

**AKADEMICKÁ LICENCE PROGRAMŮ VYTVOŘENÝCH NA DOPRAVNÍ FAKULTĚ
JANA PERNERA PRO VYUŽITÍ V OBLASTI VÝUKY KOLEJOVÝCH VOZIDEL**

**ACADEMIC LICENCE OF SOFTWARE TOOLS CREATED FOR EDUCATION IN
THE FIELD OF RAILWAY VEHICLES AT THE UNIVERSITY OF PARDUBICE**

Tomáš MICHÁLEK¹, Jaromír ZELENKA², Zdeněk FIŠR³

Abstrakt

Příspěvek představuje dva konkrétní softwarové nástroje, které byly vytvořeny na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice jako akademické licence pro využití zejména ve výuce v oblasti kolejových vozidel. Prvním nástrojem je software „SJKV-V4N v. 1.0“, který vznikl v roce 2018 v rámci řešení projektu TA ČR „Centrum kompetence drážních vozidel“. Jedná se o jednu z mnoha verzí programového systému SJKV (*Simulace jízdy kolejového vozidla*), která byla doplněna o uživatelské rozhraní a která je nyní dostupná pro nekomerční využití i studentům. Jde o program pro multi-body simulace jízdy kolejového vozidla, přičemž je v dané verzi možné simulovat jízdu několika předdefinovaných koncepcí čtyřnápravových vozidel za určitých podmínek. Druhým nástrojem je software „RailCalc 2.0“, což je upravená verze programu, který byl vytvořen na DFJP v rámci řešení bakalářské práce v roce 2020. Jde o program pro realizaci trakčních výpočtů, který umožňuje provádět výpočty jízdních dob a spotřeby trakční energie zadaných vlakových souprav v definovaných traťových úsecích.

Klíčová slova

kolejová vozidla, multi-body simulace, trakční výpočty, software, SJKV, RailCalc

Abstract

A couple of software tools for use in the educational process in the field of railway vehicles are presented in this paper. Both of them were created as an academic licence at the Faculty of Transport Engineering of the University of Pardubice (Czech Republic). In the first case, the simulation tool “SJKV-V4N v. 1.0” was created in framework of the project “Competence Center of Railway Vehicles” of the Technology Agency of the Czech Republic in 2018. This software represents a particular version of the multi-body simulation tool “SJKV”, which was supplemented with a user interface, and nowadays it is available for non-commercial use by the students and academic staff for free. It is intended for realization of multi-body simulations of three pre-defined design concepts of four-axle railway vehicles under certain conditions. The second software tool – named as “RailCalc 2.0” – is intended for traction calculations, i.e., for the calculations of running times and energy consumption of defined trains on defined railway lines. This software represents a modified version of the program “RailCalc” created in framework of a bachelor thesis at the Faculty of Transport Engineering in 2020.

Keywords

railway vehicles, multi-body simulation, traction calculation, software, SJKV, RailCalc

¹ Ing. Tomáš Michálek, Ph.D., University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering. Dislokované pracoviště DFJP, Nádražní 547, 560 02 Česká Třebová. Tel.: +420 466 037 428, e-mail: tomas.michalek@upce.cz

² doc. Ing. Jaromír Zelenka, CSc., University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering. Dislokované pracoviště DFJP, Nádražní 547, 560 02 Česká Třebová. Tel.: +420 466 037 429, e-mail: jaromir.zelenka@upce.cz

³ Bc. Zdeněk Fišr, University of Pardubice, Faculty of Transport Engineering. Studentská 95, 532 10 Pardubice. E-mail: zdenek.fisr@email.cz

1 ÚVOD

Rozvoj výpočetní techniky v posledních několika desetiletích dospěl do stavu, kdy dnes prakticky všechny oblasti inženýrské činnosti využívají počítačovou podporu. To je aktuálně umocněno trendy digitalizace a automatizace a pochopitelně se to týká i železničního průmyslu a oblasti vývoje, výroby, zkoušení, provozu a údržby kolejových vozidel. Tyto skutečnosti se musí pochopitelně odrážet i ve vzdělávacím procesu, který připravuje budoucí odborníky na působení v technické praxi. Například budoucí projektant či konstruktér kolejového vozidla by se tak měl v průběhu svého studia seznámit mj. s principy tvorby a s využitím 3D CAD modelů, s aplikací metody konečných prvků pro pevnostní výpočty či s multi-body simulacemi pohybu celých mechanických soustav. Nutno však poznamenat, že vysokoškolská výuka v této oblasti by v žádném případě neměla být koncipována jen jako školení k obsluze softwarových produktů, ale měla by studenta vést k pochopení principů příslušných metod a k získání schopnosti analyzovat a efektivně řešit problémy technické praxe. Zároveň je ale zřejmé, že řešení složitějších úloh již obvykle není bez využití vhodného programového vybavení prakticky možné. Kvalitní výuka v příslušných oblastech tak musí být založena na rovnováze mezi teoretickými aspekty problematiky a praktickým přístupem k řešení konkrétních problémů, které zahrnuje právě i zvládnutí numerických metod řešení s využitím vhodných softwarových nástrojů.

V nedávné době byly na Dopravní fakultě Jana Pernera (DFJP) Univerzity Pardubice vyvinuty dva specializované softwarové nástroje, sloužící k technickým výpočtům v oblasti kolejových vozidel. Prvním z nich je programový systém „SJKV-V4N“ verze 1.0, umožňující provádět simulační výpočty jízdy vybraných typů železničních vozidel, a vyšetřovat tak jejich jízdní a vodící vlastnosti; druhým softwarem je program „RailCalc“ verze 2.0, určený pro řešení úloh z oblasti trakční mechaniky. Oba programy jsou tak vhodnými nástroji pro doplnění výuky ve studijních oborech zaměřených právě na provoz a stavbu kolejových vozidel, které jsou na DFJP tradičně pěstovány a v současnosti tvoří dvě ze specializací nového studijního programu „Dopravní technika“. Vzhledem k tomu, že oba zmíněné programy byly vydány v rámci akademické licence pro nekomerční využití, jsou dnes studentům (ale též akademickým pracovníkům) k dispozici zdarma, což umožňuje jejich využití nejen ve výuce, ale například i při zpracování semestrálních či závěrečných prací. Cílem tohoto příspěvku je představení obou programů.

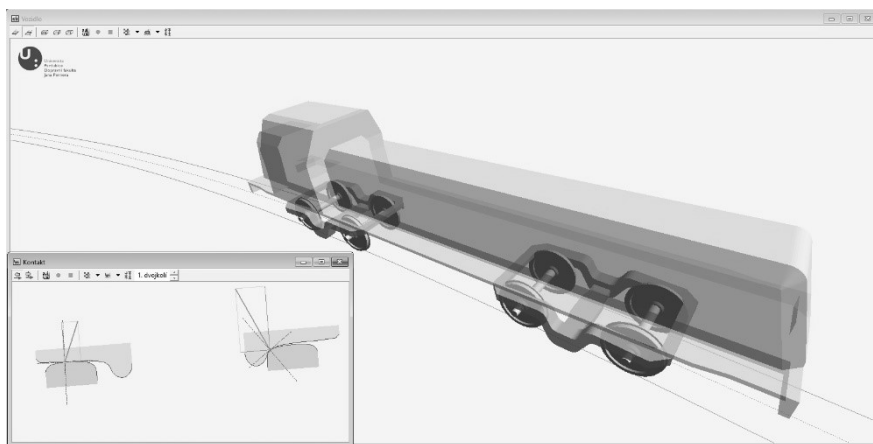
2 PROGRAMOVÝ SYSTÉM SJKV-V4N

2.1 Vývoj programového systému SJKV

Programový systém SJKV (*Simulace jízdy kolejového vozidla*) představuje originální softwarový nástroj pro simulační výpočty jízdních a vodících vlastností kolejových vozidel, který je dlouhodobě vyvíjen na Dislokovaném pracovišti DFJP v České Třebové. Systém SJKV je úzce spjat s výzkumem dynamických vlastností kolejových vozidel a interakce vozidlo–kolej, který je realizován na Oddělení kolejových vozidel Katedry dopravních prostředků a diagnostiky DFJP. Počátky vývoje SJKV sahají do 90. let 20. století a jsou úzce spjaty především se jmény prof. Jiřího Izera a doc. Jaromíra Zelenky.

Programový systém SJKV je založen na programových jednotkách, jež postupně řeší dílčí úlohy simulace jízdy vozidla. Modulární architektura systému tak obecně umožňuje vytvářet různé varianty systému pro konkrétní kolejová vozidla, příp. i jejich soupravy. Jak již bylo zmíněno, systém SJKV je založen na principu multi-body simulací. Dynamický model vozidla a koleje je tudíž tvořen soustavou tuhých těles, vzájemně vázaných pružnými a tlumivými vazbami, v obecném případě s nelineárními charakteristikami. Zvláštní pozornost je věnována vazbě dvojkolí a koleje – pro popis geometrického vztahu dvojkolí a koleje v simulaci slouží předpřipravené charakteristiky kontaktní geometrie dvojkolí–kolej (kontakt kolo–kolejnice je tedy uvažován jako tuhý, jednobodový) a k výpočtu adhezních sil je využíván algoritmus prof. Oldřicha Polácha [1]. Samotné numerické řešení pohybových rovnic je pak realizováno metodou konečných diferencí.

Vývoj systému SJKV probíhá v jazyce Pascal vývojového prostředí Delphi 7. Kromě samotného programu dnes existují i další doplňky, mezi které patří zejména různé specializované moduly (např. modul pro realizaci zkrucovacích zkoušek), účelové programy pro analýzu výsledků nebo program „VIZ“ pro vizualizaci a grafickou prezentaci výsledků simulačních výpočtů (viz [2]). Ukázka grafického výstupu z programu „VIZ“ je znázorněna na obr. 1. S využitím jednotlivých modifikací systému SJKV již byly v minulosti vyšetřovány dynamické vlastnosti celé řady vozidel, např. elektrické jednotky řady 680 „pendolino“, elektrické lokomotivy řady 380, diesel-elektrické lokomotivy řady 744.0, motorové lokomotivy vybavené novými třínápravovými podvozky CZ LOKO, souprav sunutých vozidel (např. řad 971+071+471), různých nákladních a osobních vozů atd. Díky vlastnímu know-how také systém SJKV umožňuje modelovat různá nestandardní řešení (např. nestandardní prvky vypružení, systémy aktivních prvků, mezipodvozkové vazby, semiaktivně řízené tlumiče atd.), čehož se využívá zejména při řešení výzkumných projektů.



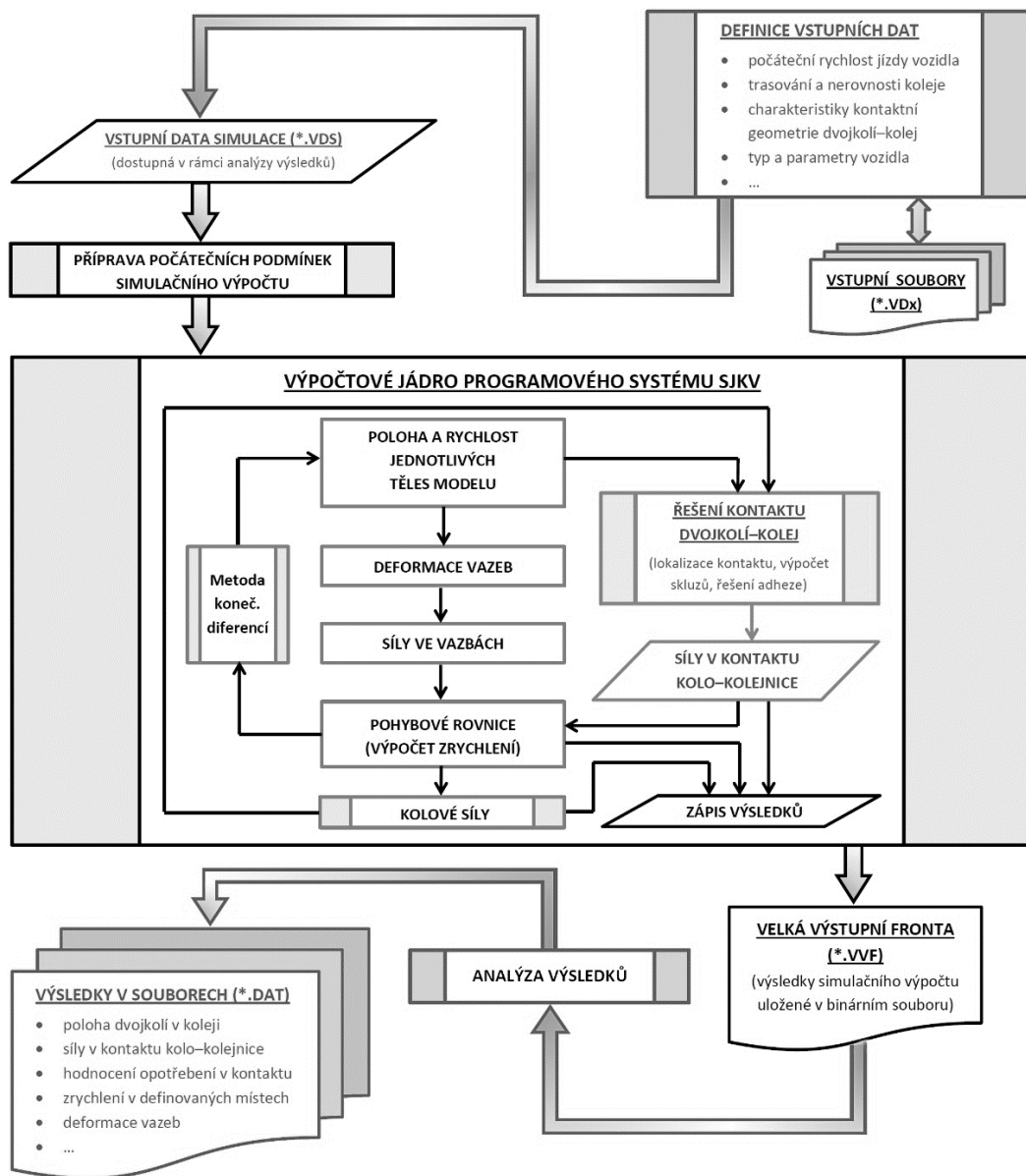
Obr. 1 Ukázka vizualizace výsledků systému SJKV programem VIZ

2.2 Charakteristika programového systému SJKV-V4N

Software SJKV-V4N ve verzi 1.0 je tedy další z variant programového systému SJKV, jež je však v tomto případě určena pro nekomerční využití v rámci akademické licence. Tato verze SJKV vznikla v roce 2018 na DFJP jako jeden z výsledků řešení projektu Technologické agentury České republiky ev. č. TE01020038 *Centrum kompetence drážních vozidel*. Oproti běžným variantám systému SJKV, jež jsou vytvářeny přímo zápisem příslušných algoritmů do jednotlivých programových jednotek ve formě zdrojového kódu, se tato verze odlišuje zejména tím, že obsahuje uživatelské rozhraní, které výrazně usnadňuje práci s tímto simulačním nástrojem. Důsledkem tohoto zjednodušení je však též omezení rozsahu koncepcí vozidel, jejichž dynamické vlastnosti je možné s využitím tohoto softwaru vyšetřovat, a dále i rozsahu podmínek, za kterých lze toto vyšetřování provádět. Programový systém SJKV-V4N je tak určen výhradně pro simulační výpočty jízdy čtyřnápravových železničních vozidel (ostatně: V4N = *vozdilo čtyřnápravové*) následujících tří koncepcí:

- vozidlo s dvoustupňovým vypružením a s dvounápravovými bezkolébkovými podvozky (typicky např. moderní lokomotiva);
- vozidlo s dvoustupňovým vypružením vybavené dvounápravovými podvozky kolébkové koncepce (typicky např. osobní vůz);
- vozidlo s dvounápravovými podvozky s jednostupňovým vypružením, kulovou tornou a vypruženými kluznicemi (typicky např. nákladní vůz).

Každé z těchto vozidel je v modelu reprezentováno soustavou sedmi tuhých těles – čtyři dvojkolí, dva podvozky (resp. rámy podvozků) a skříň vozidla (umožňující modelovat konečnou torzní tuhost). Celkem tak model vozidla vykazuje 42 stupňů volnosti (resp. 43 v případě torzně poddajné skříně).



Obr. 2 Schéma funkce programového systému SJKV

Na obr. 2 je znázorněno schéma funkce programového systému SJKV, jak je nastaveno ve verzi SJKV-V4N. Strukturu programového systému SJKV je možné – podobně jako i u jiných výpočetních softwarů – rozdělit do tří základních bloků:

- definice vstupních dat (*preprocessing*) – na obr. 2 znázorněno v jeho horní části;
- realizace samotné simulace (numerický výpočet) – „výpočtové jádro“ na obr. 2;
- analýza výsledků (*postprocessing*) – na obr. 2 znázorněno v jeho dolní části.

Samotný simulační výpočet (viz „výpočtové jádro“ na obr. 2) spočívá v postupném řešení dílčích úloh simulace v jednotlivých krocích numerického výpočtu – stanovení polohy a rychlosti jednotlivých těles modelu v jednotlivých stupních volnosti, výpočet deformací jednotlivých vazeb a rychlosti těchto deformací, výpočet sil ve vazbách a v kontaktu kolo-kolejnice a výpočet zrychlení jednotlivých těles.

2.3 Práce s programovým systémem SJKV-V4N v. 1.0

Podrobný návod k použití programového systému SJKV-V4N verze 1.0 je spolu s jeho popisem uveden v dokumentaci [3], která je volně dostupná on-line. Zde proto budou uvedeny pouze základní aspekty práce s tímto simulačním nástrojem.

Q42 [kN]:	61.572	Q32 [kN]:	56.809	Q22 [kN]:	53.562	Q12 [kN]:	64.804
Q41 [kN]:	32.412	Q31 [kN]:	38.194	Q21 [kN]:	46.036	Q11 [kN]:	33.593
Yd4 [mm]:	-5.480	Yd3 [mm]:	-6.752	Yd2 [mm]:	-3.570	Yd1 [mm]:	-4.528
Y42 [kN]:	8.300	Y32 [kN]:	20.569	Y22 [kN]:	6.512	Y12 [kN]:	21.019
Y41 [kN]:	2.362	Y31 [kN]:	-9.316	Y21 [kN]:	2.073	Y11 [kN]:	-9.491

Obr. 3 Základní uživatelské rozhraní programového systému SJKV-V4N v. 1.0

Jak již bylo zmíněno výše, tato verze systému SJKV disponuje uživatelským rozhraním. Základní uživatelské rozhraní programu, ze kterého je přístupná jak oblast definice vstupních dat, tak analýza výsledků, a kde také lze při běhu simulace sledovat její průběh, je znázorněno na obr. 3. Tlačítkem „Definice vstup. dat“ v základním uživatelském rozhraní lze vyvolat okno, pomocí kterého se definují vstupy pro simulaci (viz obr. 4). Kromě výběru jedné z výše zmíněných koncepcí vozidla je potřeba zvolit parametry koleje, parametry simulace samotné (zejména dráhu simulace, počáteční rychlost a dráhový krok numerického řešení a výpisu výsledků) a několik dalších vstupních dat. Dále odtud lze vyvolat dialog pro definici parametrů vozidla, jehož podoba závisí na volbě typu (koncepte) vozidla.

Obr. 4 Rozhraní pro definici vstupních dat programového systému SJKV-V4N v. 1.0

Z hlediska rozsahu scénářů, které je možné s využitím akademické licence programu simulovat, je výběr (viz též obr. 4) omezen:

- z hlediska trasování koleje na přímou kolej, převýšené oblouky o poloměru 300 a 500 m a dále protisměrné nepřevýšené oblouky o poloměru 190 m s mezipřímou délky 6 m;
- z hlediska nerovností koleje na ideální kolej bez nerovností, ideální kolej s osamělou příčnou nerovností o velikosti 8 mm pro počáteční vybuzení vozidla a kolej s příčnými a svislými nerovnostmi kolejnicových pásů, jež zajišťují průběžné kinematické buzení modelu vozidla v délce až 2500 m;
- z hlediska charakteristik kontaktní geometrie dvojkolí–kolej na kombinaci teoretického dvojkolí s jízdními obrysy S1002/e32,5 (tj. s rozchodem dvojkolí 1425 mm) a teoretické koleje o rozchodu 1435 mm s kolejnicemi 60E1 s úklonem buď 1:40, nebo 1:20.

Uvedený rozsah zadávaných parametrů tak umožňuje za příslušných podmínek provádět kromě vyšetřování jízdních vlastností vozidla v přímé a vodicích vlastností v obloucích o malých poloměrech a v S-oblouku např. i teoretickou analýzu stability. Ta přitom může být prováděna jednak s využitím sady simulačních výpočtů při konstantní rychlosti jízdy, ale také simulací s klesající rychlostí jízdy, a to díky možnosti definovat podélnou sílu působící na skříň vozidla, způsobující zpomalování vozidla po počátečním vybuzení osamělou příčnou nerovností koleje ve vysoké rychlosti. Bližší informace ke způsobům vyšetřování stability jízdy vozidel pomocí simulačních výpočtů lze najít např. v článku [4].

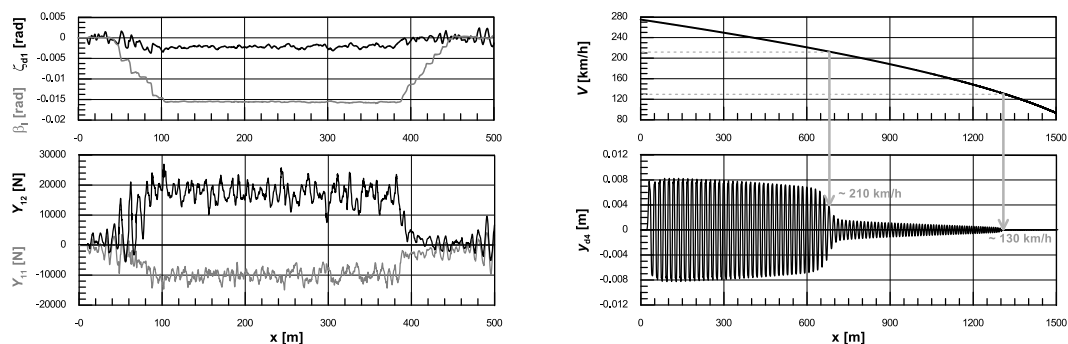
Z hlediska práce se vstupními daty lze zadávané parametry vozidla uložit do souboru „*.VDX“ a v případě potřeby jejich opakovaného použití je znovu načíst, aniž by bylo nutné je znovu zadávat ručně. Po dokončení zadání všech potřebných vstupních dat v rámci *preprocessingu* lze tlačítkem „Start simulace“ v základním uživatelském rozhraní programu vybrat umístění a název výstupního souboru, a spustit tak samotnou simulaci. V jejím průběhu, který je možné sledovat v podobě aktuální příčné polohy dvojkolí ve volném kanálu koleje (y_d) a hodnot svislých kolových (Q) a vodicích (Y) sil, se výsledky výpočtu ukládají se zadaným dráhovým krokem do binárního souboru tzv. velké výstupní fronty „*.VVF“. Zároveň je vytvořen soubor „*.VDF“, obsahující některá další data, jež jsou nutná pro následnou analýzu výsledků.

Analýza výsledků provedených simulací je opět přístupná ze základního uživatelského rozhraní. Volbou požadovaného výstupního souboru „*.VVF“ se ve stejném adresáři, v jakém se nachází tento soubor, vytvoří stejnojmenná složka, jež obsahuje v celkem 27 ASCII souborech s příponou „*.DAT“ výsledky v podobě dráhových průběhů sledovaných veličin. Kromě toho obsahuje složka též „nulový“ soubor ve formátu „*.TXT“, ve kterém jsou shrnuty základní údaje o simulaci a zadané parametry vyšetřovaného vozidla. V případě výsledkových ASCII souborů obsahuje vždy první sloupec ujetou dráhu prvního dvojkolí vozidla a v dalších sloupcích (oddělených tabulátorem) jsou vypsány příslušné hodnoty sledovaných veličin. Díky tomu je možné vykreslení průběhů těchto veličin a příp. další práce s nimi. Mezi sledované veličiny přitom patří mj. příčná poloha a úhel náběhu jednotlivých dvojkolí, vodicí, svislé kolové a podélné skluzové síly v dotykových bodech jednotlivých kol a kolejnic, podíl Y/Q na jednotlivých kolech, příčné a svislé zrychlení na ložiskových skříních, na rámu podvozku a na skříní vozidla, rychlost jízdy, natočení podvozku nebo deformace vazeb modelu vozidla. Bližší popis struktury výsledků je opět možné najít v technické a uživatelské dokumentaci [3].

2.4 Ukázka výsledků získaných programovým systémem SJKV-V4N v. 1.0

Na obr. 5 jsou prezentovány dvě ukázky výsledků simulačních výpočtů, provedených s využitím programu SJKV-V4N. V levé části obr. 5 jde o průběhy vybraných veličin, získaných při simulaci jízdy modelu nákladního vozu o hmotnosti 40 t obloukem o poloměru 300 m rychlostí 80 km/h. V horním grafu je znázorněn průběh úhlu náběhu prvního dvojkolí (černou čarou), jenž zde v důsledku jízdy po nerovné koleji osciluje kolem (absolutní) hodnoty 2 mrad, a dále průběh úhlu natočení předního podvozku vůči skříní (šedou čarou), který zde u vyšetřovaného vozidla se vzdáleností otočných čepů podvozků 10 m dosahuje v plném oblouku hodnoty cca 0,9°. V levém dolním grafu jsou vykresleny průběhy vodicích sil na vnějším (černou barvou) a vnitřním (šedou barvou) kole prvního dvojkolí.

V pravé části obr. 5 jsou potom znázorněny vybrané výsledky simulace jízdy modelu elektrické lokomotivy o hmotnosti 85 t na ideální přímé koleji bez nerovností po počátečním vybuzení osamělou příčnou nerovností koleje při působení podélné zpomalující síly o velikosti 155 kN na skříň vozidla, a to za podmínky pohybu po koleji s úklonem kolejnic 1:40. V dolním grafu je zde znázorněn průběh příčné výchylky čtvrtého (posledního) dvojkolí vozidla vůči ose koleje a horní graf představuje průběh rychlosti jízdy. Jde tedy o jednu z výše zmíněných metod teoretické analýzy stability jízdy kolejového vozidla. V tomto případě je možné ve výsledcích pozorovat z hlediska stabilitních vlastností tři oblasti. Při rychlostech nad 210 km/h dochází k nestabilnímu pohybu, kdy jednotlivá dvojkolí, pohybující se v příčném směru s amplitudou cca 8 mm a s frekvencí přibližně 4 Hz, zcela vyčerpávají volný kanál koleje. Při rychlostech v pásmu zhruba 210 až 130 km/h sice dvojkolí vykonávají vlnivý pohyb (mezní cyklus), ovšem s amplitudou menší než 2 mm, a tudíž nejde o nestabilní chod jako takový. Při poklesu rychlosti pod 130 km/h pak vymizí i tento pohyb.



Obr. 5 Ukázky výsledků simulačních výpočtů – vlevo: průjezd nákladního vozu obloukem o poloměru 300 m (nahore: úhel náběhu 1. dvojkolí a úhel natočení předního podvozku vůči skříní; dole: vodící síly na kolech 1. dvojkolí); vpravo: analýza stability lokomotivy při klesající rychlosti jízdy (nahore: průběh rychlosti; dole: příčná výchylka 4. dvojkolí)

3 PROGRAM RAILCALC

3.1 Vývoj programu RailCalc

Program RailCalc byl původně vytvořen na DFJP v rámci řešení bakalářské práce [5], úspěšně obhájené v roce 2021. Program je určen pro realizaci trakčních výpočtů – tedy výpočtů jízdních dob a spotřeby trakční energie – a byl vyvinut v programovacím jazyce C# pomocí technologie WPF na platformě .NET společnosti Microsoft. Původní program byl dále upraven, odladěn a doplněn o některé funkce v roce 2021 v rámci řešení projektu Studentské grantové soutěže Univerzity Pardubice ev. č. SGS_2021_010. Vznikla tak verze RailCalc 2.0, která je – podobně jako programový systém SJKV-V4N v. 1.0 – určena pro nekomerční využití v rámci akademické licence a je k dispozici studentům a pedagogickým pracovníkům zdarma.

3.2 Charakteristika programu RailCalc

Program RailCalc 2.0 umožňuje simulovat jízdu vlaku definovaného složení na definované trati. Jízda vlaku je zde modelována jako pohyb tělesa o jednom stupni volnosti podél jízdní dráhy, přičemž řešení takové úlohy probíhá numerickou integrací pohybové rovnice vlaku s definovaným dráhovým krokem řešení Δx . Pohybová rovnice vlaku v podobě, jak s ní pracuje program RailCalc, má tvar:

$$\left(\sum_{(i)} (m_{vi} + m_{ri}) + m_n \right) \cdot \frac{\Delta(v^2)}{2 \cdot \Delta x} = F_{ok} - O_v - O_t, \quad (1)$$

kde význam jednotlivých veličin je následující:

- m_{vi} je hmotnost jednotlivých vozidel řazených ve vlaku, která může (ale nemusí) zahrnovat kromě vlastní hmotnosti vozidel i hmotnost případného nákladu, resp. cestujících;
- m_{ri} je ekvivalentní hmotnost rotujících hmot pro jednotlivá vozidla řazená ve vlaku;
- m_n je hmotnost nákladu, kterou je možné zadat zvlášť, nezávisle na definované hmotnosti jednotlivých vozidel;
- F_{ok} je tečná síla na obvodu kol, a to buď tažná (kladná – stanovená v souladu se zadanou trakční charakteristikou hnacího vozidla), nebo brzdná (záporná – dopočítaná pro požadovanou hodnotu brzdného odrychlení);
- O_v je celkový absolutní vozidlový odpor vozidel řazených ve vlaku, přičemž je vozidlový odpor jednotlivých vozidel (O_{vi}) stanoven pomocí měrných vozidlových odporů těchto vozidel (o_{vi}); platí přitom:

$$O_{vi} = o_{vi} \cdot M_{vi} \cdot g, \quad (2)$$

$$o_{vi} = a + b \cdot V + \tau \cdot c \cdot V^2, \quad (3)$$

kde M_{vi} je hmotnost příslušného vozidla v [t], g je tíhové zrychlení, V je aktuální rychlost jízdy v [km/h], a, b, c jsou koeficienty vzorce měrného vozidlového odporu a koeficient τ představuje bezrozměrný tunelový faktor (viz též [6]), který v návaznosti na popis tratě slouží k zohlednění vlivu tunelu na celkový jízdní odpor;

- O_t je celkový traťový odpor vlaku, který je dán součtem odporu ze sklonu koleje (O_s) a odporu z jízdy obloukem (O_r), tedy:

$$O_t = O_s + O_r; \quad (4)$$

- v je aktuální (okamžitá) rychlost jízdy;
- x je ujetá dráha (vztažená k čelu vlaku).

Ač numerické řešení rovnice (1) popisuje pohyb hmotného bodu, zohledňuje program RailCalc při výpočtu i délku vlaku, a to tak, že jednak umožňuje (volitelně) začít zrychlovat až tehdy, když do úseku s vyšší dovolenou rychlostí vjede celý vlak, a rovněž zohledněním vlivu délky vlaku na traťový odpor, kdy se změna podélného sklonu nebo např. vjezd do oblouku neprojevuje skokovou změnou traťového odporu, ale v jeho postupné změně, odpovídající předpokládanému rovnoměrnému rozložení hmotnosti po délce vlaku. Odpor ze sklonu koleje přitom lze spočítat z průměrné hodnoty sklonu $\bar{s}$, na němž se vlak o celkové hmotnosti M_{vl} aktuálně nachází, a pro výpočet odporu z jízdy obloukem, působícího na jednotlivé části (tzv. segmenty) vlaku o hmotnosti M_j , se využívá přepočet z měrného (empirického) vyjádření této složky traťového odporu (o_{rj}) v závislosti na poloměru oblouku R , tedy:

$$O_s = \bar{s} \cdot M_{vl} \cdot g, \quad (5)$$

$$O_{rj} = o_{rj} \cdot M_j \cdot g = \frac{c_1}{R - c_2} \cdot M_j \cdot g. \quad (6)$$

Z hlediska jednotlivých fází jízdy vlaku jsou při numerickém řešení úlohy modelovány:

- rozjezd vlaku za předpokladu plného využití definované trakční charakteristiky hnacích vozidel řazených ve vlaku (se zohledněním infrastrukturně daných omezení dovolené rychlosti a přerušení odběru elektrické energie v případě vozidel elektrické trakce);
- jízda ustálenou rychlostí a (volitelně) i jízda výběhem s definovanými parametry;
- brzdění s definovaným brzdícím zpomalením (které může být korigováno s ohledem na aktuální sklonové poměry na trati).

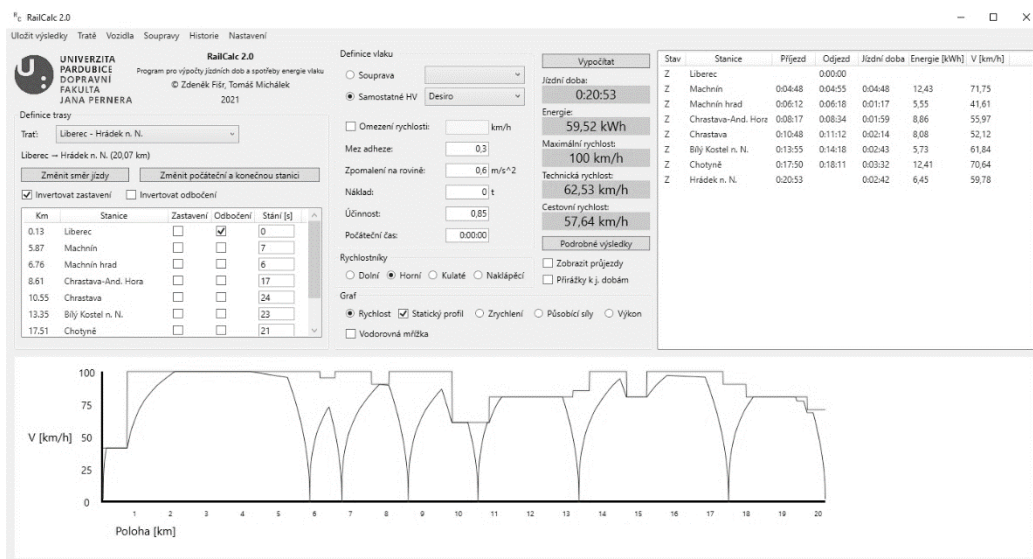
Na základě výše uvedených fází jízdy se tak v rámci simulace jízdy vlaku nejdříve počítají brzdné křivky k definovaným bodům zastavení či omezení rychlosti a následně i křivky rozjezdové. Výsledný dráhový tachogram je posléze vytvořen tak, že je pro každé místo na trati vybrána hodnota rychlosti odpovídající níže položené křivce.

Ke stanovení samotných dílčích i celkových jízdních dob se využívá vypočtených tachogramů, s jejichž pomocí lze vyčíslit časy potřebné k projetí jednotlivých segmentů, tedy úseků o délce odpovídající dráhovému kroku numerického řešení. Pro potřeby vyčíslení spotřeby trakční energie jsou potom využity vypočtené průběhy (kladné) tažné síly na obvodu kol, přičemž je možno takto získanou trakční práci převést na údaj o spotřebě energie pomocí definované hodnoty účinnosti η :

$$E = \frac{1}{\eta} \cdot \sum_{(j)} F_{okj} \cdot \Delta x. \quad (7)$$

3.3 Práce s programem RailCalc 2.0

Podrobný návod k použití programu RailCalc 2.0 je spolu s jeho popisem uveden v dokumentaci [7], která je volně dostupná on-line. I v tomto případě se vstupy do programu zadávají prostřednictvím uživatelského rozhraní, jehož základní podoba je uvedena na obr. 6. Zatímco samotný princip trakčních výpočtů, realizovaných programem po stisku tlačítka „Vypočítat“, je ve stručnosti popsán výše, uživatelské rozhraní slouží především k definici vstupních dat (*preprocessing*) a dále k zobrazování a exportu výsledků výpočtů (*postprocessing*).



Obr. 6 Základní uživatelské rozhraní programu RailCalc 2.0 se zobrazením výsledků výpočtu

Z hlediska definice vstupních dat je možné rozlišovat tři základní skupiny těchto dat, jimiž jsou:

- charakteristiky vyšetřovaných traťových úseků, na nichž má být jízda vlaku simulována;
- charakteristiky jednotlivých vozidel a z nich případně složených vlakových souprav;
- další parametry výpočtu (délka dráhového integračního kroku, nastavení brzdného zpomalení, (ne)uvvažování jízdy výběhem či přírážek k jízdním dobám, struktura výpisu...).

V rámci základního uživatelského rozhraní (viz obr. 6) je možné vybírat pro potřeby provedení konkrétního trakčního výpočtu tratě a soupravy, příp. samostatná hnací vozidla, z databáze (tvořené soubory „*.CSV“ ve složce „data“) a také měnit některé základní parametry výpočtu (účinnost, brzdné zpomalení, součinitel adheze atd.). V případě, že požadované tratě, vozidla a soupravy ještě nejsou definovány, je nutné je nejprve vytvořit. K tomu slouží správci jednotlivých úloh, konkrétně:

- *správce tratí*, který je dostupný pod nabídkou „*Tratě*“ v hlavním menu a který umožňuje spravovat a prostřednictvím editoru vytvářet či upravovat jednotlivé tratě (definice stanic a zastávek vč. polohy vjezdu/odjezdu a rychlosti jízdy odbočkou, rychlostního a sklonového profilu, polohy tunelů, oblouků, pomalých jízd a míst bez elektrického napájení);

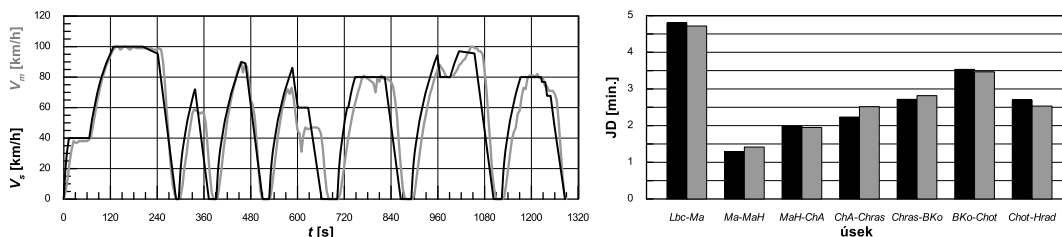
- *správce vozidel*, který je dostupný pod nabídkou „Vozidla“ v hlavním menu a umožňuje spravovat a prostřednictvím příslušného editoru také vytvářet jednotlivá hnací a tažená vozidla nebo upravovat jejich parametry (délka a hmotnost vozidla, maximální rychlost, hmotnost ekvivalentních rotačních hmot, počet (hnacích) dvojkolí, hodnoty koeficientů vzorce měrného vozidlového odporu, maximální trakční výkon a maximální tažná síla na obvodu kol, resp. trakční charakteristika apod.);
- *správce souprav*, který je dostupný pod nabídkou „Soupravy“ v hlavním menu a který umožňuje spravovat a prostřednictvím editoru i vytvářet a upravovat z již definovaných vozidel soupravy vlaků.

Jak již bylo zmíněno, program RailCalc 2.0 umožňuje definovat řadu nastavení, týkající se např. přírážek k jízdním dobám, uvažované účinnosti při výpočtu spotřeby energie, hodnoty brzdného zpomalení (a její korekce s ohledem na sklonové poměry), možností definice podmínek pro jízdu vlaku výběhem či adhezního omezení tažných sil. Pro potřeby definice těchto parametrů slouží v hlavním menu základního uživatelského rozhraní nabídka „Nastavení“, přičemž jsou všechny možnosti blíže popsány v dokumentaci [7].

Po skončení výpočtu se v rámci základního uživatelského rozhraní programu (viz obr. 6) zobrazí základní výsledky v podobě celkové jízdní doby a spotřeby energie, dráhového tachogramu, hodnot maximální dosažené, cestovní a technické rychlosti, a dále odpovídající údaje (jízdní doba, spotřeba energie, průměrná rychlost) pro jednotlivé dílčí (mezistaniční) úseky, pro které jsou vypočtené jízdní doby vypsané také v podobě „jízdního řádu“ s definovaným počátkem v čase. Program též umožňuje export výsledků výpočtů v různém rozsahu (včetně průběhů všech významných veličin do souboru ve formátu „*.CSV“), k čemuž slouží nabídka „Uložit výsledky“ v hlavním menu. V rámci nabídky „Historie“ je následně možné provádět mj. i vzájemné porovnávání výsledků různých variant výpočtů.

3.4 Ukázka výsledků získaných programem RailCalc 2.0

Na obr. 7 je prezentována ukázka výsledků trakčního výpočtu, provedeného pomocí programu RailCalc 2.0, včetně validace výsledků, jež byla provedena porovnáním výsledků výpočtu s výsledky měření na reálném vozidle v provozu. Jde o jízdu zastávkového osobního vlaku tvořeného motorovou jednotkou Siemens Desiro Classic mezi stanicemi Liberec a Hrádek nad Nisou. Při výpočtu bylo uvažováno brzdění s konstantním zpomalením $0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (s korekcí $0,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{‰}$) a jízda výběhem vždy před brzděním, a to do dosažení 95 % dovolené rychlosti (umožňují-li to samozřejmě v daném místě sklonové poměry). V levé části obr. 7 jsou zobrazeny časové tachogramy pro tuto jízdu, v pravé části je potom formou sloupcového grafu provedeno porovnání dílčích jízdních dob mezi jednotlivými místy zastavení (stanice, zastávky). Černá barva přitom v obou grafech reprezentuje výsledky provedeného výpočtu, šedá barva výsledky měření na vozidle v provozních podmínkách. Porovnáme-li celkovou jízdní dobu (bez přírážek k jízdním dobám a bez započtení doby nácestných pobytů ve stanicích a na zastávkách), vychází pro uvažované podmínky jízdní doba 0:19:15, zatímco při zkušební jízdě byl naměřen výsledek 0:19:25. Rozdíl 10 s mezi výsledkem simulace a měření na dráze délky 20 km tak svědčí o dobré vypovídací schopnosti výpočtu.



Obr. 7 Ukázky výsledků trakčních výpočtů a jejich validace porovnáním s výsledky měření na vozidle – vlevo: vypočtený (černě) a naměřený (šedě) časový tachogram jízdy motorové jednotky v referenčním úseku; vpravo: vypočtené (černě) a naměřené (šedě) dílčí jízdní doby mezi jednotlivými místy zastavení v referenčním úseku

Vypočtená celková trakční práce má v daném simulačním scénáři hodnotu 50,6 kWh. V případě, že bychom uvažovali 85% účinnost (běžná hodnota pro hnací vozidla elektrické trakce), odpovídá tato hodnota spotřebě trakční energie 59,5 kWh, resp. měrné spotřebě energie přibližně 38 Wh/tkm. Jelikož však jde o motorovou jednotku, je pro získání reálných představ o energetické náročnosti nutné provést transformaci těchto výsledků na spotřebu nafty, čehož lze docílit zohledněním účinnosti spalovacího motoru, kdy lze spálením 1 l motorové nafty získat přibližně 4 kWh mechanické práce. Očekávaná spotřeba nafty vyšetřované motorové jednotky se tak v daném traťovém úseku pohybuje okolo 15 litrů, resp. kolem průměrné hodnoty 0,75 l/km.

4 ZÁVĚR

V příspěvku jsou představeny dva softwarové nástroje, které byly v posledních letech vytvořeny na Oddělení kolejových vozidel Katedry dopravních prostředků a diagnostiky Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice a které jsou tak nyní k dispozici studentům jednak pro potřeby doplnění výuky o praktické ukázky v příslušných předmětech, zaměřených na výpočetní metody v dynamice kolejových vozidel (programový systém SJKV-V4N) a na trakční mechaniku (program RailCalc), ale například i pro využití při zpracování závěrečných prací, v rámci kterých mohou být s pomocí těchto nástrojů prováděny různé analýzy apod. Využití těchto softwarů a práci s nimi v rámci výukového procesu je možné považovat za určitou nadstavbu k získaným znalostem zejména z oblasti mechaniky pohybu vozidel, teorie kolejových vozidel a aplikované matematiky a ukazuje studentům praktickou aplikaci nabytých vědomostí při řešení problémů inženýrské praxe v daných oblastech.

Programový systém „SJKV-V4N v. 1.0“ vznikl v roce 2018 v rámci řešení projektu Technologické agentury České republiky ev. č. TE01020038 „Centrum kompetence drážních vozidel“. Program „RailCalc 2.0“ a tento příspěvek vznikly v roce 2021 v rámci řešení a za podpory projektu Studentské grantové soutěže Univerzity Pardubice ev. č. SGS_2021_010 „Vybrané aspekty z oblasti dopravních prostředků a infrastruktury řešené na DFJP“.



Literatura

- [1] POLÁCH, O. A fast wheel-rail forces calculation computer code. *Vehicle System Dynamics*. 1999, **33**(supplement 1), 728–739. DOI: 10.1080/00423114.1999.12063125.
- [2] VOLTR, P. *Uživatelská dokumentace k programu VIZ 3.4*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2019.
- [3] ZELENKA, J., MICHÁLEK, T. *Programový systém SJKV-V4N v. 1.0, technická a uživatelská dokumentace* [on-line]. Zpráva č. CKDV/WP5-2018-TM-01. Česká Třebová: Dislokované pracoviště Dopravní fakulty Jana Pernera, 2018 [cit. 15. 06. 2021]. Dostupné z: <https://dfjp.upce.cz/dfjp/kdpd/kolejova-vozidla#collapse159900>
- [4] ZELENKA, J., KOHOUT, M., MICHÁLEK, T. Application of sensitivity analysis in design of characteristics of damping joints in locomotive running gear. *Engineering Mechanics*. 2013, **20**(5), 369–377. ISSN 1802-1484.
- [5] FIŠR, Z. *Program pro výpočet jízdních dob a spotřeby trakční energie*. Pardubice, 2020. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [6] MICHÁLEK, T., ŘEZNÍČEK, J. Rozbor vlivu odporu z jízdy tunelem na výsledky trakčních výpočtů. *Vědeckotechnický sborník Správy železnic*. 2021, **4**, 84–107. ISSN 2694-9172.
- [7] FIŠR, Z., MICHÁLEK, T. *Program RailCalc 2.0, technická a uživatelská dokumentace* [on-line]. Zpráva č. SGS2021-TM-01. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta J. Pernera, 2021 [cit. 20. 08. 2021]. Dostupné z: <https://dfjp.upce.cz/dfjp/kdpd/kolejova-vozidla#collapse186828>