohon.



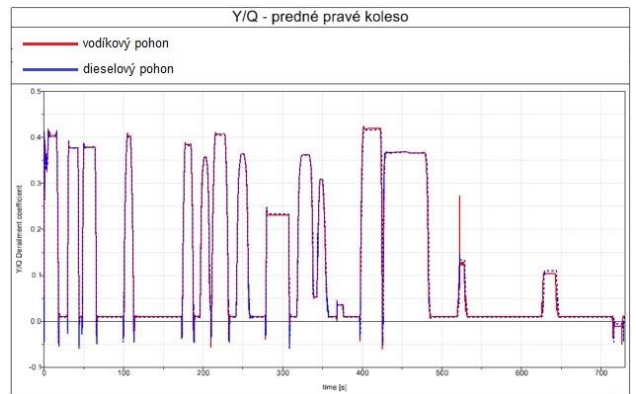
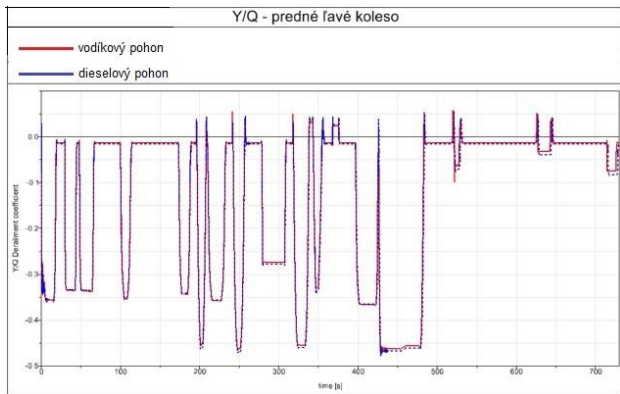
Obr. 7. Priebeh bezpečnosti proti vykoľajeniu Y/Q , trať Jelšovce - Koniarovce, rýchlosť jazdy 100 km·h⁻¹



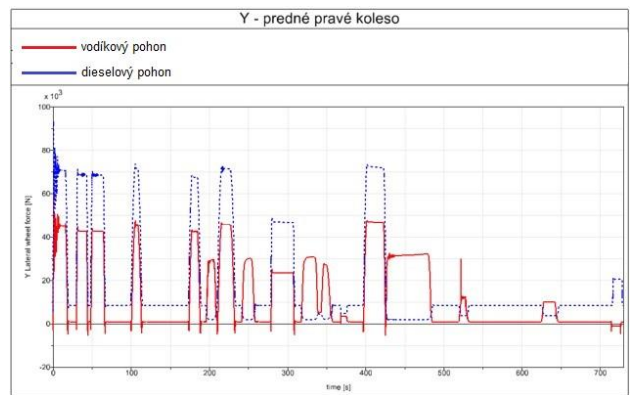
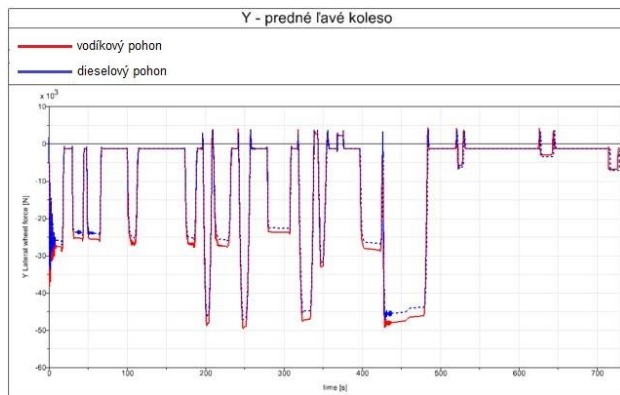
Obr. 8. Priebeh vodiacich síl Y , trať Jelšovce - Koniarovce, rýchlosť jazdy 100 km·h⁻¹



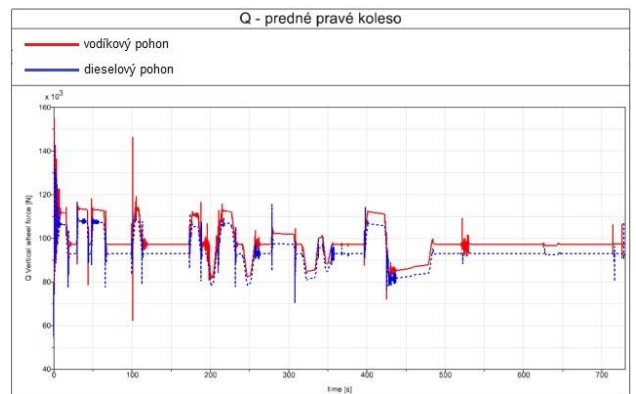
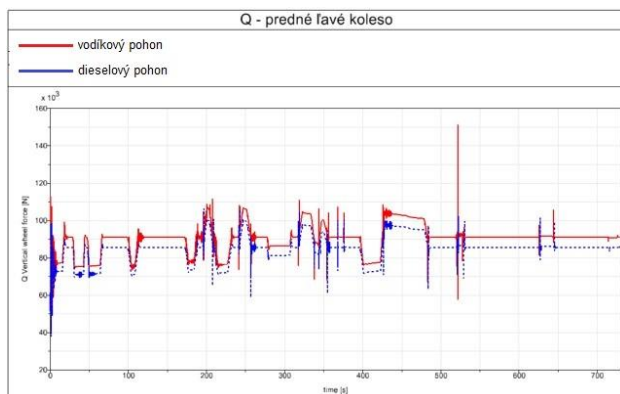
Obr. 9. Priebeh kolesových síl Q , trať *Jelšovce - Koniarovce*, rýchlosť jazdy $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$



Obr. 10. Priebeh bezpečnosti proti vykoľajeniu Y/Q , trať *Prievidza - Chrenovec*, rýchlosť jazdy $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$



Obr. 11. Priebeh vodiacich síl Y , trať *Prievidza - Chrenovec*, rýchlosť jazdy $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$



Obr. 12. Priebeh kolesových síl Q , trať *Prievidza - Chrenovec*, rýchlosť jazdy $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$

Z obr. 8 môžeme vidieť priebehy vodiacich síl Y pre trať *Jelšovce - Koniarovce*. Je zrejmé, že pri nábehu do oblúka dochádza k nárastu vodiacich síl Y . Ak však porovnáme priebehy vodiacich síl pre dieselový pohon a vodíkový pohon, tiež nedochádza k radikálnym rozdielom v rozložení týchto síl.

Iná situácia ale nastáva, ak porovnáme priebehy zvislých kolesových síl Q . V oblúkoch tiež narastajú hodnoty týchto síl, keďže vplyvom odstredivých účinkov dochádza k priradeniu vonkajšieho kolesa a k odľahčeniu vnútorného kolesa. V prípade vodíkoveho pohonu (modrý krivka) navyše ide o zvýšené nápravové zaťaženie, ktoré má nepriaznivý vplyv na jazdné vlastnosti vozidla.

Ďalej sú uvedené výsledky simulačných výpočtov pre trať *Prievidza - Chrenovec* a pre rýchlosť jazdy $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Tiež sú tu zobrazené výstupné veličiny bezpečnosť proti vykoľajeniu Y/Q (obr. 10), vodiace sily Y (obr. 11) a zvislé kolesové sily Q (obr. 12) pre *dieselový pohon* vozidla (modré krivky) a pre *vodíkový pohon* vozidla (červené krivky).

Ako je možné vidieť z obr. 10, hodnoty bezpečnosti proti vykoľajeniu opäť narastajú pri jazde vozidla v oblúkoch trate. Napriek menším polomerom oblúkov na trati nenastáva výrazné zvýšenie týchto hodnôt v porovnaní s prípadom jazdy na trati *Jelšovce - Koniarovce*. Hodnoty bezpečnosti proti vykoľajeniu na tejto trati sú tiež do 0,5, čo nepredstavuje ohrozenie bezpečnosti jazdy z hľadiska vykoľajenia.

Obrázok 11 zobrazuje priebehy vodiacich síl Y v kontakte koleso/koľajnica pre dieselový a vodíkový pohon tiež pre túto istú trať a rýchlosť jazdy. Tieto priebehy ukazujú, že najvyššie hodnoty vodiacich síl na ľavom kolese sa dosahujú pre vozidlo s vodíkovým pohonom a na pravom kolese pre vozidlo s dieselovým pohonom. Tieto priebehy tiež korešpondujú s priebehmi koeficientu bezpečnosti proti vykoľajeniu Y/Q (obr. 11).

Najdôležitejšie z hľadiska posúdenia vhodnosti pohonu vlakovkej jednotky prostredníctvom vodíkových palivových článkov je vyhodnotenie priebehov zvislých kolesových síl Q . Ako je možné vidieť na grafoch pre ľavé a pravé koleso na nabiehajúcom dvojkolesí, vozidlo s vodíkovým pohonom má vyššie nápravové zaťaženie ako vozidlo s pôvodným dieselovým pohonom (obr. 12). Pri jazde v oblúkoch trate na úseku *Jelšovce - Koniarovce* pri rýchlosti $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ dochádza v oblúkoch k nárastu kolesových síl Q . V priamych úsekoch trate (horizontálne časti grafov) je možné pozorovať zvýšené zaťaženie v kontakte koleso/koľajnica v neprospech pre vodíkový pohon.

Najdôležitejším zistením je fakt, že pri vodíkovom pohone je prekročené maximálne dovolené zaťaženie na nápravu.

Vozidlo má dovolené maximálne nápravové zaťaženie 18,5 t (181,49 kN), čo je 18 500 t (181 490 N) na nápravu. V prípade rovnomerného rozloženia hmotnosti vychádza maximálne zaťaženie na koleso tohto dvojkolesia 9,25 t (90,743 kN), čo zodpovedá 9 250 t (90 743 N). Z vypočítaných grafov simulačných výpočtov je ale zrejmé, že pre vodíkový pohon bola dosiahnuté zaťaženie 9,80 t (96,138 kN), teda 19,6 t (192,276 N). Takéto zaťaženie jedného dvojkolesia nie je prípustné.

Ako hlavné zhodnotenie výsledkov simulačných výpočtov je možné vyjadriť, že komponenty vodíkoveho pohonu vozidla majú príliš vysokú hmotnosť a ich navrhované rozloženie nevhodne vplýva na nápravové zaťaženie upravovaného vozidla. Pre je odporúčané prehodnotiť inštaláciu komponentov vodíkoveho pohonu do súčasnej konštrukcie vozidla r. 861. Je nevyhnutné použiť také komponenty a prispôsobiť ich rozloženie v jednotlivých článkoch vozidla tak, aby z hľadiska zaťaženia vozidla a vzájomného pôsobenia v kontakte koleso/koľajnica boli akceptovateľné pre jeho prevádzku spĺňajúcu podmienku maximálneho nápravového zaťaženia 18,5 t (181,49 N).

ZÁVER

Prezentovaný článok bol orientovaný na analýzu jazdných vlastností modifikovaného vozidla a jeho komponentov v dôsledku zmeny pohonného ústrojenstva a ovplyvnenie vzájomného pôsobenia kontaktu koleso/koľajnica. Vytvorené boli MBS virtuálne modely koľajového vozidla r. 861, pričom jedna verzia modelu obsahovala dieselový pohon a druhá verzia vozidla obsahovala vodíkový pohon. Z vyhodnotených simulačných výpočtov sa zistilo, že vodíkový pohon nepriaznivo ovplyvňuje nápravové zaťaženie vozidla (vysoké nápravové zaťaženie), preto sa odporúča prehodnotiť inštaláciu vodíkoveho pohonu a jeho komponentov do vozidla r. 861 so súčasnou konštrukciou.

Pod'akovanie

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: *Koncepcia, bezpečnosť a súvisiaci priemyselný výskum náhrady dieselového pohonu za pohon s vodíkovým palivovým článkom v diesel motorových jednotkách radu 861 (kód projektu v ITMS2014+: 313011BVC2), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.*“

LITERATÚRA

[1] GERLICI, J. - LACK, T. (2004): *Kontakt železničného dvojkolesia a koľaje*. 1. vyd. - V Žiline : Žilinská univerzita, 2004, 200 s., ISBN 80-8070-317-5.