



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB

INSTITUTE OF RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

**EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA VYBRANÝCH
ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ**

THE EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SELECTED RAILWAY STRUCTURES

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Viktor Nohál

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

BRNO 2023

Abstrakt

Práce je primárně věnována možnosti využití dat z měření dynamických účinků od pojezdu vlakových souprav a jejich působení na železniční svršek s cílem určit stav podbití železniční konstrukce. Dále se práce zaměřuje na analýzu získaného signálu a určení polohy dvojkolí v měřeném signálu. Železniční dvojkolí je při své jízdě budičem dynamické odezvy na železniční konstrukci, proto je pro mnoho aplikací nezbytné znát polohu tohoto buzení. Jako sekundární výsledek analýz, lze získat i informaci o technickém stavu daného železničního dvojkolí a dle dalších markantů lze usuzovat i na druh a typ vlakové soupravy. Primárně se jedná o rozdělení na soupravy nákladní vs. osobní, a mezi osobními soupravami můžeme rozlišit, zda se jedná o elektrickou jednotku, lokomotivu s osobními vagóny, zda je vlak lokomotivou tažen, nebo je vepředu vlaku řazen řídící vůz a souprava s lokomotivou vzadu jede postrkem atd.

Obecně měření v terénu na železniční konstrukci je často nákladné, a to nejen z pohledu vlastní aparatury, ale i z hlediska zajištění lidských zdrojů. Proto je snahou vytvořit levné autonomní zařízení, které by nebylo náročné na instalaci a poskytovalo by potřebná data o drážních vozidlech a železniční konstrukci. Vyvíjený autonomní modul k měření vibrací tato data může poskytovat a na základě nich lze následně vyhodnotit, zda byla konstrukce zatížena jednotlivým drážním vozidlem nebo celou vlakovou soupravou, o jakou vlakovou soupravu šlo, z kolika vozů se daná souprava skládala, jakou měla rychlost a další užitečné informace. Určení rychlosti vlakové soupravy a identifikace náprav jednotlivých vozů této soupravy je základní úlohou, kterou je třeba vyřešit, než je možno pokračovat v dalším zpracování dat.

Měření zrychlení kmitání na železniční konstrukci (tj. vibrací) je prováděno primárně za účelem zjištění dynamické odezvy konstrukce na průjezd vlakové soupravy a zjištění chování vlastní železniční konstrukce. Určení jednotlivých náprav vlakové soupravy je pouze mezikrokem k provádění dalších analýz. Signál dynamické odezvy pojezdu vlakové soupravy není přímo určen k identifikaci náprav, vyřešením identifikace náprav z tohoto signálu se však podařilo celou měřicí soustavu velmi zjednodušit a zlevnit. Jinak řečeno, není nutno do sestavy zapojovat další modul, který by byl zaměřen čistě jen na identifikaci náprav a vedl by ke zdražení celého systému a zvýšení jeho složitosti (i z pohledu následné instalace na dráze).

Určení rychlosti vlakové soupravy a polohy jednotlivých dvojkolí v měřeném signálu je dobrým výchozím bodem pro provádění následných analýz stavu podbití kolejového roštu a chování železniční konstrukce v čase.

Z důvodu menší rozmanitosti vozového parku pro osobní dopravu a také z důvodu menšího rozptylu možného zatížení od jednotlivých železničních vagónů, je doporučeno pro hodnocení stavu železniční konstrukce používat při dlouhodobějším měření pouze zatížení od pojezdu osobních souprav. Proto se tato práce v konečné fázi zabývá i problematikou určení typu vlakové soupravy.

Klíčová slova

Autonomní měřicí systém, identifikace polohy dvojkolí, dynamické účinky, vibrace, měření na pražci, stav podbití.

Abstract

The thesis is focused on the possibility of using data from the measurement dynamic effects on the track structure to determine the condition of the underfilling track structure. Next, the thesis focuses on the analysis of the obtained signal and the determination of the position of the wheelsets in the measured signal. The wheelsets are an exciter of the dynamic response to the track structure, so for many applications, it is necessary to know the position of this excitation. As a secondary result of the analyses, can be obtained information about the technical condition of the wheelset, and can be also inferred other characteristics. We can divide into cargo sets vs. passenger, and between passenger sets, we can distinguish whether it is an electric unit, a locomotive with passenger cars, whether the train is pulled by a locomotive, or a control car is positioned at the front of the train and the set with a locomotive at the back is driven by a spur, etc.

Measuring in the field on a railway structure is often expensive, not only from the point of view of the equipment but also for securing human resources. Therefore, the goal is to create a cheap autonomous device that would not be difficult to install and would provide the necessary data about railway vehicles and railway construction. The developed autonomous module for measuring vibrations can provide this data, and based on it, it can subsequently be evaluated whether the structure was loaded by an individual railway car or an entire train set, which train set it was, how many cars the given set consisted of, how fast it was and other useful things information. Determining the speed of the train set and identifying the axles of the individual cars of this set is a basic task that must be solved before it is possible to proceed with further data processing.

The measurement of the acceleration of oscillations on the railway structure (i.e. vibrations) is carried out to determine the dynamic response of the structure to the passage of the train set and to determine the behaviour of the railway structure. Determining the individual axles of the train set is only an intermediate step to performing further analyses. The dynamic response signal of the train set is not directly intended for axle identification, however, by solving the axle identification from this signal, it was possible to greatly simplify and reduce the cost of the entire measuring system. So, it is not necessary to include another module in the assembly, which would be focused only on the identification of the axle and, in addition, would increase the price of the entire system and the perspective of its complexity (also from the subsequent installation on the track).

Determining the speed of the train set and the position of the individual wheels in the measured signal is a good starting point for performing subsequent analyses of the state of underfilling of the rail grid and the behaviour of the railway structure over time.

Due to the smaller diversity of the vehicle fleet for passenger transport and also due to the smaller dispersion of the possible load from individual railway wagons, it is recommended to use only the load from the travel of the passenger train for the assessment of the condition of the railway structure in long-term measurements. Therefore, in the final phase, this work also deals with the issue of determining the type of train set.

Keywords

Autonomous measuring system, identification of wheel position, dynamic effects, vibration, measurement on sleeper, condition of undercharging.

Bibliografická citace

Ing. Viktor Nohál *Experimentální analýza vybraných železničních konstrukcí*. Brno, 2023. 141 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.

Obsah

1. Úvod	13
2. Cíle práce	17
3. Autonomní měřicí systém	19
3.1. Přenosy dat	20
3.2. Funkční vzorky měřicího zařízení	21
3.2.1. SB-datalogger.....	21
3.2.2. WMP-modul	23
3.2.3. WMP-modul a mini počítač	23
4. Současný stav řešené problematiky.....	25
5. Teoretický základ	27
5.1. Historie vývoje železnice.....	27
5.2. Železniční konstrukce.....	31
5.2.1. Železniční spodek.....	31
5.2.2. Železniční svršek	33
5.2.3. Kolejový rošt	39
5.3. Drážní vozidla.....	41
5.3.1. Drážní vozidlo – stavba.....	43
5.3.2. Hnací vozidla	48
5.3.3. Tažené vozy – vagóny	53
5.4. Dynamické děje v koleji	56
5.4.1. Vozidlo a kolej.....	56
5.4.2. Jízda kolejového vozidla.....	58
6. Metodika měření	65
6.1. Metodika pro určení polohy dvojkolí.....	66
6.1.1. Měřicí sestava	66
6.1.2. Postup hodnocení	68
6.2. Metodika pro určení defektních dvojkolí.....	72
6.2.1. Měřicí sestava	72
6.2.2. Postup hodnocení	73
6.3. Metodika pro stanovení stavu podbití.....	74

6.3.1. Měřicí sestava.....	75
6.3.2. Postup hodnocení	76
6.4. Metodika pro určení typu vlaku	77
6.4.1. Postup hodnocení	77
6.5. Prvky měřicí sestavy	78
7. Matematický aparát	80
7.1. Měření a zpracování technického signálu	80
7.1.1. Vzorkování signálu	80
7.1.2. Kvantování signálu, A/D převodník.....	81
7.1.3. Filtrování signálu	81
7.2. Výpočtové metody měřeného signálu	82
7.2.1. Analýza v časové oblasti	82
7.3. Matematické metody vyhodnocení dat	83
7.3.1. Statistické metody	83
7.3.2. Metoda SVM – metoda pomocných vektorů	83
7.3.3. Další matematické metody.....	84
7.4. Použitý výpočtový software	86
7.4.1. LibreOffice Calc	86
7.4.2. GNU Octave	86
8. Realizace měření	88
8.1. Příprava měření.....	88
8.1.1. Výběr vhodného stanoviště měření.....	88
8.1.2. Měřicí aparatura	89
8.2. Lokalita Doubravice nad Svitavou	93
8.2.1. Provedení měření.....	93
8.2.2. Zaznamenané vlakové soupravy.....	95
8.3. Lokalita Hranice na Moravě.....	96
8.3.1. Provedení měření.....	97
8.3.2. Zaznamenané vlakové soupravy.....	99
8.4. Lokalita Napajedla	99
8.4.1. Provedení měření.....	100
8.4.2. Zaznamenané vlakové soupravy.....	101
9. Vyhodnocení měření	102

9.1. Určení polohy dvojkolí	102
9.1.1. Lokalita Doubravice nad Svitavou	102
9.1.2. Lokalita Hranice na Moravě	108
9.1.3. Lokalita Napajedla.....	109
9.2. Vyhodnocení stavu dvojkolí	111
9.2.1. Lokalita Doubravice nad Svitavou	111
9.2.2. Lokalita Hranice na Moravě a Napajedla	114
9.3. Vyhodnocení stavu podbití	115
9.3.1. Lokalita Doubravice nad Svitavou	116
9.3.2. Lokalita Hranice na Moravě	117
9.3.3. Lokalita Napajedla.....	118
9.4. Určení typu vlakové soupravy.....	119
9.4.1. Lokalita Doubravice nad Svitavou	121
9.4.2. Lokalita Hranice na Moravě	125
9.4.3. Lokalita Napajedla.....	128
10. Optimalizace měřicí aparatury	129
11. Závěry a doporučení	130
12. Možnosti využití algoritmů a měřícího systému	132
12.1. Kontinuální měření stavu podbití	132
12.2. Zjišťování rychlosti	132
12.3. Počítání náprav	133
13. Seznamy	134
13.1. Bibliografie.....	134
13.2. Internetové zdroje	138
13.3. Obrázky	139
13.4. Tabulky	140
13.5. Zkratky a symboly	141

1. Úvod

Žijeme v současnosti v globalizovaném světě, kde je potřeba přepravy osob, materiálů, hmot a tovaru enormní a ve výhledu dalších let lze očekávat požadavek na další navyšování přepravních kapacit. Požadavky na zvyšování přepravních kapacit budou kladeny na všechny módy dopravy – automobilovou, železniční, lodní, leteckou i potrubní. Každý z daných módů dopravy má svá specifika a omezení. Zvyšující se požadavky na přepravu nemůže uspokojit pouze jeden mód dopravy, ale budou se vyvíjet současně a každý z módů zajistí určitou část přepravního trhu.

Přestože je železniční síť v České republice jedna z nejhustších v Evropě, provoz na ní je do značné míry satureován a na některých tratích již nemá mnoho kapacitních rezerv. Zvláště na hlavních tratích, kde je vysoký podíl osobní dopravy (lokální i dálkové), je problém zajistit průjezd nákladní dopravy v přijatelných časech. Osobní přeprava má přednost před dopravou nákladní, která musí čekat na uvolnění trati. Tím se prodlužují časy doručení zboží a snižuje se konkurenceschopnost s dopravou automobilovou. Vývoj v poslední době směřuje k tomu, že budou na našem území realizovány vysokorychlostní tratě v samostatných koridorech, na tyto tratě se přesune převážná část dálkových spojů osobní dopravy, čímž dojde k uvolnění kapacity na klasických konvenčních tratích. Na stávajících tratích se tím změní poměr nákladní a osobní dopravy ve prospěch dopravy nákladní. S tím bude souviset i zvýšení provezené zátěže na konvenčních tratích, a lze očekávat i odlišné chování konstrukcí v reakci na zvýšenou zátěž.

Vyvstává zde potřeba na monitorování tratí, na monitorování jednotlivých konstrukčních prvků. Monitoring stávající konstrukce však nelze vždy provést zařízeními, které vyžadují stavební úpravy. Získání stavebního povolení je na železnicích velmi zdoluhavý proces a následná realizace stavebních úprav rovněž, a to nejen po finanční stránce, ale i po stránce časové. Vždyť jen ohlášení plánovaných výluk na trati musí být provedeno minimálně 4 měsíce před realizací výluky. Vytvoření projektu, projednání s dotčenými orgány, zajištění výluk na trati, provedení dané úpravy, to vše každou stavební změnu na železnici posouvá do horizontu ne týdnů a měsíců, ale do horizontu několika let. Z důvodu složitosti stavebních úprav bylo jednoznačně zavrženo stavební řešení monitorovacích stanic a dále je v předkládané práci uvažováno pouze s mobilními přístroji pro monitoring konstrukce, které nevyžadují žádné správní kroky, ale pouze povolení správce dopravní cesty.

Mobilní zařízení pro monitoring poskytuje v porovnání se zařízením provedeným stavebně velmi rychlou instalaci. Další výhodou je možnost umístit toto monitorovací stanoviště v podstatě kdekoli na železniční síti a tím mít možnost reagovat na aktuální situaci. Dále lze jedno zařízení používat opakovaně na různých místech. Mobilní monitorovací zařízení má však i svá omezení a nevýhody. Tím nejpodstatnějším omezením, které determinuje následné použití je „zabudování“ do konstrukce. Měřicí soustavu nelze umístit dovnitř konstrukce (nebo jen velmi omezeně), proto lze provádět pouze povrchová měření na železniční konstrukci. Monitoring pomocí mobilního zařízení je tedy zaměřen pouze na měření na železničním svršku.

Pro monitoring konstrukce je velmi vhodné sledování dynamických účinků působících právě na železniční svršek, proto lze mobilní monitorovací zařízení bez problémů použít a hlavní nevýhoda tohoto monitorovacího zařízení při měření dynamických účinků značně ztrácí na významu. Přenos dynamického působení na železniční spodek je zejména v oblasti vibrací,

protože na železničním svršku dochází k podstatnému útlumu frekvencí v akustickém pásmu účinků a částečně i k útlumu v oblasti vibrací.

Cílem je navrhovat konstrukce s co nejmenším vlivem na okolní prostředí. To znamená navrhovat konstrukce, které budou mít optimální tlumící účinky při zachování vysoké spolehlivosti konstrukce. Důležité je tyto aspekty řešit zejména na hlavních trasách na průtazích velkými městy, kde je vysoký provoz hustě obydlenou oblastí. Zde jdou požadavky na vysokou únosnost trati s minimálními emisemi hluku a vibrací proti sobě.

Zvyšování únosnosti železničního svršku používáním betonových pražců nebo pevné jízdní dráhy jsou nutnou podmínkou pro provozování hlavních a všech koridorových tratí, což ale přináší zvýšené dynamické účinky na interakci mezi kolem železničního vozu a kolejnicí. Se vzrůstající rychlostí na provozovaných tratích se také zvětšují dynamické účinky, kterými železniční vozy na železniční svršek působí. Snahou je najít optimální pružně-tlumící uložení, které bude dostatečně tuhé pro přenos působících sil do podloží bez porušení konstrukce, ale zároveň bude dostatečně pružné, aby v maximální míře utlumilo akustické a vibrační působení od pojezdu železniční soupravy. Primární utlumení dynamických účinků od pojezdu železničních vozidel probíhá v kolejovém roštu, kde podstatným prvkem je uchycení kolejnice ke kolejové podpoře (pražci, pevné jízdní dráze), zde dochází k útlumu vyšších emitovaných frekvencí. K sekundárnímu utlumení dynamických účinků dochází v pražcovém podloží (kolejové lože, případně hlouběji ve vrstvách železničního spodku), kde jsou utlumeny zejména vibrace o nižších frekvencích. Převážná část dynamických účinků je utlumena ve svrchních částech konstrukce, proto lze pro monitorování použít mobilní monitorovací zařízení.

Každý nově navrhovaný prvek nebo součást železniční konstrukce musí projít důkladným testováním a ověřením předepsaných vlastností. Při návrhu nových součástí železniční konstrukce se uplatní jak pokročilé 3D modelování, hodnocení pomocí expertních programů a metod (např. metody konečných prvků), tak i testování prototypů v laboratorních podmínkách. Tyto kroky jsou velmi důležité a nezbytné pro zavedení nových prvků železniční konstrukce do reálného provozu, avšak před plošným rozšířením na železniční síti je nutno tyto prvky otestovat i v reálném provozu na zkušebních úsecích.

Dlouhodobé testování nově zaváděných prvků železniční konstrukce vyžaduje i evropská legislativa. Aby mohl proběhnout regulérně celý validační proces schvalování, je nutné dané prvky otestovat nejen in-labo, ale především in-situ v podmínkách reálného provozu. Za tímto účelem jsou na železniční síti zřizovány zkušební úseky, na kterých se nové prvky zkoušejí. Při zřizování zkušebních úseků se sice provádí stavební úprava a technicky by bylo možné měřící aparaturu umístit přímo do navrhované konstrukce, avšak validační proces probíhá na základě srovnání s referenčním úsekem, který je stávající a již konsolidovaný. Aby byly výsledky měření na zkušebním i na referenčním úseku srovnatelné, musí být prováděny za shodných podmínek, podle stejné metodiky měření a stejnou měřící aparaturou (typově stejnou). Do referenční konstrukce nelze stavebně zasahovat, proto nemůže být použita měřící aparatura uvnitř konstrukce. Při výstavbě zkušebních úseků mohou být samozřejmě některé snímače a čidla zabudována přímo do železniční konstrukce, ale výstupy těchto senzorů nejsou použitelné pro validační proces, mohou však přispět k pochopení chování železniční konstrukce jako takové. Příkladem senzoru zabudovaného do konstrukce je měřící kámen umístěný v kolejovém loži a osazený trojosým akcelerometrem.

Osazení čidel přímo do železniční konstrukce nutně neznamená stavební provedení celé měřící soupravy. V uvedeném příkladu jsou z měřícího kamene vyvedeny pouze kontakty

pro připojení k mobilní měřicí aparatuře, která snímá jak údaje pro validační proces, tak i nadstavbové údaje o konstrukci, které mohou následně sloužit pro lepší kalibraci numerických výpočetních systémů.

Při provádění měření se zjišťuje množství různých údajů, od vizuální prohlídky dané konstrukce, zda nedochází ke vzniku viditelných trhlin přes měření změny geometrických parametrů koleje (GPK) až po měření dynamických účinků na konstrukci. Se zvyšující se provozní rychlostí na železnici nabývá na významu právě zjišťování dynamické odezvy konstrukce. Pozitivem při měření dynamické odezvy je možnost kontinuálního měření po delší časový úsek (což například u vizuální prohlídky je neproveditelné z hlediska lidských zdrojů). Sestavení měřicí aparatury pro měření dynamické odezvy konstrukce není časově ani finančně náročné. Problém je však sladit a zkalibrovat všechny komponenty, aby poskytovaly použitelná data.

Pro měření dynamických projevů konstrukce se užívají především akcelerometry, které jsou relativně levné a pro danou aplikaci i dostatečně přesné. Akcelerometry změří aktuální výchylku zrychlení v daném bodě konstrukce, avšak pro následné hodnocení vlivu na konstrukci potřebujeme znát ještě informace o buzení – o budiči, který daný dynamický projev vyvolal. Budičem na železniční konstrukci jsou dvojkolí železničních vozů a jejich pojezd po železniční konstrukci. Problém, který je třeba pro zdárné vyhodnocení signálů vyřešit je identifikace železničního dvojkolí v signálu. Přístupy jsou možné dva, buď budou pro identifikaci využita naměřená data dynamické odezvy (náročné na sestavení hodnotícího algoritmu) nebo bude systém rozšířen o další moduly, které budou zajišťovat pouze identifikaci jednotlivých drážních vozidel (což podstatným způsobem zvýší cenu měřicího modulu a přinese s sebou i další problémy při instalaci).

Činnosti, pro které je třeba identifikovat jednotlivá drážní vozidla, případně jednotlivá dvojkolí je na železnici vícero. V první řadě je určování počtu vozidel samozřejmě spojeno s vlakotvorbou, tato činnost je však mimo oblast zájmu této práce, a nad to při vlakotvorbě převládá při sčítání lidská práce, kdežto cílem této práce je vytvoření systému automatického sčítání vozů na základě dynamické odezvy od jejich pojezdu. Automatické sčítání vozů se uplatní v systémech vážení vozidel za jízdy (WIM – weight in motion, příp. CIM – Coupled in motion) a celé řadě dalších diagnostických aplikací. V zahraničí jsou již v provozu vyspělé systémy vážení železničních vozů za jízdy při běžné traťové rychlosti, které v sobě zahrnují i systémy identifikace podpořené „vizuální“ identifikací jednotlivých vozů. V USA se vážením železničních vozidel za jízdy zabývá např. společnost L.B. Foster [10]. V České republice se systémy WIM na železnici zatím příliš nepoužívají, i když je snaha je s nástupem soukromých dopravců do provozu zavést ve větším měřítku (důvodem je přetěžování nákladních vozů a s tím související zvýšené opotřebení jízdní dráhy). Všechny tyto systémy mívají i doprovodnou vizuální identifikaci vozidel.

Mimo systémů používajících akcelerometry a tenzometry pro vážení vozů za jízdy se stále častěji začínají uplatňovat i technologie založené na bázi „fiber optic senzor“ - senzory ze skelných vláken. Optická vlákna při průhybu/zatížení mění své optické charakteristiky a ty jsou následně snímány transpondérem a vyhodnocovány. Z důvodu způsobu uložení se skelná vlákna zatím více uplatňují při vážení za jízdy na silnicích, ale známé jsou i aplikace na železniční trati.

Dále na železnici fungují systémy k detekci závad na vozidlech, jako jsou – indikátor horkoběžnosti ložisek (IHL), indikátor horkých brzd a obručí (IHO) a indikátor plochých kol (IPK)

[4] Ve vztahu k železniční konstrukci je využitelný v podstatě jen indikátor plochých kol. I tyto systémy mají v sobě integrovány prostředky k detekci jednotlivých náprav, ale jedná se o robustní drahé systémy, které vyžadují stavební úpravy, proto je jich také na železniční síti málo a pro systematickou kontrolu je jejich počet nedostačující.

Pro zachování cenově přijatelného modulu pro monitoring železniční konstrukce se proto jeví jako nejvhodnější, přistoupit k identifikaci dvojkolí drážních vozidel na základě vyhodnocení signálu získaného z akcelerometrů. Signál z akcelerometrů není primárně určen pro identifikaci dvojkolí, proto je třeba použít vhodných algoritmů, abychom informaci o poloze železničního dvojkolí v soupravě železničních vozů získali.

V teoretické rovině se problémem identifikace vlakových souprav na základě dat ze snímačů zrychlení (tj. na základě hodnocení vibrací) zabývají i na technické univerzitě v Darmstadtu (Německo). Jejich práce „Sensor Networks for Railway Monitoring: Detecting Trains from their Distributed Vibration Footprints“ [8] přistupuje k problému obdobným způsobem a využívá podobných metod. I pohnutky k vývoji tohoto typu hodnocení jsou stejné – vytvořit dostatečně přesný a levný systém hodnocení. Práce německých kolegů je zaměřena na zatřídění vlakových souprav do 6 kategorií a využívají k tomu mimo jiné i vyhodnocení pomocí SVM – metodu pomocných vektorů.

Problém identifikace železničních dvojkolí na základě dynamické odezvy pojezdu železniční soupravy není zcela triviální, protože výstupní signál zrychlení je ovlivněn mnoha faktory. Nejtěžším vozidlem soupravy (zvláště u nákladních vlaků) bývá lokomotiva, není však samozřejmostí, že by vyvozovala největší dynamické účinky. Lokomotivy bývají velmi dobře udržovány, mívají bezvadná kruhová kola bez defektů. Naproti tomu údržba zvláště u nákladních vagónů je podceňovaná a zanedbávaná, proto také mívají nákladní vagóny nezřídka oválná, případně plochá kola (defekt kola, ploška na jeho obvodu), které se při odvalování chovají jako kladivo, které cyklicky bouchá do kolejnice. Dynamická odezva od pojezdu plochého kola nákladního vagónu může převyšovat dynamickou odezvu tažného vozidla až dvojnásobně. Dalším z problémů při identifikaci drážních vozidel ze signálu zrychlení je například druhý prokmit konstrukce, který nastává pouze občas za specifických podmínek rychlosti a velikosti zatížení vlakovou soupravou. Tento jev zřejmě souvisí s vlastními kmity železniční konstrukce a je třeba jej při vyhodnocení vést v patrnosti.

Složitost hodnotícího algoritmu souvisí také s polohou a množstvím jednotlivých akcelerometrů. Algoritmus může být sestaven a testován i tak, aby poskytl výsledky počtu dvojkolí a stavu konstrukce i na základě pouze jednoho snímače. Taková sestava by však zvyšovala nároky na výpočetní výkon (mimo jiné i zvyšovala cenu vyhodnocovací jednotky), dále z důvodu určení rychlosti pohybu vlakové soupravy by snižovala přesnost výsledků a nebylo by možné určit některé charakteristiky (např. směrovost pojezdu železniční soupravy), je výhodnější a lepší použít měřicí pole akcelerometrů. Již při použití dvou vzájemně synchronizovaných akcelerometrů, umístěných za sebou ve známé vzdálenosti se algoritmus pro určení rychlosti pojezdu železniční soupravy výrazně zjednoduší, a je také již možno určit směr pojezdu dané soupravy.

2. Cíle práce

Cílem práce bylo vytvoření teoretického základu pro **autonomní měřicí modul k měření dynamických účinků** na železniční konstrukci a programového vybavení pro následné vyhodnocení měřených dat. Z měřených dat byl pak stěžejním cílem **vyhodnocení stavu podbití železniční konstrukce**. Získaná data byla však univerzálně využitelná i pro další analýzy železniční konstrukce.

Vizí bylo sestavit autonomní modul, který by byl dostatečně malý a kompaktní, aby jej bylo možno umístit přímo do konstrukce (případně v její blízkosti), a to bez potřeby stavebních zásahů do železniční konstrukce. Modul by měl být schopen samostatného měření více než jen po dobu několika dnů. Uvažovaná délka autonomního měření byla minimálně v řádu týdnů až měsíců bez potřeby lidské obsluhy nebo kontroly zařízení. Ze získaných dat by byla následně vyhodnocována postupná změna parametrů železniční trati v daném místě a byl by též vyhodnocován stav jednotlivých náprav vlakových souprav.

Jednoduchá konstrukce a příznivá cena autonomního modulu by tento modul předurčovala k jeho masivnějšímu rozšíření na celou železniční síť, což by zase umožnilo efektivně sledovat jednak stav vlastní železniční konstrukce, ale také účelně provádět dohled nad provozem na železniční síti. A ze strany správce železniční dopravní cesty by v případě zjištění porušování daných pravidel bylo možné účinně zasáhnout.

Hodnocení dynamických účinků od pojezdu vlakových souprav bylo víceúrovňovým problémem. Jednak šlo o zjištění účinků jednotlivých vozidel na železniční konstrukci – tyto děje byly krátkodobé, spjaté s pojezdem jednotlivých vlakových souprav a za druhé sledování stavu vlastní železniční konstrukce. Proměna stavu železniční konstrukce v čase byla a je dlouhodobou záležitostí. Změna stavu železniční konstrukce vlivem pojezdu vlakových souprav je pozvolná, samozřejmě v závislosti na přenesené zátěži, avšak změna v konstrukci železničního svršku vlivem povětrnostních podmínek probíhá ještě mnohem pomaleji než změny vyvolané pojezdem vlakových souprav. Změna stavu železniční konstrukce proto probíhá rychleji na více zatížených tratích.

V první úrovni problému bylo cílem zaměřit se na vlakovou soupravu jako na budič dynamické odezvy na železniční konstrukci. K řešení tohoto problému bylo nejdříve potřeba identifikovat v měřeném signálu jednotlivá železniční dvojkolí. Dynamická odezva a chování bezvadného kola a kola s nějakým defektem se značně liší, proto bylo následným krokem určení defektních kol ve vlakové soupravě. A aby byla informace o vlakové soupravě jako budiči dynamické odezvy kompletní, přistoupilo se na závěr k určení typu železničních vozů a potažmo k určení typu celých vlakových souprav. I tato informace byla důležitá z pohledu dynamické odezvy, protože rozptýl hmotností u železničních vagónů je běžně větší než u vagónů osobních. Zjišťování stavu železniční konstrukce bylo sice možné provádět na celém souboru vlakových souprav, ale z pohledu rovnoměrnosti rozložení zatížení bylo vhodnější vytvořit výběrovou skupinu sestavenou pouze z osobních vlaků.

Druhou úroveň problému bylo zjištění stavu železniční konstrukce. Z důvodu rozmanitosti vozového parku, velkého rozsahu možného zatížení dvojkolí, stavu dvojkolí, různým rychlostem pojezdu vlakových souprav a dalších ovlivňujících faktorům bylo přistoupeno k hodnocení stavu železniční konstrukce pomocí statistiky. Snahou bylo také snížit

rozmanitost vstupních podmínek posouzení stavu železniční konstrukce, proto byla vytvořena výběrová skupina vlakových souprav a byly posuzovány pouze účinky od pojezdu osobních vlakových souprav, které vykazují více homogenní rozložení zatížení. Ideální byly v tomto směru osobní elektrické jednotky, které mají svou hmotnost rozloženu rovnoměrně po celé délce vlakové soupravy (mnohdy mají trakční podvozky i vložené vozy).

Cílem práce bylo sestavit autonomní měřicí systém, který by byl univerzálně použitelný pro různé aplikace na železnicích (případně by byl využitelný i v jiných oblastech lidské činnosti) a připravit pro tento systém základní vyhodnocovací algoritmy naměřených dat. Cílem bylo dále sestavit takové vyhodnocovací algoritmy, aby i na základě minimálního objemu měřených dat, bylo možno získat co možná nejvíce informací jak o vlakových soupravách, tak i o železniční konstrukci, ale zároveň musely být vyhodnocovací algoritmy dostatečně jednoduché, aby nebylo potřeba při vyhodnocování vysokého výpočetního výkonu.

Aby bylo možné sestavit funkční měřicí systém, který bude dobře plnit svůj účel, bylo nutné se také věnovat studiu fyzikálních jevů v koleji.

Pro vývoj vyhodnocovacího algoritmu bylo třeba postupovat dle předem daných dílčích kroků:

- sumarizace teoretických poznatků v oblasti dynamických dějů v železniční konstrukci
- návrh metodiky měření
 - metodika určení polohy dvojkolí
 - metodika určení defektních dvojkolí
 - metodika určení stavu železniční konstrukce
 - metodika určení typu vlakové soupravy
- návrh použitého matematického aparátu pro vyhodnocení získaných dat
- stanovení kritérií pro výběr vhodné lokality pro měření
- výběr lokality a provedení měření in situ
- vyhodnocení získaných výsledků a analýza zjištěných jevů
- zhodnocení a případná optimalizace použitých postupů
- finální návrh vyhodnocovacích algoritmů pro autonomní měřicí modul

Popsané kroky vedly k vytvoření funkčního prototypu autonomního měřicího modulu, k jeho rozšíření na celou železniční síť však povede ještě dlouhá cesta, a plné nasazení měřicího modulu přesahuje rámec této práce. Tato práce si kladla za cíl stanovit výchozí předpoklady měřicího modulu a ověřit jeho funkčnost.

3. Autonomní měřicí systém

Autonomní měřicí systém byl při zahájení prací na projektu koncipován hlavně pro bodové měření na zkušebních úsecích železničních tratí. Proto byl zprvu vyvíjen pouze datalogger, který by umožňoval veškerá měření při zachování relativně kompaktních rozměrů. Postupem času se však objevila myšlenka další miniaturizace v souvislosti se snahou o minimalizaci potřebné energie k napájení i za cenu snížení počtu měřících kanálů a možnosti rozšířit měřicí systém na větší území a vytvořit tím ucelený diagnostický systém. Snahou bylo vytvořit skutečně autonomní soběstačný systém měření, který by fungoval i bez nutnosti trvalého napájení po dobu několika týdnů nebo měsíců.

Na základě těchto předpokladů byla navržena celá architektura měřicího systému, kde větší jednotky s možností stálého napájení, případně se snadnou výměnou výkonnějších akumulátorů (SB-datalogger), byly doplněny samostatnými autonomními bezdrátovými měřicími moduly (WMP-modul). Z těchto dvou prvků byla sestavena celá měřicí síť. WMP-moduly byly určeny pro zajištění měření v plošně rozsáhlé oblasti. Nevýhoda v menším množství měřících kanálů u WMP-modulů a celkové miniaturizaci se projevila zejména v situacích, kdy bylo třeba vzájemně porovnávat a bez časové prodlevy vyhodnocovat data z více snímačů v reálném čase. V těchto situacích byl pak nasazen na měřicí místo SB-datalogger rozšířený o výpočetní čipovou desku s mikroprocesorem, který zajišťoval sběr dat. Data byla následně zrovna vyhodnoa a byla připravena k odeslání ve formě upozornění o překročení nastavených limitních hodnot správci železniční tratě. Pokud nebylo potřeba vzájemného vyhodnocení snímaných dat, pak bylo možné na jeden měřicí bod osazovat i více WMP-modulů. Typickým příkladem byla sestava dvou WMP-modulů, přičemž jeden měřil a odesílal informace o průjezdu vlakových souprav (datové kanály: 2x trigger + 2x snímání dynamické odezvy) a druhý z modulů zaznamenával povětrnostní podmínky jako byla teplota vzduchu, teplota konstrukce (kolejnice), vlhkost vzduchu, barometrický tlak atd.

Předností navrhovaného systému je jeho snadná rozšiřitelnost o další prvky. Vzhledem k nízké ceně WMP-modulů a skutečnosti, že není třeba stavebních úprav v místě osazení, není problémem kterýkoliv z měřících bodů rozšířit o libovolný počet WMP-modulů. Třeba výše zmíněný příklad měření dynamické odezvy na pražcích jedním WMP-modulem a měření povětrnostních podmínek druhým WMP-modulem, lze libovolně bez vzájemné časové závislosti osadit dalším WMP-modulem pro měření například vibrací kolejnice nebo tenzometrickým měřením napětí v kolejnici.

V případech, kdy bylo potřeba provést měření na více datových kanálech a současně tato data vzájemně porovnat a vyhodnotit, bylo výhodnější použít výkonnější SB-datalogger rozšířený o výpočtový čip místo sestavy více WMP-modulů, protože z důvodu miniaturizace není ve WMP-modulech prostor pro osazení dalšího čipu. Dalším problémem by byl zvýšený požadavek na napájení zařízení, musela by být vyřešena otázka vzájemné komunikace jednotlivých WMP-modulů a v neposlední řadě by se také vytratila jednoduchost celého systému zaváděním přílišného množství modifikací jednotlivých měřících prvků.

Příkladem vícekanálového měření s požadavkem odeslání upozornění správci železniční infrastruktury v reálném čase může být například zjišťování defektů na kolech železničních

dvojkolí. Toto měření probíhalo na šesti po sobě následujících pražcích (bylo obsazeno 6 měřících kanálů), zahájení měření bylo zajištěno pomocí triggrů, které obsadily další dva měřící kanály, a tím byl překročen počet měřících kanálů, který poskytuje jeden WMP-modul. Při použití dvou WMP-modulů (pro zajištění dostatku měřících kanálů pro provedení měření), by muselo dojít k odeslání naměřených dat z WMP-modulů do externí jednotky k vyhodnocení, čímž by se proces vyhodnocení zpomalil a ztratila by se možnost okamžité odezvy správci železniční trati. U výše zmíněného příkladu měření stavu železničních dvojkolí nebylo problémem méně časté měření na železniční síti pomocí SB-dataloggerů, protože stav železničních dvojkolí se v průběhu jednoho průjezdu územím příliš nemění, pokud pomineme zcela okrajové stavy např. prasknutí obruče hnacího vozidla.

Celý systém byl koncipován tak, že SB-datalogger i WMP-modul byly primárně osazeny mikrokontrolery pouze pro ovládání sběru dat. Ty byly následně odesílány do lokálního datového úložiště, kde probíhala archivace naměřených dat, vlastní vyhodnocení a zápis výsledků do připravené databázové struktury SQL.

Byly však i aplikace, které bylo třeba vyhodnocovat v reálném čase a v případě překročení limitních hodnot upozornit hned správce traťového úseku. Aby naměřená data mohla být zpracována a vyhodnocena přímo v měřícím zařízení, bylo nutné vyvinout a odzkoušet vyhodnocovací algoritmy, které musely být dostatečně přesné, ale zároveň i výpočetně jednoduché, protože přídatné výpočetní čipy osazované do SB-dataloggeru příliš výpočetního výkonu pro velmi složité vyhodnocovací algoritmy nenabízejí. Komplexní vyhodnocování dat probíhalo až na počítači v lokálním datovém úložišti.

Měřicí systém nemusí být stoprocentně přesný, protože systém byl založen v případě měření stavu podbití kolejového roštu na získání velkého počtu měření a případná nahodilá chyba je tudíž eliminována statistickými metodami. U defektů dvojkolí byla zase odezva natolik výrazná, že případná nepřesnost v měření nebyla problémem. Rozdíl v naměřených datech bezvadného kola oproti kola s defektem byla násobně vyšší než případná chyba měření a vyhodnocení.

Měřicí systém byl navrhován s cílem v maximální možné míře snížit spotřebu energie pro napájení zařízení, proto byla naměřená data vyhodnocována až v lokálních úložištích s dostupným připojením do elektrické sítě. Jednotlivá měřící zařízení byla navrhována prioritně pouze pro sběr dat. Pro datové přenosy z WMP-modulů byla jednotně zvolena nízkoenergetická datová síť založená na protokolu LoRa®, přenos dat z SB-dataloggerů byl přenášén různými protokoly dle aktuální situace.

3.1. Přenosy dat

Pro funkčnost celého měřícího systému bylo třeba zabezpečit dobré fungování přenosu dat. Přenosy dat mezi zařízeními a datovými úložišti probíhaly ve dvou úrovních. Jednak byl využit standardní internet založený na protokolu TCP/IP a transfer dat z WMP-modulů probíhalo pomocí technologií IoT (Internet of Things). Testování WMP-modulů probíhalo pomocí datových přenosů založených na protokolu LoRa®, ale při uvedení celého měřícího systému do provozu bude možné použít i jiné non-IP protokoly a sítě, které jsou určeny výhradně pro přenosy dat např. speciální úzkopásmovou licencovanou síť Narrow Band (NB-IoT).

Pro funkci systému byly navrženy dva typy datových úložišť. Lokální úložiště bude situováno poblíž měřeného traťového úseku s možností napájení a datového připojení k internetu. Předpokladem je jeho umístění ve stanicích. Lokální datové úložiště bylo do systému zahrnuto zejména z důvodu dosahu LPWAN sítí a přenosu dat z měřících WMP-modulů. Do každého jednotlivého lokálního úložiště budou ukládána vyhodnocená data z přilehlých WMP-modulů, ale i SB-dataloggerů. Přenosy dat z SB-dataloggerů do lokálního úložiště budou probíhat na základě vzájemné vzdálenosti buď pomocí Wi-Fi nebo datovým připojením k internetu, případně i z SB-dataloggerů může být přenos zprostředkován pomocí LoRa protokolu, ale vzhledem k předpokládanému vyššímu objemu dat získaných pomocí SB-dataloggerů se s přenosem pomocí protokolu LoRa® spíše neuvažuje. Přenosy skrz LPWAN pomocí protokolu LoRa® jsou vhodné pro nízkoenergetické přenosy malých objemů dat. U SB-dataloggerů, u kterých se uvažuje s akumulátory o vyšších kapacitách s možností častější výměny, případně s připojením do elektrické sítě, ale také s vyššími objemy přenášených dat se protokol LoRa® neuplatní (přenosy by trvaly neúměrně dlouho). Data budou v lokálním úložišti zpracována a vyhodnocena a správce traťového úseku je následně využije k efektivnímu plánování údržby trati.

V centrálním úložišti (pro každé oblastní ředitelství správce železnic) budou uchovávána data ze všech lokálních úložišť místně příslušných k danému oblastnímu ředitelství. Oblastní ředitelství tak bude mít přehled o železniční infrastruktuře v jeho působnosti a bude moci lépe odhadnout potřebné kapacity pro údržbu trati.

Pro správce železniční infrastruktury nebyly dosud vlivem chybějící legislativy data o stavu kolejových vozidel finančním přínosem, avšak zavedení systémů sledování stavu železničních dvojkolí může iniciovat změnu legislativy. Průjezd vlakových souprav s vadnými koly by do budoucna mohl být zpoplatněn vyšší sazbou za užití dopravní cesty. Průjezdy vlakových souprav s vadnými koly by se řešily na lokální úrovni. Ve stanicích by proběhla vizuální prohlídka defektních dvojkolí, bylo by zaznamenáno evidenční číslo drážního vozidla a byl by uvědomen jeho provozovatel. Ten by následně musel vadné dvojkolí vyměnit a doložit do určeného data, že je dvojkolí opět v bezvadném stavu. V opačném případě by mu byl k poplatku za užívání železniční dopravní cesty připočítán k náhradě ještě příplatek za provozování vozidel s vadnými koly na dopravní síti.

3.2. Funkční vzorky měřícího zařízení

V rámci řešitelského týmu, jehož jsem byl součástí, byly vyvinuty tři typy měřících zařízení. Prvním z nich je SB-datalogger s širokou škálou možného využití s důrazem na komplexnost, druhý menší je WMP-modul s menším počtem měřících kanálů, avšak s důrazem na nízkou spotřebu elektrické energie a maximalizace délky prováděných měření bez nutnosti lidského zásahu a posledním třetím zařízením je WMP-modul spojený s mini-počítačem Raspberry Pi.

3.2.1. SB-datalogger

SB-datalogger je větší ze dvou vyvíjených měřících zařízení. Jeho možnosti měření jsou komplexnější ve srovnání s WMP-modulem a vzhledem k modulové architektuře SB-dataloggeru je možné jej v případě potřeby upravit přesně pro potřeby dané aplikace (např.

rozšířit jej o bluetooth modul, přidat druhou čtečku SD karet apod.). SB-datalogger využívá platformu Teensy s 32bitovým procesorem ARM Cortex-M4, má 12 měřicích kanálů a může snímat analogové veličiny v rozsahu elektrického napětí 5 V až +5 V. Dále je integrován 16 bitový A/D převodník s možností nastavení filtrace signálů. SB-datalogger je čistě měřicí zařízení, u kterého je však možné do jeho struktury začlenit i výpočetní čipovou sadu založenou na hardwarovém řešení Raspberry Zero. Přidání výpočetního modulu do SB-dataloggeru se uplatní zejména tam, kde bude potřeba okamžité vyhodnocení získaných dat.



Obrázek 1- SB datalogger, foto: prof. Ing. J. Smutný

Systém umožňuje snímat časový průběh analogových veličin se vzorkovací frekvencí 100 Hz až 4kHz. Délka snímaného záznamu je omezena pouze velikostí vnitřního datového úložiště a frekvencí odesílání dat do lokálního datového úložiště (po odeslání dat do lokálního úložiště dojde k uvolnění vnitřní paměti zařízení k dalšímu záznamu). Z důvodu synchronizace jednotlivých zařízení je SB-datalogger vybaven hodinami reálného času.

V prototypovém provedení je datalogger osazen dotykovým displejem, ale i a ovládacími tlačítky pro možnost nastavování parametrů dataloggeru přímo na místě použití bez nutnosti připojení k počítači. Při správě většího počtu dataloggerů je však ovládání pomocí tlačítek a displej přímo na zařízení značně nepraktické, a i z hlediska možného poškození tvoří displej slabý článek tohoto řešení, proto se u další vývojové série a ani ve finálním provedení s použitím displej a ovládacích tlačítek již neuvažuje. Ovládání a kontrolní zobrazování měřených dat bude nadále zprostředkováváno pouze bezdrátovým připojením k mobilnímu telefonu a ovládací mobilní aplikaci. Z důvodu komunikace s mobilním telefonem se stane Wi-Fi modul (případně bluetooth) standardní součástí každého dataloggeru.

Elektronika a napájecí baterie jsou umístěny v krabici z tvrzeného plastu, který je odolný povětrnostním podmínkám. SB-datalogger je proto možné umístit přímo do měřené koleje, může být umístěn pod kolejnicí nebo připevněn na pražec, případně na jinou konstrukci v blízkosti měřeného místa. V prototypovém provedení je pro připojení snímačů použito konektorů Sub-D9, které umožňují připojení široké škály senzorů, čidel a případně i dalších aplikačních modulů. V produkční verzi budou SB-datalogger vybaveny konektory účelově pro daný typ úlohy, tedy nejčastěji stíněným dvoužilovým konektorem pro sběr dat z piezo-

nábojových akcelerometrů anebo devíti pinové univerzální konektory LEMO, které jsou prostorově úspornější než použité konektory Sub-D9 v prototypovém zařízení.

3.2.2. WMP-modul

WMP-modul je druhým z vyvíjeným měřících zařízení. U tohoto zařízení je kladen důraz především na nízkou spotřebu energie a dlouhodobé měření bez zásahu lidské obsluhy.

Vzhledem k miniaturizaci měřícího zařízení jsou všechny komponenty měřícího modulu mimo baterie k sobě pevně spojeny, proto pro zřizování měřících bodů musí být postupováno zcela v souladu s navrženou metodikou měření.

Měřící WMP-modul je založen na platformě dsPIC33FJ128MC804, což je 16bit DSP kontrolér firmy Microchip. Řídící komponenta má vestavěnou paměť jak pro obsluhu mikrokontroléru, tak i pro ukládání měřených dat, vnitřní hodiny s reálným časem pro vzájemnou synchronizaci více WMP-modulů při vyhodnocování dat v lokálním úložišti a vnitřní teploměr řídicí jednotky. Provozní teplota WMP-modulu se pohybuje v rozsahu -10 °C až +50 °C.

Další vestavěnou komponentou je anténní modul, který zprostředkovává datové přenosy do lokálního datového úložiště, přenosy jsou založeny na nízkoenergetických sítích IoT („internet věcí“) a protokolu LoRa®.

Poslední komponenta pevně připojená k řídicí jednotce více žilovým kabelem, která tvoří WMP-modul je senzorová destička s MEMS akcelerometrem a vestavěným 16 bitovým A/D převodníkem se vzorkovací frekvencí 2kHz. Vzájemná komunikace čidel a řídicí jednotky měřícího modulu probíhá po sběrnici I2C.

Napájecí napětí WMP-modulu je v rozsahu 2,5 – 12V, maximální odběry proudu v aktivním režimu jsou cca 50mA při napětí 3,3 V.

3.2.3. WMP-modul a mini počítač

Třetím z vyvíjených měřících zařízení je spojení WMP-modulu s minipočítačem pro rychlé vyhodnocování výsledků.

V této variantě je WMP-modul založen na ESP32 mikrokontroléru, funkčně jsou však kontroléry DSP (předchozí WMP-modul) a ESP srovnatelné. Oba kontroléry se liší jen v maličkostech, připojení akcelerometrů a ostatních periférií je u obou kontrolérů stejné. V poslední době zaznamenává rozšíření mikrokontrolérů veliký rozmach a je možno je pořídit v celé řadě různých provedení a konfigurací, a jsou také cenově dostupnou záležitostí. Lze očekávat, že jejich rozvoj a vývoj bude i nadále pokračovat, ovšem lze také očekávat, že jejich současné komunikační rozhraní bude i v budoucnosti zachováno a v současnosti navržená architektura měřící aparatury bude funkční i v následných desítkách let.

Použitý mikrokontrolér ESP32 má celkovou RAM paměť o velikosti 520kB a dvě CPU jádra s taktovací frekvencí 240 MHz. Pro datové přenosy mezi modulem a měřícími čidly je využívána sběrnice I2C, s minipočítačem je mikrokontrolér spojen přes GPIO piny počítače. Pro řízení a sběr dat je tato konfigurace zcela dostačující. Na mikrokontroléru lze provozovat i softwarový systém Micropython, pro následnou analýzu však tyto parametry již nestačí.

Nástavbou oproti samostatnému WMP-modulu je připojení minipočítače Raspberry Pi, který se stará o výpočetní výkon při vyhodnocování výsledků. Počítače Raspberry Pi jsou osazovány pokročilejšími procesory Broadcom BCM2711 s čipovou sadou na bázi Cortex-A72 taktované na frekvenci 1.5GHz. Velikost operační paměti RAM je 8 GB. Mini počítač obsahuje také video výstupy pro připojení k monitoru a USB porty k připojení dalších periférií. Na tomto minipočítači je tedy možno spustit operační systém Linux, pod kterým lze provozovat výpočetní software OCTAVE, který byl použit i pro výpočet navržených algoritmů.

Napájecí napětí mini počítače je 5V, proudový odběr při zátěži se pohybuje ve stovkách mA (300 – 700 mA) a spotřeba při provozu je řádově v jednotkách wattů (1-5W). Pro snížení spotřeby je systém navrhován tak, aby v nečinnosti přecházel automaticky do „stand-by“ režimu.

4. Současný stav řešené problematiky

Předkládaná práce řeší okruhy problémů jejichž společným východiskem je měření dynamické odezvy drážního vozidla na železniční konstrukci. Práce je orientována na využití měření dynamické odezvy pro určení stavu podbití jízdní dráhy, pro zjištění počtu projetých náprav a typu vlaku a stavu vozového parku a jednotlivých dvojkolí. Pro tyto aplikace primárně měření dynamické odezvy určeno není, ale v rámci návrhu jednoduché hodnotící aparatury se tato data snaží využít.

Hlavním účelem a cílem této práce je hodnocení stavu železniční konstrukce, konkrétně stav podbití jízdní dráhy na základě měřené dynamické odezvy vlakových souprav. V současnosti se v České republice kontinuální měření stavu podbití neprovádí. Stav železniční konstrukce se v současnosti hodnotí především průjezdem měřícího vozu ve stanovených intervalech a případně přesným měřením GPK. Častější sledování konstrukcí je prováděno na zkušebních úsecích, ale v naprosté většině se jedná o jednotlivá samostatná měření ke zjištění aktuálního stavu, která jsou následně hodnocena v časové řadě. Systémy kontinuálně hodnotící stav podbití na základě dynamické odezvy měřené na pražcích na tratích v České republice dosud instalovány nebyly.

Konstrukce, u níž je možno provádět kontinuální sledování vibrací v podloží v rámci České republiky, a má tedy blízko k řešené tematice, je výhybka v Prosenicích u Přerova, pod kterou byly v době výstavby do kolejového lože zabudovány měřící kameny vyvinuté na ústavu železničních konstrukcí a staveb Stavební fakulty Vysokého učení technického v Brně panem prof. Ing. J. Smutným. V této konstrukci je možné kontinuálně měřit vibrace přecházející do kolejového lože, algoritmy a měření je však odlišné od předkládané práce, protože v Prosenicích se jedná o měření vibrací uvnitř kolejového lože a předkládaná práce řeší vibrace na patě pražce, potažmo na povrchu kolejového lože. Výstupní signály jsou sice stejné, v obou případech jsou použity akcelerometry, ale útlum vibrací v kolejovém loži, respektive dynamická odezva je ve srovnání s dynamickou odezvou měřenou na patě pražce řádově odlišná.

Stacionárním kontinuálním měřením stavu podbití v širé trati v přímém úseku se u nás dosud nikdo nezabýval a ani v zahraničí nejsou na toto téma publikované odborné práce. Kontinuální stacionární měření dynamické odezvy konstrukce pomocí akcelerometrů se samozřejmě běžně používá, ovšem u jiných typů konstrukcí. Příkladem může být snímání dynamické odezvy a průběžné monitorování stavu slavného mostu Golden Gate Bridge přes Sanfranciskou zátoku v Kalifornii v USA [6]. Na tomto mostě jsou instalovány rovnoměrně snímače zrychlení společně s jednotkami pro bezdrátový přenos.

Snímání stavu železniční konstrukce pomocí akcelerometrů je jak u nás, tak i v zahraničí prováděno převážně na jedoucím vozidle. U nás pomocí již zmíněného měřícího vozu, v zahraničí testují inovativní přístupy vystrojit běžné nákladní vozy potřebnou technikou a senzory a provádět měření stavu podbití pomocí běžně provozovaných nákladních vozů [3].

Pro hodnocení stavu podbití je nutné mít alespoň rámcově informaci o budiči železniční konstrukce, což je v tomto případě vlaková souprava. Ne všechny soupravy jsou však vhodné

pro buzení konstrukce a následné vyhodnocení stavu podbití, proto druhým okruhem práce je zjištění počtu náprav a typu vlaku na základě dynamické odezvy.

Myšlenka využití dat dynamické odezvy vlakových souprav pro určení typu vlakové soupravy se na vědeckém poli již vyskytuje a zabývají se jí jak tuzemské, tak i zahraniční týmy. Každý z řešitelských týmů se tuto myšlenku snaží uchopit svým vlastním způsobem a uzpůsobit výsledky vlastnímu výzkumu. Určení typu vlakové soupravy a jednotlivých náprav je základní výchozí úlohou k řešení dalších problémů spojených s železniční tratí.

Bez vyřešení úlohy typu vlakové soupravy a polohy jednotlivých náprav celá řada dalších měření postrádá smysl, protože ke správné interpretaci výsledků je mnohdy třeba znát působící zatížení čili vlakovou soupravu.

U nás se identifikací vlakových souprav pomocí dynamické odezvy zabývá například řešitelský tým pana doc. Ing. Otty Pláška [4] z ústavu železničních konstrukcí a staveb Stavební fakulty Vysokého učení technického v Brně, který se však soustřeďuje na problémy výhybek.

V zahraniční literatuře stojí za zmínku především práce kolegů z Technické univerzity v Darmstadtu v Německu, která byla zmíněna již v úvodu práce [8]. Tato práce se soustředí na hodnocení typů vlakových souprav, rozlišuje mezi osobními městskými a příměstskými vlaky, regionálními osobními vlaky, nákladními vlaky, samostatnými lokomotivními vlaky a přidává do hodnocení i francouzské a německé rychlovlaky. Němečtí kolegové prováděli svá měření na patě kolejnice pomocí 3-osých MEMS akcelerometrů s mikrokontrolery pro bezdrátový přenos dat. Měření byla prováděna na kolejnicích s uchycením Vossloh W14. Moje zkušenosti ukazují, že je výhodnější umísťovat snímače zrychlení spíše na pražce, protože není nutno pro vyhodnocení filtrovat tak široké frekvenční spektrum získaného signálu.

Posledním řešeným okruhem problémů je sledování stavu vozového parku. Na komerční bázi jsou již vyvinuty systémy sledování stavu železničního dvojkolí, ale s ohledem na požadovanou přesnost vyhodnocení, jsou takové systémy robustní, složité a finančně velmi nákladné. A nad to je pro dané systémy nutná stavební úprava místa. Komerční systémy sledující stav železničních dvojkolí jsou v poslední době postaveny na technologii „fiber optic“ – skelných vláken, ale tyto systémy jsou doplněny i vizuální kontrolou. Takové řešení pak vyžaduje vytvoření napájecího místa, stavebního provedení dohledového vizuálního systému a osazení skříně pro umístění technologií pro vyhodnocování. Výsledky z takového systému mají samozřejmě vysokou vypovídající hodnotu, avšak i vstupní investice a následné náklady na provoz takového systému jsou značně vysoké. Z důvodu své složitosti a finanční náročnosti se komerční systémy sledování stavu železničních dvojkolí dosud na železniční síti neprosadili. Mou snahou, ale i mnohých dalších vědeckých týmů, je vyvinout levnější a použitelnější systém měření stavu železničního dvojkolí, který bude mít přijatelnou míru přesnosti vyhodnocení a bude dostatečně jednoduchý a levný pro snadnou instalaci na železniční síti.

5. Teoretický základ

Abychom pochopili všechny aspekty řešené problematiky, je třeba detailně znát zkoumanou konstrukci, zatížení, které na konstrukci působí a jevy, které dané zatížení způsobuje.

Zkoumanou konstrukcí je železniční dopravní cesta, která se sestává z železničního svršku a železničního spodku. Dynamické účinky od pojezdu vlakových souprav se propisují celou konstrukcí, ale daleko výraznější je v tomto směru interakce drážních vozidel s železničním svrškem. Proto je pro další hodnocení důležitá podrobná znalost především skladby jednotlivých částí železničního svršku.

Budičem konstrukce, který generuje dynamické účinky je vlaková souprava. Pro hodnocení dynamických účinků je nutné znát parametry jednotlivých vlakových souprav, potažmo parametry jednotlivých drážních vozidel, která konstrukci zatěžují. Rozměry dvojkolí jsou unifikovány a je pouze několik málo běžně používaných rozměrů, ale zatížení jednotlivých dvojkolí ve vlakové soupravě může být velmi rozdílné a také jejich vzájemná poloha má v rámci vlakové soupravy vysokou variabilitu.

Pro správné vyhodnocení je důležité rovněž znát fyzikální principy, na kterých funguje vzájemná vazba konstrukce – budič zatížení, respektive železniční svršek – drážní vozidlo.

Nedílnou součástí poznání je také historie vývoje dané problematiky.

5.1. Historie vývoje železnice

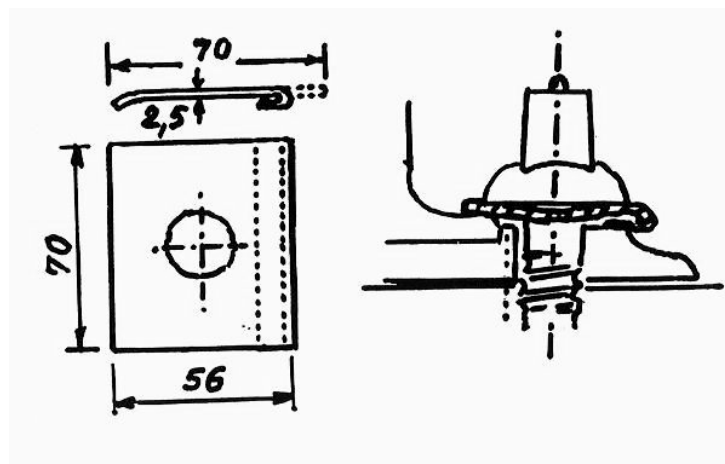
Historie železniční dopravy u nás je spojena s koněspřežnou železnicí na trati Linec – České Budějovice, která byla zkušebně uvedena do provozu v září roku 1827. Tato železnice byla vůbec první železnicí v kontinentální Evropě (první veřejnou železnicí vůbec byla koněspřežka Stockton – Darlington v Anglii, která byla zprovozněna již roku 1821). Rozchod této první železnice u nás byl 1106 mm. Do 70. let 19. století koňská spřežení na této plně nahradily parní lokomotivy.

Na přelomu 30. a 40. let 19. století zahájila stavbu železnic soukromá společnost Severní dráha císaře Ferdinanda, která v roce 1839 zprovoznila úsek Brno – Vídeň, v roce 1841 úsek Břeclav – Přerov a odbočku do Olomouce, v roce 1842 zprovoznila odbočku z Přerova do Lipníka nad Bečvou a do roku 1847 byla trať protažena až do Bohumína.

Od roku 1841 začíná železniční síť budovat i stát a státem postavené úseky se jmenují Severní státní dráha. V srpnu 1845 byla zprovozněna 250 km dlouhá trať spojující Olomouc a Prahu a o čtyři roky později byla zprovozněna spojovací trať Brno – Česká Třebová v délce 90 km a s 11 tunely v trase.

V počátcích byla konstrukce železniční trati tvořena dřevěnými pražci a kolejnice k nim byla připevněna pomocí litinových stoliček, které byli k pražci přibity železnými hřeby a kolejnice byla v litinové stoličce zajištěna dřevěnými klíny. Tato sestava upevnění byla označována jako typ Ib a železniční trať s tímto upevněním vyhovovala zatížení 40 kN na nápravu. Na železničních tratích se zprvu používaly válcované dvouhlavé kolejnice z kujného železa, postupně se začaly používat hlavně na mostech a ve výhybkách Vignolovy kolejnice.

Původní dvouhlové kolejnice z kujného železa postupně nahradily širokopatní ocelové kolejnice, které byly k pražcům přibíjeny hákovými hřebíky. Se zvyšující se traťovou rychlostí a se zvyšujícím se objemem převezené zátěže se postupně začaly používat z důvodu lepšího roznosu sil z kolejnice na pražec válcované nebo odlévané podkladnice. Použití podkladnic umožnilo osazovat kolejnice s úklonem směrem k ose koleje a toto řešení mělo zajistit lepší přenos působících sil mezi kolem a kolejnicí.



Obrázek 2 - Mašíkův plíšek, zdroj: www.spravazeleznice.cz

Po první světové válce, kdy definitivně zaniklo Rakousko-Uhersko, převzal do své správy železnici nově vzniklý Československý stát. V říjnu 1918 vznikly Československé státní dráhy a počátkem roku 1919 vzniklo i nové ministerstvo železnic. V předválečném období bylo u nás zbudováno spousta lokálních a regionálních tratí, fungovalo zde více železničních správ a každá používala různé typy upevnění, různé byly i rozchody kolejnic na jednotlivých tratích. V roce 1919 se tak v železniční síti Československých státních drah nacházelo na 150 různých typů sestav železničního svršku. Československé státní dráhy proto započaly s postupnou unifikací a sjednocováním provedení železničního svršku jak z důvodu efektivnější údržby, snížení nákladů na výstavbu i údržbu železničních tratí, tak i z důvodu snahy zavést větší podíl mechanizace při pracích na stavbě i údržbě železničních tratí.

V průběhu druhé světové války byla poškozena značná část železniční sítě (u nás přes tři a půl tisíce kilometrů tratí) a zničeno bylo též velké množství lokomotiv a vagónů (přes 80 % vozového parku). V poválečném období bylo tedy prioritní obnovit provoz na tratích. Za tímto účelem byly prováděny rozsáhlé rekonstrukce, které byly s ohledem na postupně se zvyšující potřebu přepravní práce od 60. let zaměřeny též na zvyšování traťových rychlostí a s rozmachem osobní přepravy také na zvýšení komfortu cestování. Požadavky na zvyšování přepravní práce a zatížení pokračovaly dále a zejména ve směru východ – západ bylo potřeba posílit výkonnost tratí. V tomto období nastává také rozvoj automobilové dopravy což zvyšovalo konkurenci mezi jednotlivými módy dopravy a urychlovalo výzkum a zavádění nových konstrukcí do provozu. Jednou z nově používaných konstrukcí byla například bezстыková kolej, kterou zkoumal a propagoval již před druhou světovou válkou prof. Ing. Dr. Josef Vaverka, DrSc., který působil na Vysokém učení technickém v Brně. V poválečných letech se stalo Československo jednou ze zemí s největší délkou tratí s bezстыkovou kolejí na světě.

Z konstrukčního hlediska se od začátku 50. let 20. století prosadila na Československých drahách rozponová podkladnice typu T5, která se používala pro upevnění kolejnic tvaru A a T a používala se i následně s nástupem kolejnic S 49 a R 65. Pro kolejnice R 65 byla upravena na podkladnici s označením TR 5. V polovině padesátých let se začaly postupně na československé tratě zavádět betonové pražce v souvislosti s vyšší únosností betonových pražců a také z důvodu úspory dřeva a oceli. Betonové pražce lépe vyhovovaly zvyšujícímu se provoznímu zatížení a vyráběly se ve dvou základních konstrukčních provedeních jako železobetonové nebo z předpjatého betonu. Jejich vývoj zejména v 50. a 60. letech byl v popředí zájmu jednak z konstrukčních důvodů, ale též z důvodu hledání a rozvoje vhodných výrobních technologií. S vývojem pražců šel ruku v ruce i vývoj ostatních prvků železničního svršku. Společně s pražci SB3 z předpjatého strunobetonu a pražci VÚS 62 s ovíjenou výztuží byla vyvinuta rozponová podkladnice T 8, která se však neosvědčila pro značnou lomovitost. Mimo častější defekty rozponových podkladnic T 5 a T 8 byla u těchto podkladnic i náročnější udržení rozchodu a směru kolejnic, což vedlo k vývoji a následně postupnému nahrazování rozponových podkladnic podkladnicemi žebrovými typu S 4 a R 4 se systémem upevnění K.

V roce 1988 byly zahájeny práce na projektu modernizace hlavních tranzitních koridorů, na kterých měla být zvýšena maximální traťová rychlost o 40 km/h na požadovaných 160 km/h (do té doby byla maximální rychlost na železnici 120 km/h). Se zvyšující se rychlostí se ukazovala potřeba snížení tuhosti upevnění kolejnic, která byla provedena použitím pružných svěrek. Z důvodu převratu v listopadu 1989 se práce na projektu protáhly a projekt modernizace koridorových tratí byl dokončen až roku 1993. Změna politického systému měla pro další vývoj železničních tratí jednoznačně pozitivní přínos. Po otevření západních hranic se k nám dostaly v zahraničí již odzkoušené systémy pružného bezpodkladnicového upevnění kolejnic standardu UIC 60. Tento systém upevnění se postupně z koridorových tratí rozšířil i na regionální tratě.

Politický převrat však pro železnici neznamenal jen pozitiva, negativním vlivem byl enormní rozvoj automobilové dopravy po roce 1990 a útlum požadavků po přepravní práci nákladní dopravy na železnici. Dále byl tlak na rušení dotovaného provozu osobní dopravy na železnici a rušení tratí v málo využívaných úsecích. V roce 1994 přijatý nový Zákon o drahách (266/1994 Sb.) připravil pole pro vstup privátních dopravců na národní dráhu a umožnil též privatizaci regionálních tratí. Z dopravců, kteří vstoupili na českou železnici je možno jmenovat například společnosti RegioJet a.s. vlastněnou společností Student Agency, dále dopravce LEO Express Global a.s. nebo třeba společnost Arriva vlaky s.r.o. Z privatizovaných tratí stojí za zmínku trať Čížkovice – Obrnice (přezdívaná též Švestková dráha), kterou koupila v roce 2016 společnost AŽD Praha, zabývající se zabezpečovacími zařízeními nejenom na dráze. Trať koupila s cílem vybudovat zde svůj zkušební polygon na testování nových zabezpečovacích zařízení. V současnosti je na této trati testován provoz autonomních vlaků bez strojvedoucího.

V posledních letech je zaznamenán vyšší důraz na udržitelnost a ekologii dopravy a zvláště železniční nákladní doprava opět nabývá na významu jako ekologický způsob dopravy. S rozvojem vysokorychlostních tratí pro osobní přepravu cestujících a uvolnění kapacit konvenčních tratí pro nákladní dopravu, je téma inovací na železnicích stále aktuální.

Česká republika má jednu z nejhustších železničních sítí na světě s průměrnou délkou 0,12 km tratí na 1 km² rozlohy svého území. Celková délka tratí ve správě Správy železnic je

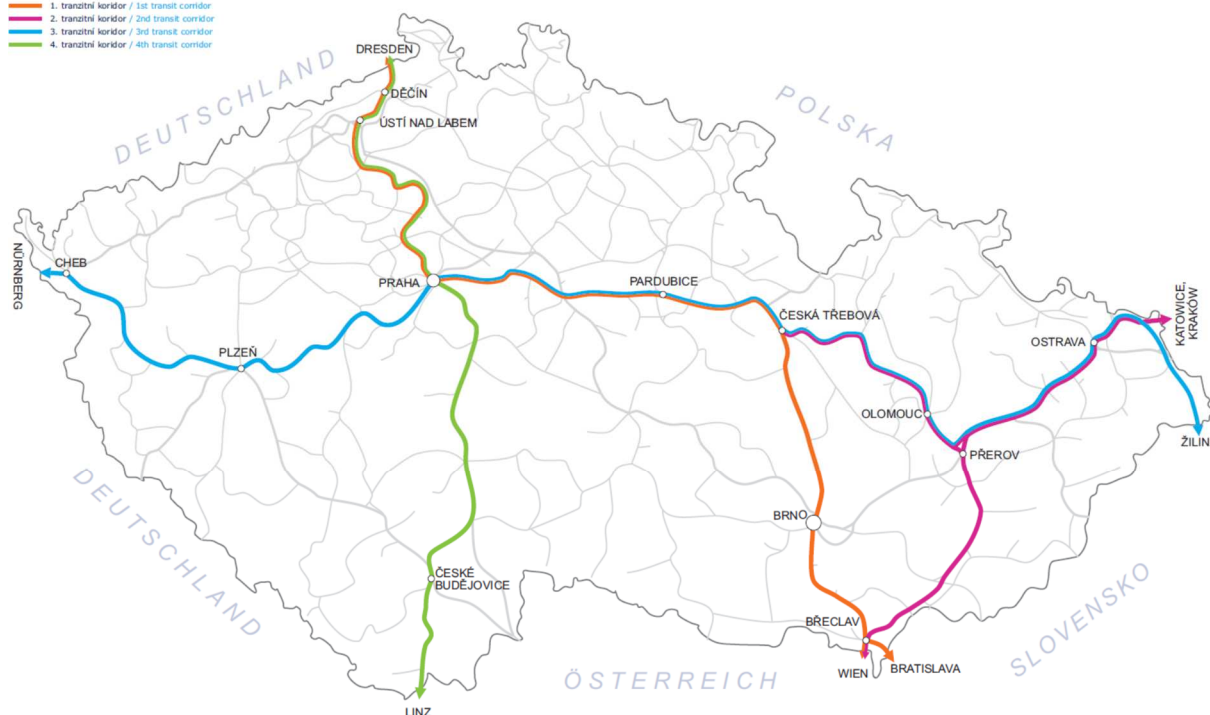
9 377 km (stav ke dni 31.12.2020). Dále se na české železniční síti nachází 6 719 mostů a 166 tunelů, 1 082 železničních stanic a 1 530 zastávek (resp. ve správě SŽ).

Na našem území jsou vymezeny 4 tranzitní železniční koridory, které navazují na panevropské koridory, které jsou definovány jako hlavní dopravní osy v Evropě.

- I. tranzitní koridor Německo – Děčín (st. hranice) – Praha – Pardubice – Brno – Břeclav (st. hranice) – Slovensko
- II. tranzitní koridor Polsko – Petrovice u Karviné (st. hranice) – Ostrava – Přerov – Břeclav (st. hranice) – Rakousko
- III. tranzitní koridor Slovensko – Mosty u Jablunkova (st. hranice) – Ostrava – (Přerov , neprochází přímo stanicí) – Praha – Plzeň – Cheb (st. hranice) – Německo
- IV. tranzitní koridor Německo – Děčín (st. hranice) – Praha – České Budějovice – Horní Dvořiště (st. hranice) – Rakousko

Tranzitní koridory
Railway transit corridors

- 1. tranzitní koridor / 1st transit corridor
- 2. tranzitní koridor / 2nd transit corridor
- 3. tranzitní koridor / 3rd transit corridor
- 4. tranzitní koridor / 4th transit corridor



Obrázek 3 - Tranzitní železniční koridory, zdroj: www.spravazeleznic.cz

Současné požadavky na koridorové tratě:

- trať	elektrifikovaná, 1-3 kolejná
- požadovaná rychlost	160 km/h (nelze však dosáhnout na všech úsecích)
- prostorová průchodnost	UIC GB
- třída zatížení	D4 UIC (22,5 Mpa/nápravu)
- délka předjízdnych kolejí	750 m
- zabezpečení	automatickým blokem, s dálkovým řízením dopravy
- stanice	peronizované s mimoúrovňovými přechody
- přejezdy	mimoúrovňové, minimalizace úrovňových přejezdů

5.2. Železniční konstrukce

Železniční konstrukce je součástí železniční dopravní cesty. Železniční dopravní cesta je prostorem, kudy se pohybují drážní vozidla a zprostředkovávají tím železniční dopravu. Dopravní cesta je zabezpečená trasa umožňující bezpečný pohyb železničních vozidel mezi jednotlivými body železniční sítě a tato dopravní cesta se sestává ze souboru konstrukcí, které mohou být propojeny do homogenního celku či se vzájemně doplňovat. Do souboru železniční dopravní cesty patří zejména jízdní dráha, dále většinou trakční vedení, zabezpečovací zařízení, ale také například nástupiště a nákladové rampy.

Podstatná z pohledu hodnocení dynamické odezvy od drážních vozidel je především jízdní dráha. Ať již jde o klasickou jízdní dráhu s kolejovým ložem, pražci nebo moderní pevnou jízdní dráhu.

Základní rozdělení konstrukce jízdní dráhy bez ohledu na použitou technologii je rozdělení na železniční spodek a železniční svršek.

5.2.1. Železniční spodek

Do železničního spodku patří nejen vlastní těleso železničního spodku, ale také stavby železničního spodku nebo drobné stavby a zařízení, patří sem však také dopravní plochy a obslužné komunikace.

Těleso železničního spodku je tvořeno zemním tělesem, případně dalšími podkladními konstrukčními vrstvami železničního spodku a odvodněním. Stavby železničního spodku jsou takové konstrukce, které přebírají funkci tělesa železničního spodku a zároveň mohou plnit i jiné funkce. Příkladem staveb železničního spodku jsou mosty a propustky, které mimo podpěrné funkce pro jízdní dráhu plní i funkci převedení vodního toku, mimoúrovňové křížení se silničními komunikacemi nebo prostě jen překonání terénní nerovnosti.

Těleso železničního spodku a stavby železničního spodku jsou důležitou součástí celé konstrukce železniční dopravní cesty a s požadavky na vyšší cestovní rychlosti se zvyšují i nároky na tuhost a provedení železničního spodku. Tuhost a kvalita železničního spodku se významně odráží na dynamické odezvě od pojezdu drážních vozidel. Při zvyšující se rychlosti jízdy jsou požadovány též vyšší moduly přetvárnosti na zemní pláni, resp. na pláni tělesa železničního spodku.

Pro novostavby celostátních drah s projektovou rychlostí 160 až 200 km.h⁻¹ je požadován v současnosti dle předpisu S3 [4] modul přetvárnosti na pláni tělesa železničního spodku $E_{pi}=100$ MPa. Se zvyšujícími se nároky na železniční tratě a zejména s příchodem vysokorychlostních tratí s projektovou rychlostí až 320 km.h⁻¹ bude požadavek na modul přetvárnosti ještě vyšší.

Druh tratě	Minimální požadované hodnoty modulu přetvárnosti	
	E_0 [MPa] na zemní pláni	E_{pi} [MPa] na pláni tělesa železničního spodku
Novostavby:		
- celostátní pro rychlost $160 \text{ km.h}^{-1} < V \leq 200 \text{ km.h}^{-1}$	60	100
- celostátní pro rychlost $V \leq 160 \text{ km.h}^{-1}$	40	80
- regionální	**)	**)
Stávající tratě:		
a) hlavní traťové a hlavní staniční koleje na tratích		
- celostátní pro rychlost $160 \text{ km.h}^{-1} < V \leq 200 \text{ km.h}^{-1}$	**)	**)
- celostátních pro rychlost $120 \text{ km.h}^{-1} \leq V \leq 160 \text{ km.h}^{-1}$	30*)	50
- celostátních koridorových pro rychlost menší než 120 km.h^{-1}	20*)	50
- celostátních ostatních pro rychlost menší než 120 km.h^{-1}	20*)	40
- regionální	15*)	30
b) předjízdové koleje ve stanicích na tratích		
- celostátních	20*)	40
- regionálních	15*)	30
c) ostatní koleje ve stanicích na tratích		
- celostátních	15*)	30
- regionálních	15*)	20

Vysvětlivka k tab. 1:

*) Je-li zjištěná hodnota modulu přetvárnosti zemní pláně určená dle čl. 8 této přílohy alespoň 60 % minimální požadované únosnosti E_0 , lze ke zvýšení únosnosti konstrukce tělesa železničního spodku navrhnout výztužné geotextilie nebo geomřížky. Na pláni tělesa železničního spodku však musí být dosažena hodnota modulu přetvárnosti E_{pi} dle tab. 1.

**) požadavky se stanoví individuálně na základě podrobného geotechnického průzkumu.

Tabulka 1- Minimální požadované hodnoty modulu přetvárnosti, zdroj: [24]

Měření dynamické odezvy od pojezdu drážních vozidel je v rámci této práce prováděno na železničních pražcích, hlavním tlumícím elementem je zde kolejové lože, avšak podkladní vrstvy spolupůsobí s kolejovým ložem, a proto má i tuhost podkladních vrstev vliv na výsledné měřené hodnoty dynamické odezvy od pojezdu drážních vozidel.

Při vyšších cestovních rychlostech a s tím související rozšíření užití pevné jízdní dráhy bude růst na významu kvalita a bezvadné provedení železničního spodku. Se zajištěním bezpečnosti na dráze vyvstane potřeba i důslednějšího a rozsáhlejšího monitoringu stavu železniční trati a sledování dynamické odezvy může být jednou z cest.

5.2.2. Železniční svršek

Další částí, která tvoří železniční konstrukci je železniční svršek. Společně s železničním spodkem tvoří jízdní dráhu pro pojezd železničních vozidel. Železniční svršek se skládá jednak ze základní konstrukce tvořené kolejemi, dále jsou součástí železničního svršku výhybky a výhybkové konstrukce, ale může být tvořen i zvláštními účelovými konstrukcemi nebo konstrukčními články.

Základní součásti železničního svršku jsou:

- kolejnice
- drobné kolejivo
- upevňovadla
- kolejnicové podpory (pražce)
- kolejové lože (nemusí být provedeno vždy)

Z výše uvedených součástí se tvoří jednotlivé sestavy železničního svršku. Souhrn těchto součástí, respektive jednotlivé sestavy vztažené k tvaru kolejnice vytváří soustavy železničního svršku.

Typově lze konstrukci železničního svršku rozdělit na dvě základní konstrukční varianty, a to na klasickou konstrukci s pražci a kolejovým ložem a na pevnou jízdní dráhu, která nabývá na významu se vzrůstající rychlostí na železnicích.

Kolejnice

Prvkem tvořícím interakci mezi drážním (železničním) vozidlem a železniční konstrukcí je kolej. Kolej se sestává ze dvou kolejnicových pásů a tvoří pro železniční vozidla jízdní dráhu, po které se tato vozidla pohybují. Kolejnice jsou k podporám uchyceny pomocí upevňovadel, které zajišťují jejich vzájemnou rovnoběžnou polohu a stálý předepsaný rozchod koleje. V České republice je na většině tratí zřízen základní rozchod kolejí 1435 mm, což jsou normálně rozchodné tratě. Můžeme se však u nás setkat i s úzkorozchodnými tratěmi, které jsou ale převážně lokálního charakteru a spravují je skupiny železničních nadšenců nebo soukromé společnosti. Jde zejména o různé vlečky, podnikové a důlní dráhy.

Kolejnice má mimo základní funkce, jimiž jsou přenášení kolové síly na podpory, vedení dvojkolí v příčném směru a prostřednictvím adheze zajištění brzdných a rozjezdových sil, také funkci zpětného silového vedení pro napájení železničních vozidel u elektrifikovaných tratí. Dále také tvoří kolejové obvody pro zabezpečovací zařízení.

V současnosti se pro modernizaci a obnovu kolejového svršku na českých drahách využívají převážně dva typy širokopatných kolejnic, a to tvary vycházející z původního UIC 60

(původní tvar UIC60 je nově značen jako 60E1 a nově zavedený tvar 60E2 s „vypouklejší“ pojížděnou plochou hlavy) a starší S49 (nově označovaný jako 49E1). Kolejnice R65 je v české železniční síti také ještě hojně zastoupena, ale postupně se od ní upouští a její roli přebírají kolejnice založené na typech UIC 60, regenerované kolejnice R65 se používají na méně významných tratích a jako objízdné koleje ve stanicích a výhybnách. Ostatních typů kolejnic jako jsou kolejnice typu T, A nebo Xa je již naprosté minimum.

Z jednotlivých kolejnic se vytváří souvislé kolejnicové pásy, ty mohou být vytvořeny buď vzájemným spojením kolejnic šroubovanými spojkami s ponecháním dilatačních spár mezi kolejnicemi, pak se jedná o stykovou kolej, nebo druhou možností je vytvoření bezstykové koleje svařením jednotlivých kolejnic k sobě. Dilatace je pak zajištěna na přechodu stykovaná kolej – bezstyková kolej a vytváří se pomocí dilatačního zařízení. Tepelná roztažnost kolejí v bezstykové koleji je realizována změnou vnitřního napětí v koleji.

Tvary kolejnic prošly od svého vzniku dlouhým vývojem, od plochých, čtvercových, dvouhlových až po širokopatní. Pro běžnou širokou železniční trať jsou užívány širokopatní kolejnice uchycené k podporám nejčastěji ve sklonu 1:20 nebo 1:40. Širokopatní kolejnice se skládá z hlavy, stojiny a paty. Hlava kolejnice je z boku zkosená v poměru 20:1, uložení na podpory tento sklon vyrovnává, takže jsou vnitřní strany kolejových pásů svislé. Ve výhybkách a kolejových křižovatkách se kolejnice ukládají na podpory bez úklonu, takže tam jsou vnitřní stany kolejnicových pásů ve sklonu dle zkosení kolejové hlavy. Pro výhybky se používá též speciálních tvarů se silnější stojinou. Další běžné typy kolejnic, které se však nepoužívají na železničních drahách jsou například kolejnice žlábkové (užívané na tramvajových tratích) nebo kolejnice jeřábové.

Upevnění

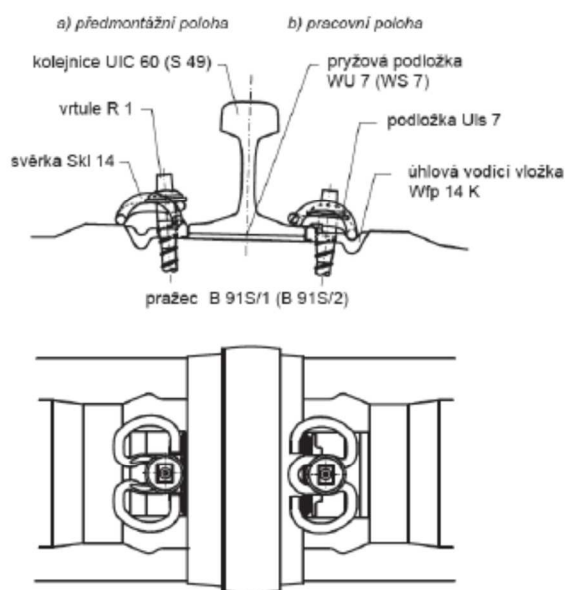
Polohu kolejnic, které vymezují dráhu pohybu železničních vozidel je třeba k podkladu řádně zafixovat, aby spolehlivě odolávaly silám od pojezdu železničních vozidel. Upevnění kolejnic k podporám prodělalo dlouhou cestu vývoje. Od různých druhů pevného upevnění až po současnost, kdy se na více zatížených tratích prosazuje zpružnění v uzlu upevnění.

Do upevnění kolejnic řadíme:

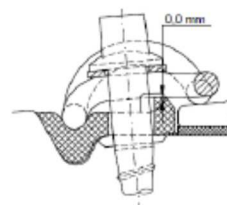
- drobné kolejivo, tj. podkladnice, svěrky, spony, můstkové desky, různé druhy podložek pod patu kolejnice nebo pod podkladnici, izolátory a další.
- upevňovadla, tj. hřeby, vrtule, různé typy šroubů jako jsou pražcové, spojkové nebo svěrkové šrouby, dále podložky a distanční kroužky, zajišťovací kroužky atd.

Upevnění může být:

- přímé, při němž je kolejnice uchycena přímo k podpoře. Při tomto upevnění může a nemusí být mezi kolejnicí a podporu vložena podkladnice.
- nepřímé, při němž je nejdříve uchycena podkladnice k podpoře jedním druhem upevňovadel (nejčastěji vrtulemi) a poté je k podkladnici uchycena vlastní kolejnice pomocí jiných upevňovadel (šroubů)



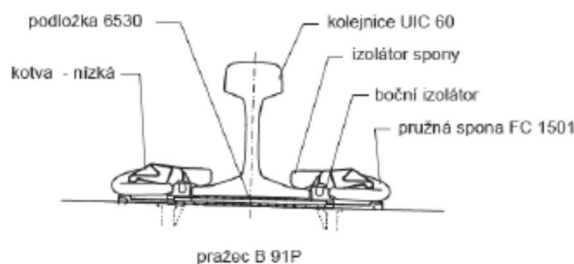
Kolejnice	UIC 60
pražce	B 91S/1
pružné svěrky	Skl 14
vrtule	R 1
podložky pod hlavu vrtule	Uls 7
pryžové podložky pod patu kolejnice	WU 7 // Zw 900NT/1 50 (165 x 160 x 9)
úhlové vodicí vložky	Wfp 14K 600 // Wfp 14KNT
spojky	U 60t
šrouby spojkové a matice	M 24 x 165 a M 24
dvojitě pružné kroužky Fe 6	pod matici spojkového šroubu



Druh pražce	Betonový prážec s hmoždinkami z PA 30SV ⁽²⁾
Způsob montáže	a) Zatačička s nastavitelným utahovacím momentem b) Momentový klíč ⁽¹⁾
Požadovaný stav po montáži	Dosednutí středního ramene svěrky do lůžka plastové úhlové vodicí vložky
Hodnota utahovacího momentu	doporučená 180 - 220 Nm limitní max. 220 Nm
Kontrola správnosti montáže	Pohledem Momentovým klíčem ⁽²⁾
Poznámka	Vrtule musí být před montáží ošetřena předepsaným mazacím prostředkem ⁽³⁾

Obrázek 4 - Upevnění W14, zdroj: [22]

Dále můžeme upevnění dělit také na tuhé a pružné upevnění. Pružné upevnění je takové, při kterém je pata kolejnice trvale přitlačována k podpoře pomocí pružného prvku, kterým může být například spona z kruhové oceli (třeba spona Vossloh Skl14). Pružné elementy mohou mít různé tvary a provedení. Je třeba však rozlišovat pružné upevnění a svislou pružnost koleje, která je v současnosti zajišťována pružnými podložkami vkládanými pod patu kolejnice, případně i pod podkladnici. Pružné upevnění společně s pružnými podložkami zajišťují dohromady zpružnění celého uzlu upevnění.



Kolejnice	UIC 60
pražce	B 91P
pružné spony	FC 1501
podložka pod patu kolejnice	6530
izolátor spony	8494
boční izolátor	7049
kotva Fastclip	7840 (8081)
šrouby spojové	M 24 x 165 a M 24
spojky	U 60t
dvojitě pružné kroužky Fe 6	pod matici spojkového šroubu

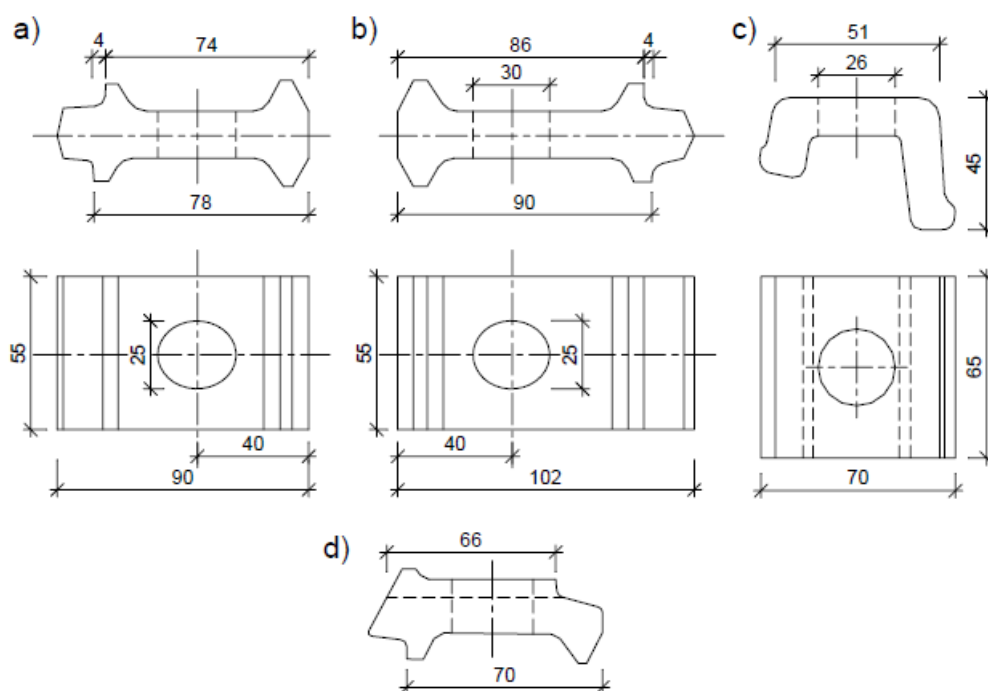
Způsob montáže	a) Montážní ruční páka pro sponu Fastclip b) Stroje pro zasouvání a vysouvání spony Fastclip
Požadovaný stav po montáži	Zapadnutí vybrání na koncích vnějších ramen spony Fastclip na výstupky v kotvě
Hodnota utahovacího momentu	doporučená limitní
Kontrola správnosti montáže	Pohledem
Poznámka	

Obrázek 5 - Upevnění Fastclip, zdroj: [22]

Historicky se používaly zejména dřevěné pražce, které vykazovaly jistou míru pružnosti a také rychlost pohybu železničních vozidel byla podstatně nižší a pojezdem vozidel nevznikaly tak vysoké dynamické účinky jako dnes. Nebylo tedy třeba řešit přenos a útlum dynamických účinků v železniční konstrukci.

V šedesátých letech 19. století, kdy železniční správy začaly přecházet na širokopatní kolejnice, se tyto kolejnice upevňovaly k dřevěným pražcům nejčastěji hákovými hřebíky. Systém upevnění pomocí hřebů byl následně nahrazen systémem upevnění pomocí podkladnic, vrtulí a šroubů, který umožnil zavedení mechanizace při údržbě, což zrychlilo a zefektivnilo celý proces údržby železniční tratě. Upevnění pomocí hřebů se samozřejmě udrželo ještě po nějakou dobu v souběhu s používáním šroubů a vrtulí, protože použití hřebů bylo při výstavbě tratě technologicky jednodušší. Pro zvýšení životnosti železničního svršku a zlepšení roznosu působících sil do podpor se začaly používat na železnici podkladnice, zprvu uchycené hřebíky, ale postupně se prosadilo upevnění pomocí vrtulí. Podkladnice umožnily osazení kolejnice v požadovaném úklonu, prvními používanými podkladnicemi byly podkladnice klínové. S dalším rozmachem železniční dopravy se přešlo k rozponovým podkladnicím, na kterých bylo možné pomocí svěrek upravit a drobně korigovat rozchod kolejí.

Postupem času se od dřevěných pražců přešlo k pražcům betonovým, které mají nižší pružnost, systém podkladnicového uchycení kolejnic k pražcům byl zachován, takže upevnění kolejnic bylo celkově tužší. Rozponové podkladnice postupně nahradily žebrové podkladnice, které byly od roku 1971 zaváděny na českých železnicích v soustavě upevnění typu K společně se svěrkami typu ŽS. Upevnění typu K je v evropském prostoru zcela běžným typem upevnění a využívají ho železniční správy v celé řadě evropských států. Se zvýšením technické vyspělosti betonových podpor (pražců) nemá již použití podkladnic takový význam, a na hlavních tratích se opět přešlo k přímému bezpodkladnicovému upevnění koleje, které je jednodušší.



Obrázek 6 - Svěrky T6, T5, ŽS4 a R1, zdroj: [32]

Se zvyšujícími se nároky na rychlost a zatížení železničních tratí, a s tím související enormní zvýšení dynamických účinků na železniční konstrukci, přestalo tuhé upevnění pomocí žebrových podkladnic vyhovovat a hledaly se způsoby zpružnění upevnění kolejnic, které by lépe absorbovaly a přenášely zatížení od pojezdu železničních vozidel. Hlavní výhodou zpružnění uzlu upevnění v součinnosti s se zvýšením svislé pružnosti koleje je zmenšení nežádoucích vlivů dynamických rázů a vibrací a zmenšení působící síly na úložné ploše pražce nebo obecně kolejové podpoře. Při pružném upevnění je umožněn roznos kolové síly i na okolní pražce. Při použití pružného uzlu upevnění je na pražec pod působišťem kolové síly přenášeno méně než 50 % této síly. Kolová síla se roznáší i na přilehlé pražce a snižují se tak maximální působící síly na železniční svršek a snižují se i absolutní hodnoty sil přenášených do konstrukčních vrstev železničního spodku. Dalším efektem zpružnění uzlu upevnění je zmírnění negativních vlivů způsobených nehomogenitou jízdní dráhy na železniční vozidla.

Podložky, které zajišťují svislou pružnost koleje, jsou vždy uzpůsobeny dané sestavě upevnění. Podložky mohou mít různé tloušťky, tvar a důležitý je i materiál, ze kterého jsou vyrobeny. Na základě těchto parametrů je pak dána výsledná tuhost podložky, a potažmo je tím dána i svislá pružnost koleje. Materiály běžně používané pro výrobu podložek jsou různé pryžové směsi, přírodní kaučuk, etyl-vinyl-acetát (EVA), polyetylén (PE), lehčený polyetylén (penefol) nebo třeba polymerní směs etylen-propylen-dienového kaučuku s mikropóry (EPDM).

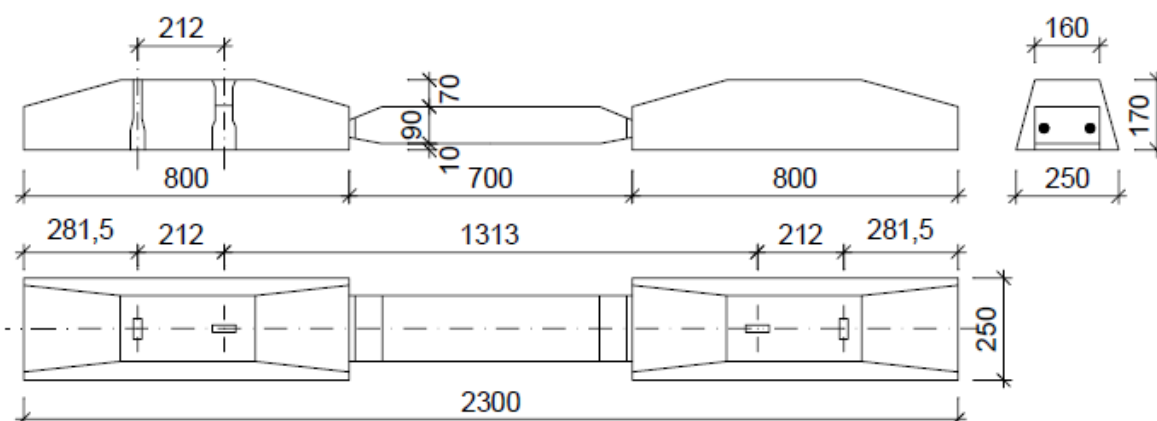
Typy upevnění, které se jsou schváleny pro běžné použití na českých železnicích:

- tuhé podkladnicové
 - upevnění typu K se svěrkami ŽS 4
- pružné podkladnicové
 - upevnění typu KS se svěrkami Skl 24
 - upevnění typu Ke se sponami „e“ a s adaptérem
- pružné bezpodkladnicové
 - upevnění typu W14 (Vossloh) se svěrkou Skl
 - upevnění typu W14NT a E14 je určeno do specifických podmínek
 - upevnění typu FASTCLIP (FC I / FC II, Pandrol), upevnění pomocí spony
 - upevnění typu Y (S15) pro ocelové pražce

Kolejnicové podpory (pražce)

Kolejnicové podpory slouží k vymezení rozchodu kolejnic a k přenosu sil od pohyblivého zatížení pojezdem železničních vozidel do podloží. Působící síly jsou nejen svislé od vlastní tíhy vozidel, ale i podélné od akcelerace a decelerace vozidel a příčné vnikající např. při průjezdu směrovým obloukem.

Kolejnicové podpory mohou být tvořeny příčnými pražci, což je zdaleka nejrozšířenější typ kolejnicových podpor u nás, dále to mohou být podélné podpory nebo samostatné podpory, které nejsou s ostatními podporami pod kolejnicovými pásy spojeny ani podélně, ani příčně, případně jiné speciální druhy kolejnicových podpor (např. rámové podpory). Za samostatný druh kolejnicových podpor lze označit i pevnou jízdní dráhu, což je desková konstrukce, na niž se kolejnicové pásy připevňují přímo pomocí upevnění (pružné, bezpodkladnicové). Pevná jízdní dráha se prosazuje zejména u vysokorychlostních tratí a také ve specifických podmínkách jako jsou např. tunely. V rámci této práce byla prováděna měření na železničním svršku klasické stavby, tj. s podélnými pražci, ale výsledky je možné použít obecně pro jakoukoliv konstrukci. Pouze pro jiné typy konstrukce a podepření je nutné upravit rozsahy výstupních dat a umístění snímačů.



Obrázek 7 - Pražec SB2, zdroj: [32]

Bez ohledu na použitý materiál jsou jednotlivé části u všech pražců principiálně stejné. Kolejnicové pásy se ukládají na horní plochu pražce, přibližně do $1/6 - 1/5$ délky od čela pražce. Tato část se nazývá úložná plocha. U betonových pražců pro širokou trať na normálně rozchodných tratích (rozchod 1435 mm) se délky pražců pohybují v rozmezí 2,3 – 2,6 m, pražce pro výhybky bývají delší. Na délce pražce je zajištěn rozchod kolejnice pomocí uzlu upevnění. Svislá stěna po délce pražce je bok pražce a přenáší podélné síly od rozjezdu a brzdění vozidel. Začátek a konec pražce tvoří čelo pražce, které pomáhá přenášet příčné síly např. ve směrových obloucích. A spodní plocha, kterou pražec leží na kolejovém loži se nazývá ložná. Ložná plocha přenáší svislé zatížení od pojezdu železničních vozidel do kolejového lože (a následně je toto zatížení přenášeno do konstrukce železničního spodku). Ložná plocha přenáší i část podélných a příčných sil pomocí tření.

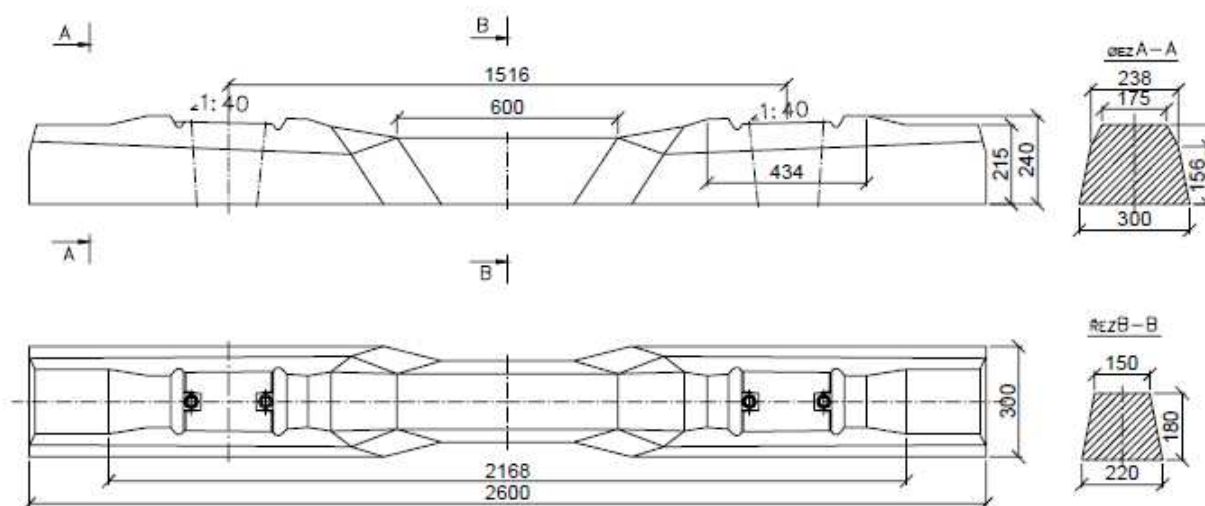
Stejně jako uzly upevnění prošly svými vývojem i kolejnicové podpory a původní dřevěné pražce postupem času vystřídaly pražce betonové. Nedostatky dřevěných pražců se začaly projevovat se zvyšujícími se nároky na zatížení tratí a v souvislosti se zavedením bezстыkové koleje. Problémem u dřevěných pražců nebyla jen nižší životnost uzlu upevnění a možnost použít na dřevěných pražcích pouze složitějšího upevnění s podkladnicemi, problémem byl hlavně nedostatek vhodného dřeva na výrobu pražců. Proto se v 50. letech 20. století začíná prosazovat technologie výroby betonových pražců, a dřevěné pražce byly postupně na hlavních českých tratích nahrazovány pražci betonovými.

Na železnici se používají mimo dřevěných a betonových pražců i pražce z jiných materiálů, jako třeba ocelové pražce. Ovšem z pohledu využití jsou betonové pražce na české železniční síti naprosto nejrozšířenější.

Betonové pražce mohou být monoblokové, dvoublokové, monolitické, článkové, mohou být vyrobeny ze železobetonu nebo z předpjatého betonu. Různých variant betonových pražců je celá řada.

V poslední době se však na hlavních tratích používá zejména monolitický betonový pražec z předpjatého betonu B91 S pro pružné bezpodkladnicové upevnění. Tento pražec má několik variant provedení podle použitého upevnění, a to:

- B91 S/1 upevnění Vossloh, pro kolejnice 60E1 (UIC 60) a R65
- B91 S/2 upevnění Vossloh, pro kolejnice 49E1 (S49)
- B91 S/5 (B91 P) upevnění Pandrol, pro kolejnice 60E1 (UIC 60) a R65



Obrázek 8 - Pražec B 91 S, zdroj: [32]

5.2.3. Kolejový rošt

Kolejový rošt je součástí železničního svršku. Sestává se z kolejnic, upevňovadel, podložek různých typů, obecně drobného kolejiva a příčných kolejnicových podpor. Kolejový rošt přenáší zatížení od pojezdu vlaků do pražcového podloží. Dynamické účinky od pojezdu vlakové soupravy tlumí v kolejovém roštu především podložky, které jsou součástí pružného

kolejnicového upevnění, a to buď pryžová podložka pod patu kolejnice nebo polyetylénová či penefolová podložka vkládaná pod podkladnici. Jedny ze základních charakteristik těchto podložek, které ovlivňují útlum dané konstrukce je statická a dynamická tuhost. Tyto charakteristiky jsou určovány též pro celý systém upevnění. Statická tuhost upevnění k [N/m] je dána poměrem působící síly F (zatížením) a svislým posunem kolejnice z [m] (poklesem ve vztahu k podkladu) v čase t . Tato tuhost je označována i jako pérová konstanta.

$$k = \frac{F(t)}{z(t)}$$

Určení statické tuhosti železničního svršku je dosti složité, protože chování konstrukce není zcela lineární a pro správné určení statické tuhosti systému je třeba určit chování jednotlivých prvků. Jako cesta se jeví určování dynamické tuhosti systému, kdy je zjišťován časový průběh působící síly na mechanický systém s následným vyhodnocením působících deformačních účinků. Postupy pro určení tuhosti upevnění kolejnic uvádí Obecné technické podmínky pro upevnění kolejnic a norma ČSN EN 13146-9+A1: Železniční aplikace – Kolej – Metody zkoušení systémů upevnění – Část 9.

Určování tuhosti sestav upevnění, případně jejich dílčích komponentů lze obecně rozdělit na dva hlavní proudy a to, zjišťování tuhosti na základě statických zkoušek nebo dynamických zkoušek. Dynamické zkoušení prvků můžeme dále dělit na nízkofrekvenční (řádově do 10 Hz) a vysokofrekvenční zkoušení (v rozsahu cca 20 – 450 Hz).

Je důležité vhodně zvolit tvrdost podložek, protože měkké podložky významně tlumí vibrace od pojezdu vlakové soupravy a zamezují jejich šíření z kolejnicových pásů přes upevnění a pražce až do kolejového lože a železničního spodku. Snížením vibračního působení na pražcové podloží se snižuje riziko degradace GPK. Průměrný útlum vibrací použitím měkkých podložek se pohybuje kolem 5 dB, v pásmu kolem 20 Hz je pak útlum o něco vyšší na úrovni kolem 10 dB [51]. Velmi měkké podložky však mají i svá negativa, a to že hůře tlumí vyšší frekvence. To má za následek emitování vyšší hladiny hluku ve venkovním prostředí, a i v budovách je znatelná vyšší hladina zpětně vyzářeného hluku v důsledku nižšího útlumu vibrací ve frekvenčním rozsahu 30 – 200 Hz.

Tlumení mechanických kmitů konstrukce je způsobeno předáním mechanické energie do okolí nebo přeměna mechanické energie na jiné druhy energie. Část energie kmitů se tedy vyzáří ve formě hluku a podstatná část se vnitřně přemění na teplo. V konstrukci buzením narůstá kinetická energie tj. roste amplituda kmitavého pohybu až na úroveň, na které se budičem dodávaná energie rovná energii ztracenou útlumem. Nejvyšší útlum nastává při rezonanci systému v jeho blízkém okolí.

Útlum vibrací D v konstrukci je vyjádřen vztahem [45]:

$$D = 10 \cdot \log \frac{(Z_{M1} + Z_{M2})^2}{4 \cdot Z_{M1} \cdot Z_{M2}}$$

Z uvedeného vztahu plyne, že se zvětšujícím se rozdílem impedancí Z_{M1} a Z_{M2} se bude též zvětšovat útlum chvění. Pokud se budou impedance Z_{M1} a Z_{M2} rovnat, pak bude útlum roven nule.

Konstrukční materiál	Impedance $Z_M [Ns \cdot m^{-3}]$
Ocel	$4,5 \cdot 10^7$
Beton	$7,1 \cdot 10^6$
Dřevo bukové	$2,5 \cdot 10^6$
Přez měkká	$6,3 \cdot 10^4$
Přez tvrdá	$1,5 \cdot 10^6$

Tabulka 2 - Mechanické impedance materiálů používaných v železničních konstrukcích, zdroj:[45]

5.3. Drážní vozidla

Drážním vozidlem se dle vyhlášky č. 173/1995 Sb. rozumí dopravní prostředek, který je při svém pohybu závislý na určité dráze nebo její součásti. Touto součástí se rozumí kolej, trolej, nosné lano apod. V případě trolejbusové dráhy je drážním vozidlem i vozidlo pohybující se vlastní silou poháněné z nezávislého zdroje, které je však primárně určeno pro jízdu s napájením z trakčního vedení.

Přestože je zjišťování dynamické odezvy pomocí akcelerometrů metodou použitelnou v širokém spektru problémů, v rámci této práce je zjišťování dynamické odezvy zaměřeno na odezvu měřenou na pražcích běžné železniční trati. Pro účely této práce je tedy pojmem „drážní vozidlo“ uvažováno kolejové vozidlo pohybující se po železniční trati.

Poznatky této práce by bylo možné po nezbytných úpravách přenést i na další konstrukce, jako jsou třeba tramvajové tratě, avšak s ohledem na dosahované rychlosti na těchto tratích a s ohledem na provezenou zátěž není tato metoda pro tramvajové trati nyní potřebná. Pokud se však na našem území zavedou a rozšíří např. vlakotramvaje, měření touto metodou získá na důležitosti a bude tak možno sledovat i intravilánové tratě.

Problematika drážních vozidel je velmi složitá i s ohledem na širokou škálu různých typů drážních vozidel, jejich určení a funkci. Tato práce pojednává o dynamických účincích drážních vozidel na železniční konstrukci, proto je zcela nezbytné, mít přehled o drážních vozidlech jako takových, a také o možných účincích vyvozovaných na železniční konstrukci. Soubor drážních vozidel můžeme dělit do různých kategorií dle požadovaných kritérií.

Drážní vozidla můžeme dělit dle:

- použité jízdní dráhy
 - konvenční železniční

- úzkorozchodné
 - normálně rozchodné
 - širokorozchodné
 - ozubnicové
 - tramvajové
 - metro
 - lanové
 - pozemní
 - zavěšené
 - visuté
 - MAGLEV
 - jiné
- typu trakce vozidel
 - elektrická
 - stejnosměrná
 - 1,5 kV
 - 3 kV
 - střídavá
 - 15 kV, 16.7 Hz
 - 25 kV, 50 Hz
 - vícesystémová
 - akumulátorová
 - motorová (dieslová)
 - parní
 - vodíková
 - bez vlastní trakce
 - jiná
- typu určení
 - vozy pro osobní přepravu
 - vozy nákladní
 - hrací vozidla
 - speciální stroje (pracovní a diagnostické vozy, atd.)
- typu použitých podvozků a přenosu svislých sil na konstrukci
 - dvounápravové
 - čtyřnápravové
 - více-nápravové
 - jiné

- fyzikálních charakteristik vozů
 - součinitele aerodynamického odporu
 - hmotnosti
 - pohotovostní
 - užitečné
 - celkové
 - na nápravu vozidla
 - maximální konstrukční rychlosti
 - a další

Drážní vozidla jsou budičem dynamické odezvy v železniční konstrukci, kterou sledujeme a následně vyhodnocujeme. Je proto důležité znát, jakou odezvu od drážních vozidel můžeme očekávat. Každé drážní vozidlo je specifické, ať už jde o jeho rozměry, použitý podvozek, hmotnost vypružení, nebo dosažitelnou rychlost. Specifická dynamická odezva je také dána například ojetím a defekty jednotlivých dvojkolí.

5.3.1. Drážní vozidlo – stavba

Stavbu drážního vozidla můžeme rozdělit na skříň a pojezd. Skříň je pak zejména u nákladních vozů možno dále dělit na spodek a nástavbu. U osobních vozů a lokomotiv tvoří většinou rám spodku a nástavba skříně kompaktní celek. V tomto rozdělení skříň představuje základní hmotu drážního vozidla a pojezd zprostředkovává pohyb drážního vozidla po jízdni dráze. I když i pojezdy mají svou hmotu. Např. u nákladních vozů se zatížitelností na nápravu 22,5 t představuje pojezd 10 % celkové hmotnosti nákladního vozu (tj. hmotnosti vlastního vagónu plus maximální přípustné hmotnosti nákladu).

Skříň

Skříň drážního vozidla se skládá z rámu a nástavby, u osobních vagónů a lokomotiv bývají tyto dvě části spojeny v jeden kompaktní celek. Nástavba slouží k uložení a zajištění nákladu, rám drážního vozidla se stará o přenos podélných sil a roznáší hmotnosti nákladu na pojezd.

K rámu jsou připevněna nárazníky a šroubovka s hákem pro spřáhování železničních vozů, případně se o přenos podélných sil starají centrální automatická spřáhla, která se v současnosti na evropském kontinentě začínají prosazovat v osobní dopravě u motorových a elektrických jednotek.

Spřáhla

Problematika spřáhel železničních vozů je dosti složitá a má dopad do mnoha oblastí na železnici. Centrální automatická spřáhla souvisí s předkládanou prací jen okrajově, ale s jejich vývojem a prosazováním na evropské železniční síti lze predikovat budoucí vývoj železničních vozů a směřování železniční dopravy jako celku. Proměna železničních vagónů, především předpokládané zvyšování rychlosti nákladních vlaků v souvislosti s technologickým pokrokem při zavádění centrálního automatického spřáhla s předkládanou prací však již souvisí velmi úzce, protože plně naložené nákladní vozy provozované vyšší rychlostí budou zcela logicky vyvozovat vyšší dynamické účinky na železniční konstrukci.



Obrázek 9 - Šroubovka, zdroj: www.msvmetal.cz

Centrální automatická spřáhla byla zavedena v USA již v 70. letech 19. století. Na přelomu 19. a 20. století byla centrální spřáhla vyvíjena i v Evropě, válečná léta však tyto snahy přerušila. Po druhé světové válce bylo v roce 1953 zavedeno v tehdejším Sovětském svazu automatické spřáhlo SA3, které však postrádá centrování ve svislém směru (ve svislém směru se mohou spřáhla proti sobě vzájemně pohybovat). V 70. letech byla v Evropě učiněna snaha o zavedení centrálního automatického spřáhla, kdy západní část Evropy požadovala tuhé vertikálně centrované automatické spřáhlo, naproti tomu státy bývalého východního bloku v čele se Sovětským svazem prosazovaly kompatibilitu se spřáhlem SA3. Problém tkví v tom, že spřáhlem SA3 nelze automaticky propojit též vzduchové potrubí, případně elektrické vedení, proto snaha o sjednocení centrálního automatického železničního spřáhla na evropském kontinentě vyšla naprázdno.



Obrázek 10 - Automatické spřáhlo SA3, zdroj: cs.wikipedia.org

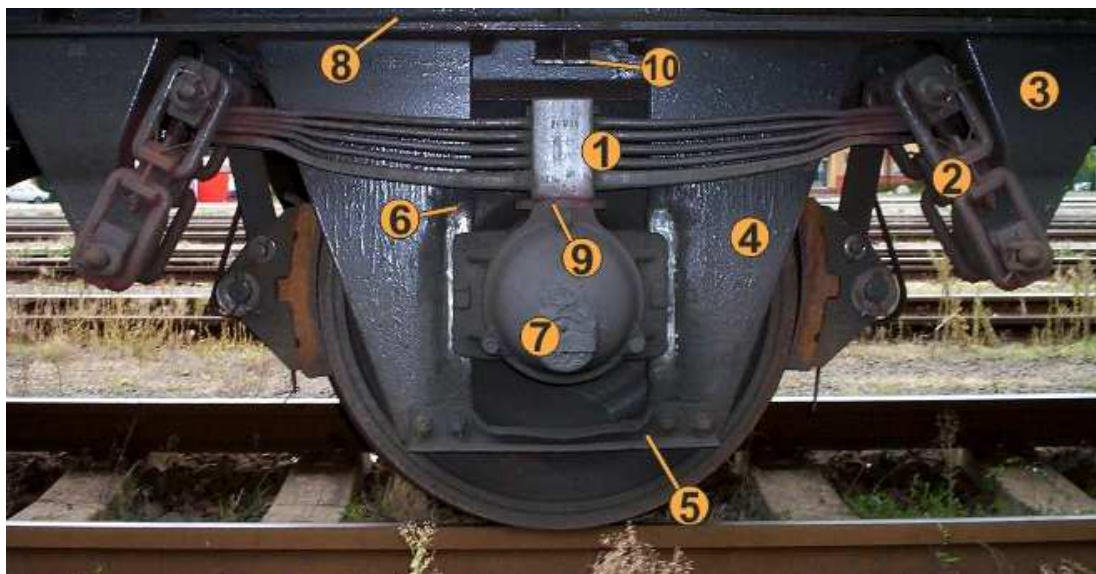
Centrální vertikálně centrovaná automatická spřáhla v sobě skýtají mnoho výhod

- mají v podélném směru vyšší pevnost v tlaku i v tahu oproti standardním spřáhlům se šroubovkou, hákem a nárazníky (automatické spřáhlo typu 10 má předepsáno minimální zatížení v tahu 1000 kN a tlaku 1500 kN, pevnost v tahu je u šroubovky a háku 850 kN)
- zvýšení pevnosti spřáhla společně s lepším brzdným systémem otvírá možnost zvýšení statického zatížení na spřáhlech (s tím souvisí např. rychlejší akcelerace/decelerace, zvětšení maximálních hmotností vlaků)
- umožňují automatické propojení pneumatických a elektrických systémů vlaku
- snížení potřeby lidských zdrojů při vlakotvorbě, zvýšení efektivity, produktivity a bezpečnosti práce
- zvýšení bezpečnosti jízdy zejména v obloucích o malých poloměrech, na výhybkách a kolejových křižovatkách (jednotlivé vozy jsou spojeny pouze v jednom bodě, nevnikají příčné (třecí) síly na náraznících sousedních vozidel a tím jsou redukovány také příčné síly působící na kolej)
- možnost zavedení elektricky ovládaných přímočinných pneumatických brzd, což následně umožňuje lepší a přesnější práci s brzdou silou vlakové soupravy, to zvyšuje jednak bezpečnost (i dlouhý nákladní vlak je schopen zastavit na mnohem kratší vzdálenosti) a také umožňuje vozbu delších a těžších vlaků vyšší rychlostí

Pojezd

Pojezd zprostředkovává pohyb kolejových vozidel, jejich vedení a přenáší zatížení skříně na železniční trať. Pojezdy můžeme rozdělit na rámové a podvozkové. Rámový pojezd má zpravidla dvě nápravy osazené v rámu spodku železniční skříně. Podvozkový pojezd je tvořen samostatným rámem, který obvykle obsahuje také dvě nápravy, ale může obsahovat tři, případně i více náprav.

Rámové uspořádání pojezdu se v současnosti používá v podstatě již jen u nákladních vozů. Pro vypružení rámového pojezdu se používají listové pružnice, které současně zajišťují i funkci tlumení. Rámové pojezdy se používají u nákladních vagónů s rozvorem do 9 m, pro delší rozvory nákladních vagónů se používají již pojezdy podvozkové. Rámové pojezdy jsou užívány pro svou konstrukční jednoduchost a snadnou vyměnitelnost jednotlivých konstrukčních dílů, typově jde zejména o konstrukci dle UIC 517. Tento typ pojezdu je určen pro rychlosti až 120 km/h a nápravové zatížení až 22,5 t.



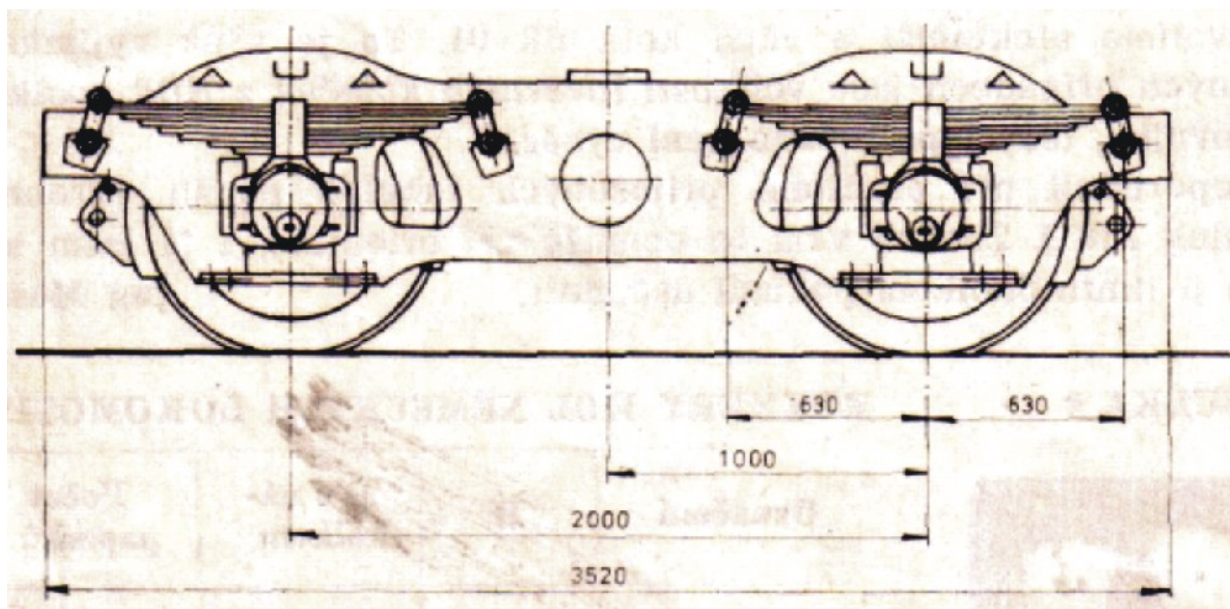
Obrázek 11 - Rámový pojezd UIC517, zdroj: www.vagony.cz

Podvozkové uspořádání pojezdu se používá u všech typů vozidel. Ať už se jedná o hnaná, nehnaná nebo speciální vozidla. U nákladních vozů bývá vypružení vozů pouze primární, u osobních vozů, kde je potřeba zajistit vyšší komfort cestování je vypružení dvoustupňové (primární a sekundární), stejně tak i u moderních lokomotiv bývá vypružení dvoustupňové. Podvozkové pojezdy mohou být kolébkové, pak je skříň usazena na podvozek na čepu nebo torně a dále na postranních kluznicích anebo je podvozek bezkolébkový a skříň je pevně spojena s příčnickem podvozku. Délka vozidel s podvozkovým pojezdem může být větší, protože rozvor náprav v rámci podvozku je menší než rozvor rámového pojezdu bez podvozku. Menší rozvor náprav u podvozkového pojezdu působí menšími příčnými silami při průjezdu obloukem a tím je umožněn snazší průjezd obloukem s menším opotřebením stykových částí.

U nás jsou u nákladních vozů nejrozšířenější podvozky „středoevropského typu“ (26.2.8), podvozek Y25 a odvozené typy a podvozky „trojdílné“ (Diamond). Tyto podvozky mají typicky maximální rychlost při zatížení v rozmezí 100-120 km/h a zatížitelnost na nápravu je až 22,5 t. V rámci Evropy jsou však provozovány i podvozky s vyšší zatížitelností a vyšší maximální rychlostí (např. podvozek AMI III pro hmotnost na nápravu až 30 t a rychlost do 140 km/h), v ČR ale tyto podvozky dosud provozovány nejsou. Lze však předpokládat, že budou snahy zrychlit a zefektivnit i nákladní dopravu v ČR, tím nabývá na významu sledování stavu železniční konstrukce, aby železnice byla stále bezpečným druhem dopravy. Rozvor kol se v těchto podvozcích pohybuje typicky v rozmezí 1800 – 2000 mm.

Podvozky pro osobní vozy jsou konstruovány na nižší zatížení (16 t na nápravu), avšak na vyšší rychlosti (od 120 km/h výše, standardem v dnešní době jsou podvozky pro rychlosti minimálně 160 km/h). Podvozky pro osobní dopravu jsou v současnosti vyráběny výhradně s kotoučovými brzdami, přesto se můžeme ještě u některých dosluhujících vozů v příměstské dopravě setkat i s brzdami špalíkovými, ty ale z osobní dopravy již rychle mizí s vyřazováním zastaralých vozů. Rozvor náprav podvozků pro osobní dopravu je typicky v rozmezí 2300 – 2600 mm, což platí jak pro kolébkové, tak i bezkolébkové podvozky. V osobní dopravě jsou hojně využívány i Jakobsovy podvozky, kdy jeden podvozek nese čela dvou sousedních vozů a tvoří tak v provozu nedělitelnou jednotku. Tyto podvozky bývají konstrukce bezkolébkové a vykazují velmi vysokou tuhost, typickým užitím jsou například vysokorychlostní vlaky ICE 2 s provozně dosahovanými rychlostmi až 280 km/h. Bezkolébkové podvozky pro běžné osobní vozy jsou u nás použity např. u souprav Railjet, které jsou určeny až pro rychlost 230 km/h. Vypružení podvozků osobních vozů je dvoustupňové – primární vypružení představuje vypružení mezi nápravou a rámem podvozků, sekundární vypružení je mezi podvozkem a vozovou skříní.

Tažná vozidla, tedy lokomotivy ať už motorové nebo elektrické využívají stejně jako osobní vozy podvozkových pojezdů. Podvozky tažných vozidel jsou ale konstrukčně složitější, protože jsou v nich zabudovány většinou i trakční elektromotory. Vypružení je dvoustupňové, rozvor náprav podvozků se pohybuje typicky v rozsahu 2300 – 3300 mm. U motorových čtyřnápravových lokomotiv je rozvor obvykle 2400 mm, u dvounápravových 2800 mm, u starších elektrických čtyřnápravových pak 3200 mm. Nejnovější česká elektrická lokomotiva ŠKODA E109 je čtyřnápravová s rozvorem náprav v podvozku 2500 mm.



Obrázek 12 - Podvozek 26.2.8, zdroj: www.vagony.cz

Rozměry rozvorů náprav, vzájemné vzdálenosti náprav, délky vozů po nárazníky atd. je dobré znát, protože určují polohu dvojkolí v rámci vozidla a celého vlaku, a právě dvojkolí je oním přenosovým prvkem, který budí dynamickou odezvu v železniční konstrukci.

5.3.2. Hnací vozidla

Hnací vozidla obecně zprostředkovávají pohyb vlakových souprav. Můžeme je rozdělit dle různých kategorií, nejčastější rozdělení je dle trakce na elektrické, motorové, parní a jiné. Dalším možným dělením je dle určení vozby, zda jsou trakční vozidla určena pro vozbu nákladních vlaků nebo jsou určeny pro osobní dopravu. Z tohoto určení následně vychází konstrukční provedení daného hnacího vozidla. V případě vozby nákladních vlaků jsou hnací vozidla čistě jen samostatné lokomotivy. V případě vozby osobních vlaků mohou mít hnací vozidla vozovou skříň uzpůsobenu i pro přepravu pasažérů, v takových případech hovoříme o elektrických jednotkách nebo o motorových vozech.

Na dynamické projevy v železniční konstrukci má vliv jak rychlost vozidla, tak i hmotnost. U lokomotiv určených pro vozbu nákladních vlaků se hmotnost pohybuje v rozsahu 20,5 – 22,0 t na nápravu, tj. hmotnost čtyřnápravových lokomotiv je 82 – 88 t. Maximální rychlost je 100 – 120 km/h. Lokomotivy pro vozbu osobních a rychlíkových vlaků mají obvykle stejnou hmotnost, ale vyšší dosažitelné rychlosti, např. lokomotiva ŠKODA E109 je určena až pro rychlost 200 km/h (v ČR je dovolená maximální rychlost 160 km/h). Posunovací lokomotivy působící v železničních depech jsou lehčí a méně výkonné, protože pro posunovací službu nejsou vysoké výkony lokomotiv potřebné. U elektrických jednotek mají hnací vozy služební (celkovou) hmotnost 55 – 67 t a maximální dosahované rychlosti těchto jednotek jsou 120 – 160 km/h.



Obrázek 13 – Lokomotiva E109, zdroj: www.zelpage.cz, Mgr. J. Charvát

Elektrické lokomotivy

U nás provozované elektrické lokomotivy pro vozbu vlaků jsou čtyř nebo šestinápravové lokomotivy. Délka lokomotiv přes nárazníky se pohybuje cca od 13 m do 19 m. Brzdy jsou u mnohých lokomotiv ještě špalíkové, u nových lokomotiv jsou však realizovány již většinou brzdy kotoučové, nad to umí moderní jednotky na střídavou trakci brzdit i rekuperací a část elektrické energie jsou schopné vrátit zpět do napájecí sítě.

U nás jsou provozované napěťové soustavy 3kV stejnosměrného napájení a 25kV/50Hz střídavého napájení (trať Bechyně – Tábor s napájením 1,5 kV ss je výjimkou k výše jmenovaným napájecím soustavám). Protože bylo rozhodnuto o sjednocení napájecí soustavy na celém území ČR, dojde postupně k přestavbě všech tratí na střídavou napájecí soustavu 25kV/50Hz, a s tím bude spojena i obnova vozového parku.

Z nových více systémových elektrických lokomotiv, které jezdí po české železniční síti můžeme jmenovat lokomotivu ŠKODA E109 „Emil Zátopek“ (řada 380), lokomotivu Siemens 193 „Vectron“ (řada 383) nebo lokomotivu TRAXX F140 MS (řada 186 a 386).



Obrázek 14 – Lokomotiva Siemens 193 Vectron, zdroj: www.cdcargo.cz

Ze starších lokomotiv jsou u nás provozovány lokomotivy řady 363 a odvozené (163, 263), lokomotivy řady 242 nebo 230 a další.

Motorové lokomotivy

Společným znakem motorové lokomotivy je dieselový agregát, který je hlavní hnací jednotkou lokomotivy. V dalších parametrech jsou již motorové lokomotivy velmi různorodé, ať co se přenosu hnací síly týče nebo rozměrů a hmotnosti.

Malé posunovací lokomotivy jsou nezřídka pouze dvounápravové, s nezávislým mechanickým přenosem výkonu, s maximální rychlostí do 40 km/h a výkonem řádově do 300 kW.

Větší motorové lokomotivy pro posun, ale i pro lehčí vozbu jsou již čtyřnápravové, s maximální rychlostí do 80 km/h a výkonem cca do 600 kW. Zde je již použit hydrodynamický přenos výkonu nebo s elektrickým stejnosměrným přenosem výkonu.

Motorové lokomotivy, které zajišťují vozbu na neelektrifikovaných tratích jsou čtyř nebo šestinápravové diesel-elektrické lokomotivy s výkonem nad 600 kW (cca do 1500 kW), hmotnost na nápravu se u těchto lokomotiv pohybuje do 20 t. Ve srovnání s elektrickými lokomotivami mají nižší výkon, a mají i nižší hmotnost (řádově o 10 t). Pro rozjezd/brzdění nepotřebují tak velký přítlak pro realizaci adhezních sil jako lokomotivy elektrické, které mají 2x až 4x vyšší výkon. Rozvor podvozku u čtyřnápravových lokomotiv je typicky 2400 mm, rozvor mezi dvojkolími podvozku šestinápravových lokomotiv je 2000 - 2100 mm. Délka lokomotiv přes nárazníky je v rozsahu 13,5 – 17,5 m, hmotnost čtyřnápravových lokomotiv se pohybuje v rozmezí 64 – 77 t. Maximální provozní rychlost je podle typové řady 80 – 100 km/h. V Československu byly vyrobeny i motorové lokomotivy řady 759 (původní řada T 499.0) s maximální provozní rychlostí 140 km/h, byly však vyrobeny pouze dva prototypy a do sériové výroby se lokomotiva nedostala (T 499.0001 vytvořila rychlostní rekord motorových lokomotiv u nás 176 km/h).



Obrázek 15 – Lokomotiva 754 „Brejlovec“, zdroj: cs.wikipedia.org, Harold

Z motorových lokomotiv, které zajišťují vozbu vlaků jsou u nás nejrozšířenější řada 753 (lokomotivy přezdívané „Brejlovec“) a odvozené typy a dále řada 751 a odvozené, řada 742 a řada 735.

Elektrické jednotky

Z pohledu dynamické odezvy železniční konstrukce jsou velmi zajímavým typem hnacího vozidla elektrické jednotky, protože jsou středně těžké, ale hlavně dosahují vysokých jízdních rychlostí.

Starší jednotky měly větší rozdíl mezi hmotnostní hnacího vozu a vložených vozů. U řady 451 a 452 byla hmotnost hnacího vozidla 57 t, hmotnost vloženého vozu byla 54% hmotnosti hnacího vozu (34 t). Trend je hmotnosti hnacích vozidel a vložených vozů vyrovnávat. U řady 471 „CityElefant“ je hmotnost hnacího vozidla 62,7 t, u vloženého vozu 72 % hmotnosti hnacího vozu (tj. 45,4 t) a u řídicího vozu se jedná o 75 % hmotnosti hnacího vozu (tj. 47,3 t).

U nových elektrických jednotek dochází k vyrovnání hmotností mezi čelními hnacími vozy a vloženými vozy. Jde o změnu koncepce, při které se i do vložených vozů vkládají hnané nápravy. Ve výsledku tak dochází k rovnoměrnému rozdělení váhy na celou elektrickou jednotku. Centrální spřáhla jsou namáhány menší silou a celkově jsou jízdní vlastnosti souprav vyrovnanější. Rozdíl mezi čelními vozy a vozy vloženými je tak pouze v osazení elektrovýzbroje, která je osazována na čelní vozy soupravy a napájení vložených vozů je následně zajištěno vnitřním kabelovým vedením. Příkladem tohoto uspořádání jsou elektrické jednotky typové řady 440, 530 a 640, které jsou označovány jako „RegioPanter“. Hmotnost ve službě čelních vozů je 53,25 t, hmotnost vloženého vozu je 53,0 t. Maximální rychlost jednotky je 160 km/h. Délka dvouvozové jednotky, tj. řady 550 a 650 je 52 900 mm, délka třívozové jednotky, tj. řady 440, 530 a 640, je 79 400 mm. Délka čelního vozu této elektrické jednotky činí 26,45 m, délka vloženého vozu je 26,50 m.

Další podobnou jednotkou provozovanou na našich tratích je elektrická jednotka řady 680 nazývaná „Pendolino“. Jde o jednotku určenou pro vlaky nejvyšší kategorie (SuperCity, EuroCity a InterCity) provozovaných na IV. transevropském železničním koridoru Berlín – Praha – Vídeň. Jedná se o elektrickou jednotku sestavenou ze sedmi vozů ve složení: čelní trakční vůz (hmotnost 57 t), vložený transformátorový vůz (57 t), vložený trakční vůz (56 t), vložený vůz (44 t), vložený trakční vůz (56 t), vložený transformátorový vůz (57 t) a čelní trakční vůz (57 t). Rozložení hmotnosti po délce vlaku je rovnoměrné, stejně tak je rovnoměrné i rozdělení trakčního výkonu. Hnaný je vždy první, třetí, pátý a poslední sedmý vůz. Maximální rychlost této elektrické jednotky je 230 km/h, na českých tratích je však maximální traťová rychlost jen 160 km/h. Bylo uvažováno s vozbou těchto jednotek i v zahraničí na tratích s vyšší dovolenou traťovou rychlostí, tento plán však v současnosti není naplněn. Pro úplnost je třeba ještě dodat rozměry jednotky a vzájemné vzdálenosti dvojkolí. Délka čelních vozů přes nárazníky je 27 650 mm, délka vložených vozů je jednotně 25 900 mm, rozvor podvozků je 2 700 mm a vzdálenost otočných čepů je 19 000 mm. Použita jsou dvojkolí o průměru 890 mm.

Motorové vozy

Motorové vozy jsou využívány zejména na málo dopravně vytížených lokálních nebo regionálních neelektrifikovaných tratích. Motorové vozy jsou na nich nasazovány z důvodu požadavku na zachování alespoň minimální dopravní obslužnosti s ohledem na ekonomiku provozu. Tyto tratě mají zpravidla členitější jízdní profil a nejsou konstruovány na vysoké rychlosti.

Takovéto tratě jsou obsluhovány často velmi početnou typovou řadou 810 a motorovými vozy z této řady odvozenými případně modernizovanými.

Řada 810 představuje dvounápravový motorový vůz, o výkonu 155 kW s nezávislým hydromechanickým přenosem výkonu. Motorový vůz je konstruován pro rychlost 80 km/h, služební hmotnost vozu je 20 t a délka přes nárazníky 13 970 mm, rozvor náprav činí 8 m. Z pohledu dynamického působení na železniční konstrukci nepředstavuje tento vůz žádnou zvláštní zátěž.

I ostatní vícenápravové motorové vozy mají celkově nižší hmotnost na nápravu než běžné lokomotivy (např. u řady 843 je to 14 t u hnacího vozidla a 7 t u vloženého/vlečného). Maximální rychlost motorových vozů je do 120 km/h.



Obrázek 16 - Automatické spřáhlo Scharfenberg, zdroj: www.zdopravy.cz

Konstrukčně zajímavá z pohledu uspořádání pojezdu je řada 844 „RegioShark“, má uspořádání B'2'B', tj. u krajního podvozku jsou agregátem poháněna obě dvojkolí, která jsou mechanicky spojená, a uprostřed je Jakobsův podvozek spojující obě vozové skříně. Jedná se o šestnápravovou motorovou jednotku, s celkovou hmotností 86 t (tj. průměrně 14,3 t na

nápravu) a maximální rychlostí 120 km/h. Výkon motorové jednotky je 2x 390 kW s hydromechanickým přenosem výkonu. Délka přes nárazníky této jednotky je 43 730 mm (jednotka využívá ke spojování souprav centrální automatické spřáhlo Scharfenberg).

Speciální drážní vozidla

Mezi speciální drážní vozidla lze zařadit všechna vozidla pro údržbu a správu trati, tzn. motorové univerzální vozíky (MUV), strojní podbíječky, diagnostické vozy, kolejové brusky a jiné. Tyto vozy nekonají výkony v dopravní vobě, ale jsou určeny pro správu trati. Při svém pracovním nasazení mění některé z charakteristik železničního svršku, proto je bezpředmětné měření při jejich pracovním nasazení vyhodnocovat. Variabilita těchto strojů je velmi vysoká, obvykle je však zatížení na nápravu do 20 t a transportní rychlost u modernějších vozů do 100 km/h. Na železniční síti nepředstavují tato vozidla nijak početnou skupinu vozidel a není třeba se jimi blíže zabývat.

Ostatní hnací vozidla

Mezi ostatní hnací vozidla jsou zařazena vozidla, jejichž primární trakce je jiná než motorová (diesellová) nebo elektrická.

Parní lokomotivy jsou dnes již historickou záležitostí a na běžných tratích se s nimi lze setkat pouze výjimečně při různých historických jízdách. Ze statistického hlediska nemá zjišťování dynamické odezvy těchto lokomotiv žádný praktický význam. Některé z parních lokomotiv mohou sice jet rychlostí až 120 km/h, ale v současnosti jsou historické jízdy pořádány s nižšími rychlostmi.

Akumulátorové vozy jsou taková hnací vozidla, která ke svému pohonu využívají energie z akumulátorů. Tato trakce není příliš rozšířena, a nad to jsou akumulátorové lokomotivy určeny převážně na posun. Mají malý výkon a dosahují pouze nižších rychlostí.

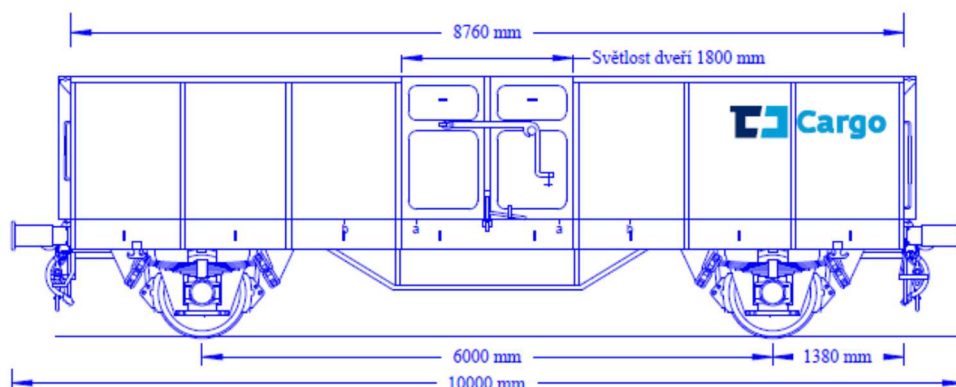
Vozidla na vodíkový pohon je slibně se rozvíjející technologie. V současnosti je tato technologie zatím v začátcích, ale lze očekávat, že se na železnici bude prosazovat stále více a postupně bude nahrazovat diesellové motorové jednotky a lokomotivy. V současnosti byly do provozu dány jak posunovací lokomotivy, tak i jednotky pro přepravu cestujících. Lze očekávat, že se výkonově budou vodíkové jednotky blížit parametrově jednotkám elektrickým. První vodíkové vlaky, které jezdí v Německu, mohou dosahovat rychlosti až 140 km/h.

5.3.3. Tažené vozy – vagóny

Základní rozdělení tažených vozů, které má zásadní vliv na jejich konstrukci, je rozdělení na vozy nákladní a vozy určené pro přepravu osob. U nákladního vozu je pozornost zaměřena na jednoduchost, snadnou opravitelnost a objem přepraveného zboží. Primárním hlediskem při konstrukci osobních vozů je bezpečnost a komfort cestujících.

Nákladní vagóny

Nákladní vagóny s ohledem na množství různých druhů přepravovaného zboží nebo surovin vykazují velkou typovou různorodost. Variací dynamického působení nákladních vagónů na železniční konstrukci je však méně, než kolik je různých typů nástaveb, protože mnohé z nástaveb sdílejí stejnou podvozkovou platformu. I přes to je však variant rozložení podvozků v rámci nákladního vozu značné množství a stejně tak i možného dynamického působení.



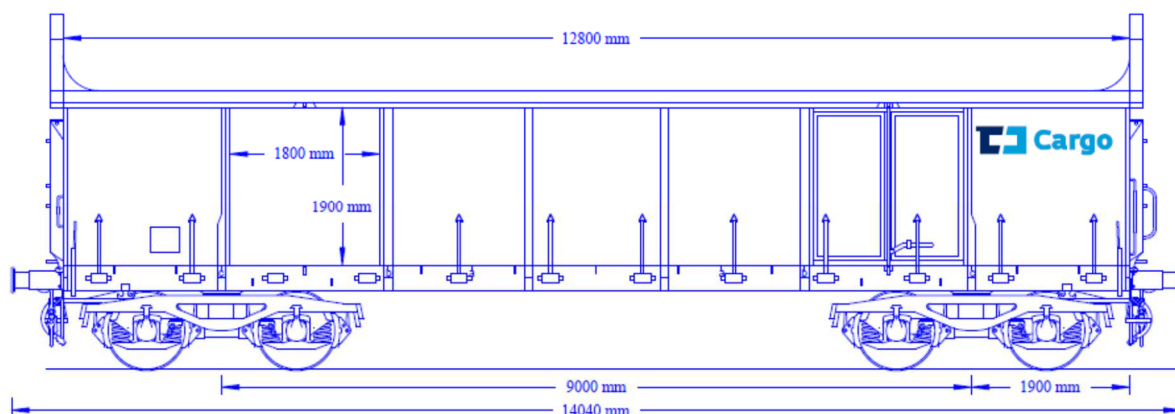
Obrázek 17 - Nákladní vagón typu Es, zdroj: www.cdcargo.cz

U nákladních vagónů se vyskytují jak pojezdy rámové, tak i podvozkové. Nákladní vagóny mají většinou pouze jednostupňové vypružení, a to častěji vypružení primární. Dosud u nás používané podvozky pro nákladní vozy nemají konstrukční rychlost vyšší než 120 km/h, a typické zatížení na nápravu je 20 – 22,5 t, ale v zahraničí jsou v provozu i podvozky s vyšší konstrukční rychlostí i vyšším zatížením na nápravu než 22,5 t.

Jedním z hlavních důvodů, proč nákladní vlaky dosud nejezdí vyššími rychlostmi, jsou vlastnosti jejich brzdového systému a předepsané zábrzdné délky. Dosavadní způsob brzdění je založen na pneumatickém a mechanickém principu. Informace o zahájení brzdění se předává pneumaticky snížením tlaku v hlavním potrubí, což je velmi pomalý přenos informace a u delších vlaků mohou poslední vagóny začít brzdit i se zpožděním 3 s. Při rychlosti 120 km/h znamená čas 3 s projetou vzdálenost 100 m než začnou brzdit všechny vozy. Lze však očekávat, že i v této oblasti půjde pokrok dopředu a i na nákladní vagóny budou instalovány výkonnější brzdy (pravděpodobně s elektrickým přenosem informace o brzdění). Lze tedy očekávat i nadále zvyšování dynamické odezvy nákladních vozů na železniční konstrukci skrze zvyšování jejich jízdní rychlosti.

S brzdovým systémem je ve vztahu k dynamickému působení na železniční konstrukci spojen ještě další problém, a tím je vznik plochých kol nákladních vagónů. Problém plochých kol je problémem u všech železničních vozidel, ale u nákladních vozů je tento problém nejmarkantnější. Častý výskyt plochých kol je dán dvěma faktory, a to použitím špalíkových brzd, kterým s nižší rychlostí roste účinnost, takže se kolo při dobrzdování často zablokuje a je po kolejnici vláčeno smykem, čímž se vybrušuje ploška na obvodu kola. A druhým faktorem je zanedbávaná údržba nákladních vagónů, protože nejsou dosud zavedeny žádné postihy za

nadměrné dynamické zatěžování železniční konstrukce, které by nutily železniční dopravce ke zvýšené údržbě svého vozového parku a udržování vozidel v bezvadném stavu.



Obrázek 18 - Nákladní vagón typu Eanos, zdroj: www.cdcargo.cz

Z pohledu statistického hodnocení některých úloh vycházejících z dynamické odezvy působení železničních vozů na konstrukci železniční trati je problémem i velké užitečné zatížení nákladních vozů. Například hmotnost čtyřnápravového vysokostěnného vozu běžné stavby (řada Eanos) je 22 t, maximální hmotnost nákladu může být až 68 t, což představuje více než trojnásobek hmotnosti prázdného vozu. Vagón v provozu může tedy vážit od 22 t v případě prázdného vozu až po 90 t u plně loženého vozu, z toho následně plyne diametrálně odlišná dynamická odezva pro stejnou rychlost při jízdě prázdného vagónu a plně loženého. Obdobné váhové parametry jsou u železničních vozů pro nákladní dopravu běžné, řada vozů Sgns pro intermodální dopravu přepravních kontejnerů má poměr hmotnosti vozu a možného zatížení ještě vyšší (20 t prázdný vůz, 70 t maximální hmotnost nákladu, poměr vůz vs. náklad je 3,5).

Kombinace variant rozložení podvozků a jednotlivých dvojkolí společně s širokým pásmem možného zatížení jednotlivých nákladních vagónů podpořené různým technickým stavem dvojkolí dává v součtu značný rozsah možných dynamických účinků. Omezujícím faktorem z hlediska dynamického působení na konstrukci je nižší provozní rychlost nákladních vozů (ve srovnání s osobními vozy), ale i v tomto směru lze očekávat postupné zvyšování maximální dovolené přepravní rychlosti.

Osobní vagóny

Dvounápravovými osobními vozy se z pohledu dynamické odezvy není potřeba nijak zvlášť zabývat, protože hmotnost i konstrukční rychlost těchto vozů je poměrně nízká. Nejrozšířenější řadou těchto vozidel byly a ještě stále jsou vlečné vozy Btax⁷⁸⁰, které byly přípojnými vozidly za motorové jednotky řady 810, v současnosti jsou některé z nich modernizovány na vložené vozy např. motorové jednotky 814 „Regionova“. Maximální konstrukční rychlost vozů Btax⁷⁸⁰ je 80 km/h, hmotnost prázdného vagónu je 15 t a hmotnost obsazeného vozu pak 20 t. Vnější rozměry jsou stejné jako u hnacího motorového vozu 810, tj. délka přes nárazníky 13 970 mm a rozvor náprav 8 000 mm.

Pokud odhlédneme od samostatných vlečných vagónů motorových osobních vozů, které se používaly a používají na lokálních tratích s malým počtem cestujících, můžeme říci, že

zbývající část vozového parku osobních vagónů vychází dle standardů UIC 567 z typových řad Y, X a Z. Řada Y byla v 60. letech 20. století východoněmeckým standardem osobních vozů s délkou vozu 24,5 m. Tento standard převzaly státy ve sdružení RHVP, u nás se vozy typu Y vyráběly až do roku 1991. Oproti tomu v západním Německu byly vyráběny již od 50. let 20. století rychlíkové vozy s délkou vozů 26,4 m přes nárazníky, z nichž následně rozměrově vyšly vozy standardu UIC X. Ty se po roce 1976 přestaly vyrábět a byly nahrazeny typovou řadou UIC Z. Vnější rozměry skříňové typové řady Z zůstaly zachovány s řadou X, délka vozů je tedy 26,4 m, rozdíly jsou zejména ve vnitřním komfortnějším vybavení. Řada Z se stala standardem jak na české železnici, tak na celé evropské železniční síti.

Rozměrově jsou provozované osobní vagóny ve dvou rozměrech, a to typová řada Y s délkou přes nárazníky 24,5 m, tyto vozy mají vzdálenost otočných čepů podvozků 17,2 m a druhou provozovanou řadou je řada Z s délkou přes nárazníky 26,4 m a vzdáleností otočných čepů podvozků 19,0 m. Hmotnost obsazeného osobního vozu se pohybuje v rozmezí 40 – 56 t, podle konkrétního typového provedení vagónu.

5.4. Dynamické děje v koleji

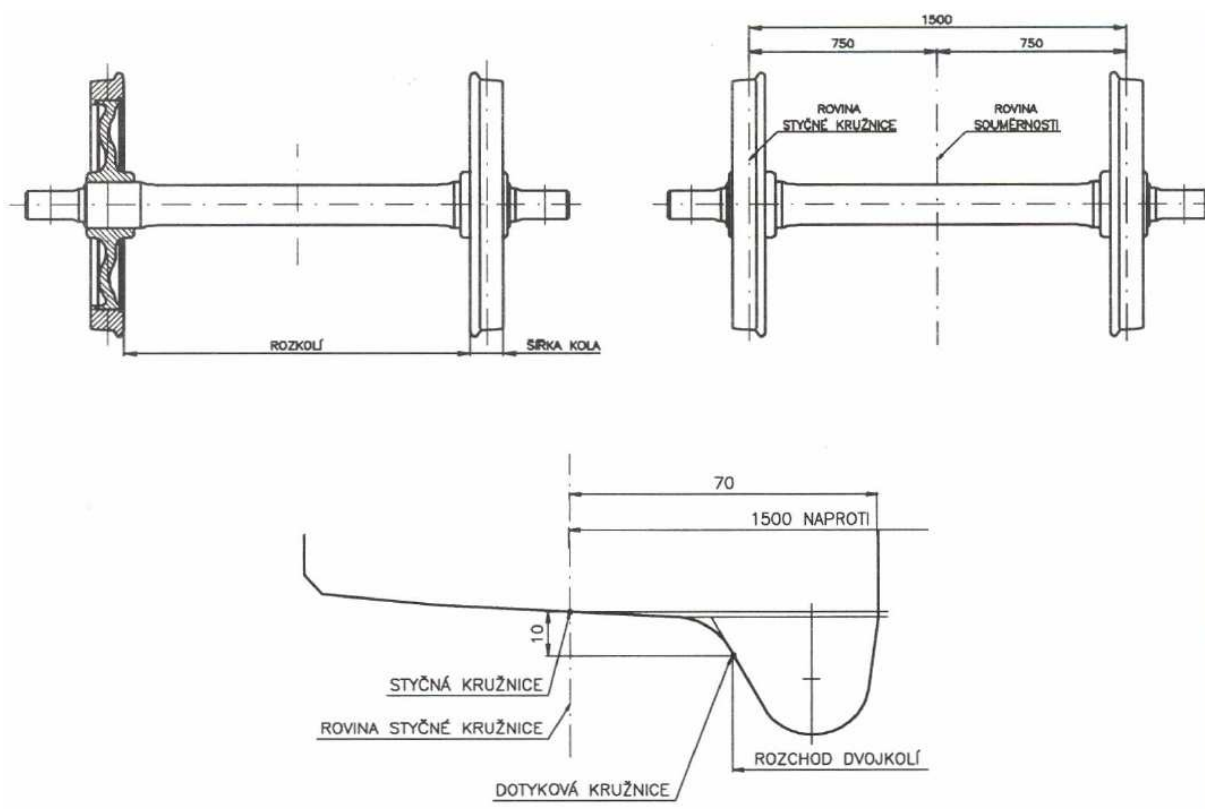
Od pojezdu kolejových vozidel vzniká v konstrukci železniční tratě dynamické zatížení, jehož účinky se šíří celou konstrukcí od kolejnicových pásů přes upevnění, pražce do kolejového lože a následně do konstrukce železničního spodku a do podloží. V místě buzení na styku kolo – kolejnice je zastoupeno široké spektrum frekvencí mechanického kmitání, které se s postupující hloubkou utlumuje a frekvenční rozsah kmitání se zužuje. V úrovni kolejnicových pásů se část vybuzených dynamických účinků vyzáří do prostoru v podobě hluku, tj. podélných vln mechanického kmitání o vyšších frekvencích. Čím hlouběji v konstrukci sledujeme účinky, tím více začínají dominovat nižší frekvence a prostředím se šíří zejména vibrace. Protože se jedná o vibrace způsobené technikou používanou člověkem, hovoříme v souvislosti s těmito vibracemi o technické seismicitě.

Buzení železniční konstrukce v čase lze chápat jako soubor různých dějů, které se vzájemně sčítají. Zatížení od kolejové dopravy je periodické (např. rotační pohyb železničního dvojkolí), rázové (např. vystředování železničního vozu v jízdní dráze) a stochastické (způsobeno náhodnými jevy, třeba imperfekcemi kola či kolejnice).

5.4.1. Vozidlo a kolej

Vozidlo

Základním prvkem, který zprostředkovává přenos veškerých působících sil z vozidla na kolejnici, je dvojkolí kolejového vozidla. Dvojkolí je tvořeno nápravou, na kterou jsou nalisovány dvě kola, která jsou v současné době u železničních vozů již převážně celistvá (dříve se používaly i obručová kola, u kterých byla na disk za tepla natahována obruč). Složená kola se na železnici téměř nepoužívají, setkat se s nimi lze výjimečně na vozidlech tramvají nebo metra.



Obrázek 19 - Rozkolí, zdroj: [49]

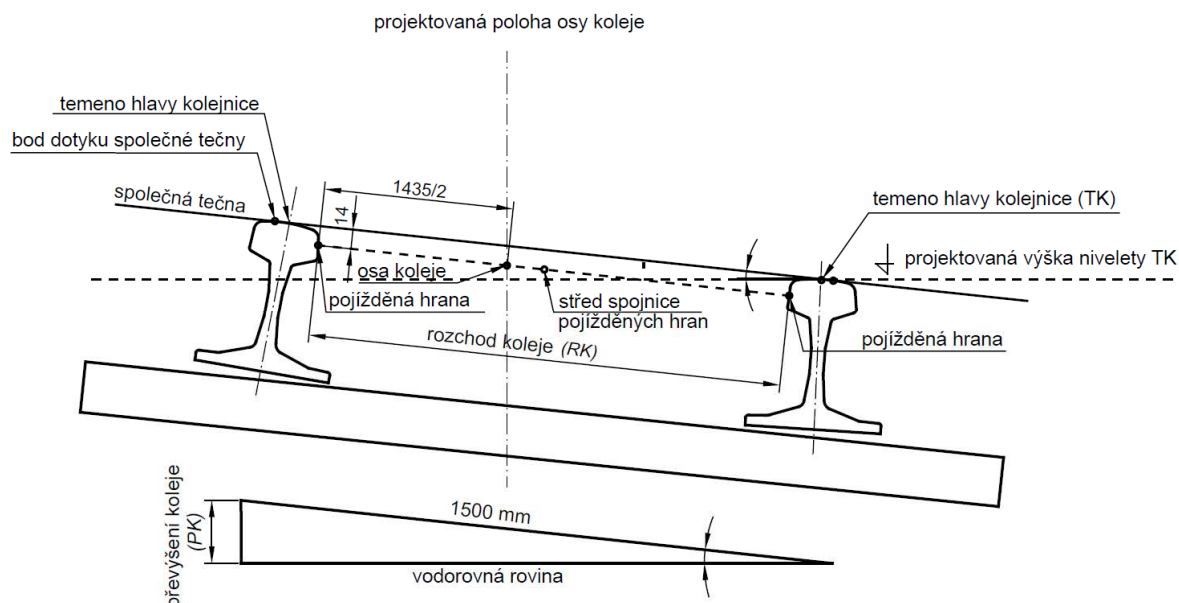
Pojížděná kónická část kola (běhoun) je cca o 20 % tvrdší než kolejnice, tím dochází k zatlačování kola a k elastické deformaci kolejnice. Vzniká tím jízdní plocha, ve které se dotýká kolo kolejnice. Kontakt kola a kolejnice může být jednobodový, tj. v přímé nebo v obloucích o velkých poloměrech, kdy je pojížděno pouze temeno kolejnice, nebo dvoubodový v případě průjezdu kola obloukem, při kterém přichází do kontaktu s kolejnicí i okolek.

Přestože je materiál pro výrobu kol tvrdší, než materiál kolejnic, dochází pojezdem kolejových vozidel k postupnému opotřebení jejich kol. Tvary jízdních obrysů železničních kol prodělaly postupný vývoj od počátečních válcových kol, přes kuželové tvary obrysů kol až po křivkové obrysy, které vycházejí právě z jízdy opotřeбенých tvarů obrysů kol.

Tvar obrysu kola ovlivňuje chování kolejového vozidla v jízdní dráze, a to se následně přímo odráží na dynamické odezvě daného kola. V současnosti jsou v České republice používány například obrysy kol typu ORE S1002, ZI-3 nebo ZI-4.

Kolej

V současné době jsou železniční dráhy navrhovány v souladu s normou ČSN 73 6360 Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha (Část 1: Projektování, Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba). V této normě jsou uvedeny všechny důležité parametry pro stavbu koleje, jako jsou rozchod koleje, převýšení koleje, úklon kolejnicového pásu a další.



Obrázek 20 - Grafické znázornění definic veličin konstrukčního a geometrického uspořádání koleje, zdroj: [17]

Vzájemnou souběžnou polohu kolejnicových pásů určuje rozchod koleje, který je u normálně rozchodných tratí v přímé dán jmenovitou hodnotou 1435 mm. Reálná hodnota se však v konkrétním místě trati může od jmenovité hodnoty mírně lišit z důvodu nepřesnosti při montáži koleje (např. montážní tolerance upevnění), ojetím hlav kolejnic, pružnou změnou polohy při pojezdu vozidel, nicméně i tato reálná hodnota rozchodu musí zůstat v rámci přesně daných tolerančních rozsahů.

V obloucích s poloměrem menším než 275 m se zřizuje rozšíření rozchodu koleje, a to maximálně o 16 mm. Rozšíření se provede posunutím vnitřního kolejnicového pásu blíže ke středu směrového oblouku. Vnější kolejnicový pás zůstává beze změny.

Rozchod dvojkolí je oproti rozchodu koleje menší, a proto má železniční vozidlo při pohybu po koleji jistou stranovou vůli. Profil železničního kola vychází z kuželové plochy, proto je jednou z jeho vlastností vracet se v koleji do středové polohy. Pohyb dvojkolí v koleji je dán rozsahem od rovnovážné polohy dvojkolí po kontakt pravého okolku železničního kola s kolejnicovým pásem a od rovnovážné polohy dvojkolí po kontakt levého okolku železničního kola s kolejnicovým pásem. Rozsah pohybu osy souměrnosti dvojkolí od rovnovážné polohy ke kontaktu okolku s kolejnicovým pásem je značen δ a může být realizován na jednu nebo na druhou stranu. Výsledný rozsah je tedy 2δ a střed souměrnosti dvojkolí tím vymezuje pomyslný rozchodový kanál (někdy také označován jako volný kanál koleje), v rámci kterého se střed souměrnosti dvojkolí při jízdě pohybuje.

5.4.2. Jízda kolejového vozidla

Pohyb volného dvojkolí v koleji je dán především tvarem obrysové křivky kola a tvarem obrysu hlav kolejnic, poloze upevnění kolejnic a geometrií dvojkolí. Toto jsou základní charakteristiky, které určují kontaktní geometrii na styku kolo – kolejnice. Dalšími parametry,

které ovlivňují jízdu dvojkolí po koleji jsou hmotnost kolejového vozidla, jeho rozměry, osazení dvojkolí do pojezdu a způsob vedení dvojkolí kolejí (rámové a podvozkové pojezdy, případně natáčení podvozků do směrových oblouků), způsob vypružení a tlumení pojezdů vozidel, rychlost jízdy, a další. Pohyb dvojkolí v koleji mohou ovlivnit i povětrnostní podmínky, které mění skluzové charakteristiky kolo – kolejnice (pro zmírnění negativních dopadů jsou například trakční vozidla vybavena písečníky s pískem pro zvýšení adheze).

Jízda v přímé

Při jízdě železničního vozidla v přímé koleji nebo ve směrovém oblouku o velmi velkém poloměru nepůsobí na železniční dvojkolí žádná příčná síla, která by železniční dvojkolí vedla. Za ideálních podmínek, pouze v přímém úseku s dokonalým vystředěním železničního dvojkolí, by se dvojkolí mohlo pohybovat pro přímkové trajektorii. Tento stav však v reálu nenastává ať již imperfekcemi při uložení kolejové trati nebo jen vzájemným navázáním přímých úseků s úseky v obloucích. V reálu tedy dochází k vychýlení dvojkolí z centrické polohy a díky křivkovému profilu kola založeném na kuželové ploše se kolo snaží zaujmout opět svou výchozí polohu. Při vychýlení z centrické polohy se jedno kolo dvojkolí pohybuje po kružnici s menším poloměrem a urazí menší vzdálenost než druhé kolo dvojkolí, které se pohybuje po kružnici s větším poloměrem a urazí za stejný čas větší vzdálenost, tím dochází k natočení dvojkolí v rozhodovém kanálu a změně vzdálenosti styčných ploch od středu dvojkolí a tím pádem i ke změně poloměrů, po kterých dané kolo dvojkolí obíhá. Při pohybu se poloměry pojížděných kružnic kol dvojkolí plynule a cyklicky mění a střed dvojkolí cyklicky opisuje uvnitř rozhodového kanálu oblouky v podobě sinusoidy.

Pohyb dvojkolí lze s drobnými zjednodušeními vyjádřit i matematicky. Mějme dvojkolí sestavené ze dvou kuželových ploch a přímou jízdní dráhu tvořenou dvěma kolejnicemi s konstantní vzájemnou vzdáleností. Pokud je dvojkolí vystředěno, poloměr styčné kružnice r obou kol je shodný.

$$r = r_1 = r_2$$

Vzájemná vzdálenost styčných kružnic je $2s$, úhel kuželovitosti jízdní plochy kola je γ .

Při příčném vychýlení dvojkolí z rovnovážné polohy o hodnotu y , dojde ke změně poloměru styčných kružnic o Δr , a nové poloměry styčných kružnic budou $r \pm \Delta r$.

$$\Delta r = y \cdot \operatorname{tg} \gamma$$

$$r_1 = r + \Delta r$$

$$r_2 = r - \Delta r$$

Pro valení osy souměrnosti dvojkolí platí stejný poměr, jako při valení styčné kružnice v poměru ke vzdálenosti v vrcholu kuželové plochy.

$$\frac{r}{R} = \frac{\Delta r}{s}$$

Křivost spojitě křivky v daném bodě o souřadnicích x, y je dána vztahem:

$$\rho = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Křivka pohybu osy souměrnosti železničního dvojkolí je plochá, proto lze zanedbat první derivaci.

$$y'' = \rho = -\frac{1}{R} = -\frac{y \cdot \operatorname{tg} \gamma}{r \cdot s}$$

Řešením je pohybová rovnice

$$y = A \cdot \sin Bx$$

Výslednou trajektorii pohybu osy souměrnosti dvojkolí můžeme zapsat ve tvaru:

$$y = y_0 \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{\operatorname{tg} \gamma}{r \cdot s}} \cdot x \right)$$

Protože se jedná o harmonický periodický pohyb vyjádřený sinusoidou, představuje jedna perioda zvětšení argumentu funkce sinus o 2π . Jedna perioda odpovídá délce jedné vlny L .

$$L = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{s \cdot r}{\operatorname{tg} \gamma}}$$

Volné dvojkolí, pokud na něj nepůsobí vnější síly, vykonává harmonický periodický pohyb po sinusové křivce, přičemž jsou všechny vlny při pohybu stejné. Základní charakteristiky vlnivého pohybu dvojkolí jsou

- délka vlny osy souměrnosti dvojkolí nezávisí na velikosti rozkmitu, amplituda rozkmitu pro pohyb osy souměrnosti konkrétního dvojkolí zůstává stále stejná
- délka vlny nezávisí na rychlosti pohybu dvojkolí, resp. železničního vozidla, se zvyšující se rychlostí se úměrně zvyšuje frekvence příčného kmitání dvojkolí

$$f = \frac{v}{L} \quad \text{případně} \quad f = \frac{V}{3,6 \cdot L}$$

- jen malá závislost délky vlny na parametrech železničních vozidel (průměru železničního kola)

Délka vlny je ovlivněna zejména úkosem jízdní plochy, tj. úklonem kolejnice a tvarem jízdního obrysu železničního kola. Při snižování úklonu jízdní plochy se sinusová vlna prodlužuje (hypoteticky pro válcová kola je úklon 0 a délka vlny se prodlouží na nekonečno, tedy na přímku) a při zvětšování úklonu se naopak sinusová vlna zkracuje.

Poznatky o chování železničního dvojkolí mají vliv na navrhování železničních vozidel, které zase zpětně působí na železniční konstrukci. Při zvyšování rychlosti jízdy vozidla se postupně zvyšuje frekvence sinusových kmitů železničního dvojkolí, které jsou přenášeny dále na železniční vozidlo. Jak z pohledu konstrukce železničních vozidel, tak i z pohledu konstrukce jízdní dráhy je nejdůležitější znát frekvenci, při níž dochází k rezonanci mezi kmitáním dvojkolí a vlastními kmity vozidla. V okamžiku rezonance, která určuje kritickou rychlost, nastává výrazný nárůst dynamických účinků na železniční konstrukci a jízda vozidel se stává méně stabilní (v krajním případě hrozí riziko vykolejení vlakové soupravy). Snahou je tyto nepříznivé vlivy potlačit například odpružením jednotlivých náprav železničních souprav nebo úpravou úklonu jízdní plochy.

Změnou úklonu jízdní plochy lze dosáhnout zkrácení periody, a tedy i snížení kritické rychlosti, při níž nastává rezonance železničních vozů a železniční konstrukce. Při nižších rychlostech jsou vyvozovány nižší dynamické účinky a také je nižší riziko nepříznivých jevů při pohybu vlakové soupravy.

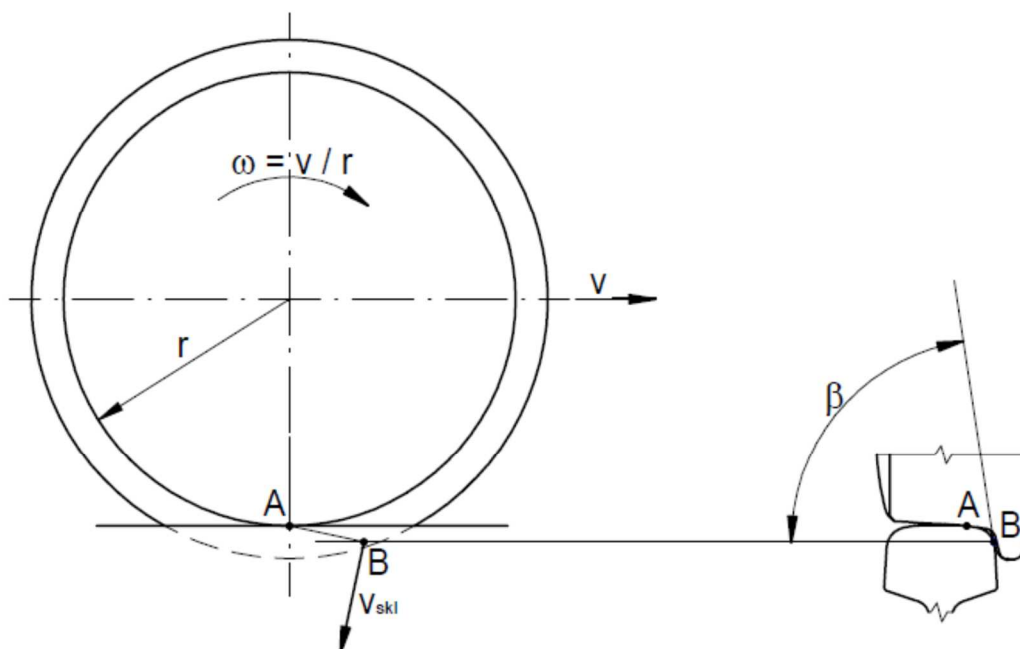
V případě, že při pohybu dvojkolí dojde k vyčerpání maximální amplitudy v rozchodovém kanálu, dojde ke kontaktu okolku železničního kola s kolejnicí, což způsobí náhlou změnu směru dvojkolí v koleji a dvojkolí se začne pohybovat směrem ke své druhé krajní poloze. V druhé krajní poloze opět okolek narazí na kolejnici, nastane náhlá změna směru a dvojkolí se začne pohybovat zpět k první kolejnici. Tento pohyb se při jízdě vozidla cyklicky opakuje a způsobuje enormní zatížení kolejového roštu příčnými rázovými silami. Tento způsob pohybu železničního dvojkolí v koleji je v odborné literatuře označován termínem „cik-cak pohyb“.

Jízda v oblouku

Při jízdě železničního vozidla obloukem na něj působí odstředivé síly závislé na rychlosti vozidla a poloměru směrového oblouku. U velmi velkých poloměrů dojde u železničních dvojkolí pouze k vychýlení ze středové polohy v rozchodovém kanálu a vozidlo projíždí obloukem na základě rozdílu oběžných poloměrů dvojkolí. U ostatních poloměrů, kde je již vyčerpán rozsah vychýlení v rozchodovém kanálu dochází ke kontaktu okolku s kolejnicí. Přenos příčných sil do kolejového roštu je v tom případě zprostředkován zejména okolkem kola dvojkolí jedoucí po vnějším kolejnicovém pásu.

Dvounápravové vozidlo (může představovat i samostatný podvozkový pojezd) se při svém pohybu obloukem posouvá jako celek po obloukové dráze a díky vedení kol kolejnicí se i otáčí kolem středu otáčení vozidla. Rotace kolem středu otáčení vozidla vyvoluje na styku kolo – kolejnice skluzové (třecí) síly. Úhel náběhu α vnějšího kola prvního dvojkolí vychází jednak z

poloměru směrového oblouku a závisí též na poloze celého vozidla v koleji. Poloha vozidla může být statická, vzpříčená nebo těťivová.



Obrázek 21 - Kontaktní a skluzové poměry nabíhajícího kola, zdroj: [52]

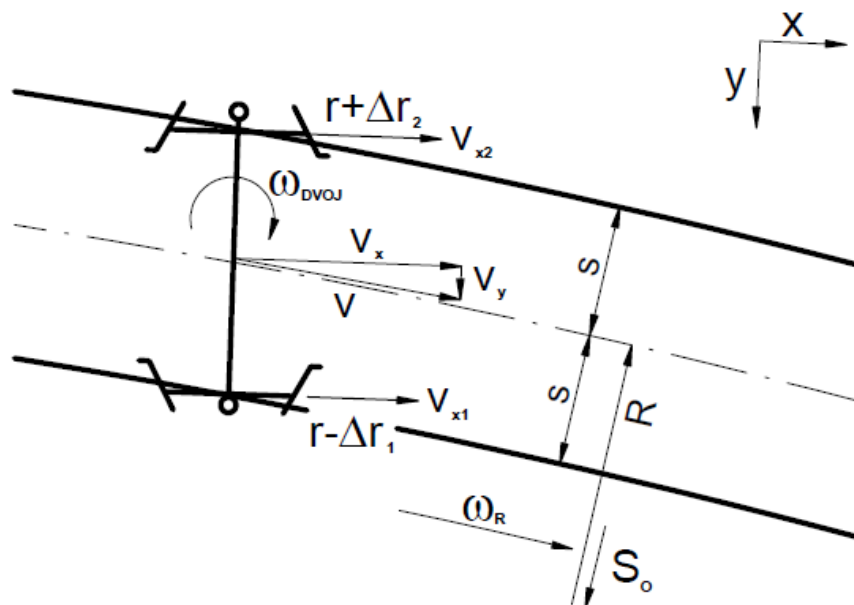
Velikost úhlu náběhu má zásadní vliv na opotřebení okolku vnějšího kola prvního dvojkolí a současně i na opotřebení hlavy vnější kolejnice. Při náběhu vnějšího kola prvního dvojkolí dochází většinou ke dvoubodovému styku kolo – kolejnice, přičemž první bod styku (bod A) se nachází na temeni kolejnice a přenáší svislé zatížení od vlakové soupravy a druhý bod styku (bod B) se nachází na okolku. Tento druhý bod B je předsazený o vzdálenost Δ před bod A, a přenáší se skrz něj příčné zatížení do boční strany kolejnicové hlavy. Na základě znalosti vzájemné polohy bodů A a B, jež je závislá na náběhu α a sklonu kontaktní plochy okolku β , lze určit skluzovou rychlost v_{skl} .

$$v_{skl} \approx r \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \omega_{DVOJ}$$

Snahou je co nejvíce zmenšit úhel náběhu prvního nabíhajícího dvojkolí z důvodu snížení opotřebení železničních kol i kolejnic a dále má také snížení úhlu náběhu pozitivní vliv na bezpečnost průjezdu vozidla směrovým obloukem. Snížení náběhu je možné provést i vytvořením vůle v rámovém uchycení kola v podvozku vozidla, a umožnit tak mírné pootočení dvojkolí v rámci uchycení. Pro průjezd vozidla směrovým obloukem je snížení tuhosti uchycení dvojkolí pozitivní a úhel náběhu se zmenší, vyvstávají zde však problémy s jízdou v přímé koleji,

kde naopak toto řešení narušuje harmonický pohyb dvojkolí a vnáší do konstrukce (ať již vozidla nebo jízdní dráhy) nežádoucí vibrace.

U nenabíhajícího druhého dvojkolí rámového vozidla, které většinou vlivem malého příčného posunu zaujímá statickou polohu v rozchodovém kanálu, je malý rozdíl poloměrů oběžných kružnic Δr , což vyvoluje vysoké podélné skluzové síly.



Obrázek 22 - Skluzová rychlost v podélném směru, zdroj: [52]

K podélnému skluzu dochází, když není splněna podmínka prostého odvalování železničního kola po kolejnici. Aby byla tato podmínka splněna, musí se vzdálenost, kterou urazí oběžná kružnice kola rovnat vzdálenosti, kterou dané kolo ujede po kruhové dráze směrového oblouku, přičemž tato podmínka musí být splněna zároveň pro obě dvě kola daného dvojkolí.

$$(R_0 + s) \cdot \omega_R = r_2 \cdot \omega_{DVOJ}$$

$$(R_0 - s) \cdot \omega_R = r_1 \cdot \omega_{DVOJ}$$

Po úpravě je následně možné podmínku prostého odvalování dvojkolí ve směrovém oblouku vyjádřit vztahem

$$[(R_0 + s) - (R_0 - s)] \cdot \omega_R = (r_2 - r_1) \cdot \omega_{DVOJ}$$

Levá strana rovnice představuje geometrické parametry koleje, na pravé straně jsou popsány parametry dvojkolí, konkrétně okamžité poloměry oběžných kružnic jednotlivých kol dvojkolí.

Působení sil na kontaktu kolo kolejnice je třeba řešit komplexně, a optimalizovat působení jednotlivých sil, aby průjezd směrovým obloukem byl plynulý, komfortní a hlavně bezpečný. Z tohoto pohledu je třeba řešit působení odstředivé síly a minimalizaci jejich účinků. Odstředivá síla je závislá na rychlosti průjezdu vlakové soupravy směrovým obloukem a na poloměru tohoto oblouku, optimalizace výslednic působících sil se dosáhne naklopením jízdní dráhy ve směrovém oblouku. Toho je dosaženo převýšením vnějšího kolejnicového pásu oproti vnitřnímu kolejnicovému pásu, který zůstává výškově v poloze původní nivelety koleje. Pro konstrukci železniční trati je počítáno s teoretickým převýšením D_{eq} , které má výslednici gravitace a odstředivé síly kolmou na spojnici temen kolejnic.

$$D_{eq} = \frac{11,8 \cdot V^2}{R}$$

Ve výpočtu je použita maximální návrhová rychlost V_n , touto rychlostí však zcela jistě nejedou všechny vlaky, které daným směrovým obloukem projíždějí. U vlakových souprav, které směrovým obloukem projíždění rychlostí vyšší než návrhovou hovoříme o nedostatku převýšení I [mm], což znamená zvětšení svislé a vodící síly na vnější kolejnicový pás.

$$I = \frac{11,8 \cdot V^2}{R} - D_{eq}$$

Limitní i maximální hodnoty pro jednotlivá rychlostní pásma jsou uvedena v normě [17].

S nedostatkem převýšení souvisí i komfort jízdy pro cestující. Čím větší je při průjezdu vlakové soupravy nedostatek převýšení, tím je i vyšší nevyrovnané příčné zrychlení, které působí na cestující. Se snahou o zvyšování cestovních rychlostí na stávajících tratích při zachování přijatelného komfortu cestování se přistoupilo ke konstrukci vozidel s naklápěcí skříni, čímž se kompenzují účinky odstředivého zrychlení na cestující, avšak za cenu násobně vyššího silového působení na železniční konstrukci v příčném směru.

V případě, že vlakové soupravy projíždějí směrovým obloukem nižší než návrhovou rychlostí, hovoříme o přebytku převýšení E [mm]. Při přebytku převýšení je svislou kolovou silou zatížen zejména vnitřní kolejnicový pás.

$$E = D_{eq} - \frac{11,8 \cdot V^2}{R}$$

Limitní a maximální hodnoty přebytku převýšení upravuje norma [17].

6. Metodika měření

Způsobů, jak získávat a ověřovat chování jednotlivých navržených konstrukcí je v technické praxi několik. Mezi tři základní způsoby patří matematické modelování daného jevu nebo konstrukce. Dalším způsobem je vytvoření modelu dané konstrukce a její sledování v laboratorních podmínkách a třetím základním způsobem získávání dat je sledování reálné konstrukce v reálném prostředí. Někdy je vhodné a účelné zmíněné typy vzájemně kombinovat, tj. kombinovat modelování a měření na zkoumané konstrukci.

Předmětem práce bylo získání informací jak o železniční konstrukci, tak i o projíždějících vlakových soupravách. Pro návrh algoritmu k vyhodnocování počtu náprav vlakových souprav je k dispozici dostatek použitelných dat dynamické odezvy. Vytváření nových datových sad postupy matematického modelování by bylo tedy z tohoto hlediska bezpředmětné a není přínosem. Nad to, umělé vytvoření odpovídajícího signálu dynamické odezvy pro potřebu sčítání železničních dvojkolí by nebylo zcela triviální, pokud by vytvořený signál měl alespoň přibližně odpovídat reálnému průjezdu vlakové soupravy. Metody matematického modelování vstupního signálu pro algoritmus k určení polohy železničního dvojkolí ve vlakové soupravě se tedy neuplatní.

Modelování chování šterkového lože vlivem zatížení je možné. Teoretické poznatky o chování šterkového lože jsou k dispozici, současně máme poznatky i o tom, jak dochází k degradaci stavu kolejového lože. Ovšem podrobný realistický model, který by zobrazoval dynamickou odezvu na zatížení v závislosti na čase a postupné degradaci kolejového lože dosud vytvořen nebyl. Nejenže by takový model byl příliš složitý, byl by zde ještě jeden problém a tím je ověření správnosti takového modelu. Nejsou k dispozici data, na základě kterých by bylo možno takový model kalibrovat. Bylo by velmi složité zajistit relevantní vzorky dat pro kalibraci modelu. Museli bychom pro měření zajistit různé (ale známé) hmotnosti vlakových souprav, těmito soupravami zatěžovat sledované místo různými rychlostmi a tento celý proces opakovat v několika časových relacích, aby byla zřejmá degradace kolejového lože. V našich podmínkách je toto prakticky neproveditelné.

Laboratorní měření se obvykle připravují buď na zmenšených modelech reálných konstrukcí v předem známém měřítku a výsledky se následně přepočítávají na skutečné rozměry konstrukce, nebo se za přesně daných okrajových podmínek zkoumá různě velká část posuzované konstrukce. V případě sledování počtu vlakových náprav a jednotlivých dvojkolí by bylo možné v laboratoři sestavit zmenšený model železniční trati a na ní sledovat dynamické účinky od pojezdu modelu, ale jak již bylo uvedeno výše, pro sestavení algoritmu pro vyhodnocení vlakových dvojkolí je k dispozici dostatek dat, na základě kterých lze algoritmus vytvořit a není nutné tedy vytvářet laboratorní modely. V případě hodnocení stavu podbití kolejového lože je situace poněkud odlišná. Laboratorně nasimulovat pohyblivé zatížení od pojezdu železničního dvojkolí, které by obsáhlo více než jeden pražec je ve školních podmínkách neproveditelné. Simulace dynamického zatížení na jednom pražci by možné bylo například ve spolupráci s vědeckým pracovištěm AdMaS. Proces degradace kolejového lože je proces dlouhodobý, na kterém se podílí jak provezená zátěž, tak i vnější povětrnostní podmínky. Laboratorní experiment by tedy musel probíhat po delší časový úsek nebo do kameniva kolejového lože přidat příměs takového kameniva, které se po krátké době působením zatížení rozpadne, a bude simulovat zanesení kolejového lože jemnější frakcí. Ať už provádění experimentu po dlouhou dobu, nebo přidáním příměsi do standardního

používaného kameniva pro kolejové lože, v obou případech by úsilí i vynaložené finanční prostředky přesahovaly hodnotu získaných dat. Z výše uvedených důvodů nebyla prováděna žádná laboratorní měření.

Jediným relevantním a smysluplným způsobem, jak získat data o průjezdu vlakových souprav a o vyvozený dynamických účincích na kolejového lože zůstalo měření in-situ, v reálném prostředí, na reálných konstrukcích. Práce je zaměřena na vyhodnocení vlastních měření a pozorování, ale také na srovnání s měřeními, která proběhla na železničních tratích v minulosti, zejména pak provedená měření v rámci závěrečných prací studentů a doktorandů. Vyhodnocovaná data nemusejí být nutně zcela v souladu s předkládanou metodikou pro měření, pokud budou splněny dílčí okrajové podmínky. Pokud bude známa rychlost pohybu vlakové soupravy, lze potřebnou datovou sadu pro vyhodnocení redukovat na data z jednoho snímače zrychlení umístěném na patě pražce.

6.1. Metodika pro určení polohy dvojkolí

6.1.1. Měřicí sestava

Minimální sestava pro vyhodnocování polohy dvojkolí, která by poskytovala relevantní data a nebylo by nutné přistupovat k přílišným kompromisům, by se měla sestávat ze dvou čidel zrychlení umístěných na dvou pražcích a dvou spouštěčů (triggerů). Snímače zrychlení jsou umísťovány na patu pražců na jednu stranu kolejnicového pásu. Zda budou snímače umístěny vpravo ve směru jízdy nebo vlevo na výsledek nemá vliv. Z důvodu obsluhy a dostupnosti pro následnou kontrolu je však doporučeno umísťovat snímače spíše na vnější straně tratě (pokud to místní podmínky dovolují), není to však podmínkou.

Dva snímače zrychlení je třeba z důvodu měření rychlosti vlakové soupravy, a také z důvodu určení směrovosti jízdy vlakové soupravy. Pokud pražec s prvním čidlem zrychlení budeme považovat za první pražec, a tedy počátek měrné soustavy, je doporučeno druhé čidlo zrychlení umístit na 7. pražec. Toto umístění bere v potaz potřeby následujících úloh a vychází z velikosti kol dvojkolí a projeté vzdálenosti. Je také výhodné při zmenšení chyby výpočtu rychlosti.

Průměr dvojkolí železničních vozů jak osobních, tak i nákladních, se pohybuje obvykle v rozsahu 920 – 1000 mm. Elektrické lokomotivy mohou mít dvojkolí o průměru až 1250 mm. Obvod kol železničních vagónů je v rozmezí 2,89 – 3,14 m, obvod kol lokomotiv je až 3,93 m. Pro srovnání signálu za účelem stanovení rychlosti je výhodné sledovat výstupy ze dvou čidel vzdálených od sebe v násobcích obvodu železničního kola, protože pak jsou výstupní signály přibližně stejné a lze je snadno porovnávat. I v případě, že by čidlo zaznamenalo impakt plochého kola, není to pro srovnání problémem, protože podobný impakt zaznamená i druhé čidlo. Při standardní osové vzdálenosti betonových pražců 0,6 m je na 7. pražci dosažena vzájemná vzdálenost 3,6 m. Je doporučeno umísťovat druhý snímač právě ve vzdálenosti 3,6 m, protože tato vzdálenost pokrývá celý rozsah možných rozměrů obvodu železničního kola vagónů a přibližně odpovídá velikosti obvodu kola elektrických lokomotiv. Rychlost vlakové soupravy je zjišťována z odezvy prvního dvojkolí, které náleží v naprosté většině lokomotivě, nebo řídícímu vozu. Kola lokomotiv jsou udržována ve velmi dobrém technickém stavu a riziko plochých kol nebo jiných defektů, které by se propsaly do výstupního signálu je malé. Odezva

železničního kola lokomotiv je tedy po celém svém obvodu více méně konstantní (bez výraznějších zaznamenaných impaktů v signálu).

Z pohledu určení přesnosti rychlosti jízdy je vzdálenost 3,6 m zcela dostačující. Rozdíly mezi hodnotami rychlosti jízdy vlaku naměřenými ručním radarem při průjezdu vlaku a výpočtem rychlosti na základě signálu dynamické odezvy ze dvou snímačů se známou vzájemnou vzdáleností jsou v řádu desetin kilometrů za hodinu. Při měřených rychlostech nad 100 km/h se jedná o přesnost, respektive nepřesnost v řádu promile, což je pro další hodnocení zcela dostačující.

Dalším důležitým prvkem měřicí sestavy je sada spouštěčů záznamu – triggerů, které spouští měřicí systém a zároveň spouští i ukládání naměřených hodnot. Jako trigger může být použito třeba i další čidlo zrychlení, které by však vyžadovalo stále napájení. Vhodným elektronickým prvkem se jeví být piezoelement vložený pod patu kolejnice, který bude generovat napěťový impuls pro „probuzení“ soustavy do činného stavu. Železniční trať není obecně jednosměrná, proto je třeba triggery umístit na obě strany od měřicího místa. Vzdálenost triggeru od měřicího místa by měla poskytnout dostatek času na zprovoznění celého systému měření před vjezdem vlakové soupravy nad měřicí čidlo a záznam by měl poskytovat i referenční sekvenci záznamu bez dynamické odezvy, která představuje signálový šum aparatury a měřeného pozadí. Dostatečný záznam bez dynamické odezvy je 2 s šumu před příjezdem měřeného vlaku. Z této skutečnosti následně plyne umístění spouštěčů od měřicího místa. V současnosti je maximální rychlost na české železnici 160 km/h, ale jsou snahy o její zvýšení až na 200 km/h. Projetá vzdálenost za 2 s při rychlosti 200 km/h je 111,11 m, při rychlosti 160 km/h odpovídá vzdálenost projetá za 2 s 88,88 m. Triggery by měly být osazeny ve vzdálenosti ne kratší než 90 m od měřicího stanoviště, ale není potřeba je umísťovat dále než 110 m. Triggery osazené v rozmezí vzdáleností 90 -110 m od prvního měřicího prvku měřicí sestavy plně vyhovuje nárokům na požadovaná data. Osazení čidel do větší vzdálenosti by zvyšovalo finanční náročnost sestavy a bylo by nutno řešit i další problémy jako útlum spouštěcího signálu v závislosti na délce, nebo v případě bezdrátových přenosů by vzdálená stanoviště zvyšovala energetické nároky na systém.

Kontrolní měření rychlosti vlakové soupravy lze provést i za pomoci triggerů, primárně je však rychlost určována na základě hodnocení signálu dynamické odezvy. Vzájemná vzdálenost triggerů je cca 200 m a směrodatný je pouze první zaznamenaný impuls na triggeru, protože ostatní impulzy již nejsou vzájemně párovány. Rychlost změřená triggery je průměrná, protože z prvního zaznamenaného impulsu na jednom i druhém triggeru nelze určit složku zrychlení vlakové soupravy.

Ukončení měřicího cyklu je provedeno na základě poklesu indukovaných elektrických napětí na obou triggerech (jak na vstupním, tak i na koncovém). Technicky může být vypínání systému provedeno pomocí nabíjení a vybíjení kondenzátorů. Při průjezdu vlakové soupravy se bude kondenzátor elektrickými pulzy nabíjet, a bude dána rychlost vybíjení. Rychlostí vybíjení kondenzátoru lze řídit prodlevu vypnutí systému po průjezdu posledního vozu vlakové soupravy. Po vybití vstupního i koncového kondenzátoru budou porovnány první dvě a poslední dvě sekundy měřeného záznamu a pokud bude v obou případech průměrná zaznamenaná výchylka stejná, dojde k zastavení měření. Shodné výchylky budou signalizovat, že se systém již ustálil na úrovni prvotního šumu bez vlivu dynamických účinků na konstrukci.

Pokud nastane situace, že nedojde k nabití a vybití jednoho z kondenzátorů, systém automaticky po dvou minutách měření zastaví a označí záznam za neplatný. Situace může být

způsobena buď vadným triggerem nebo skutečností, že vlaková souprava zastavila v místě měřicího úseku, to znamená projede pouze přes první trigger a zastaví se. Následně, když pokračuje v jízdě může projet pouze přes koncový trigger, čímž jedna vlaková souprava může vytvořit 2 chybné záznamy, aniž by byl vadný vlastní měřicí systém. Hlášení o závadě je doporučeno předávat provozovateli až při průjezdu 3 vlakové soupravy, tj. až když je zaznamenán 5. neplatný záznam.

6.1.2. Postup hodnocení

Úloha určení polohy dvojkolí v měřeném signálu je založena na postupném dělení měřeného signálu na jednotlivé dílčí úseky, které jsou dále děleny na menší úseky signálu s přihlédnutím ke znalosti o stavbě železničních vozů, až je postupnými kroky nalezena poloha dvojkolí.

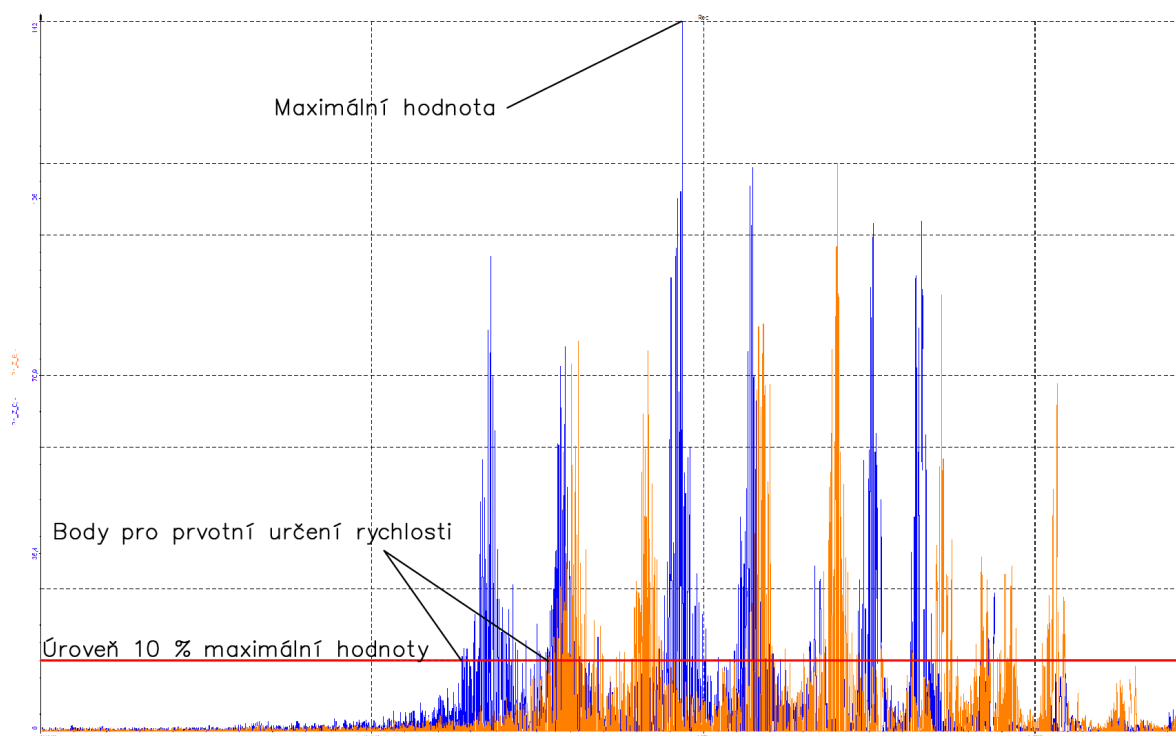
Metody založené na převodu signálu do plovoucí RMS a stanovení konstantní úrovně filtrace pro celý měřený signál jsou použitelné jen za velmi specifických podmínek, kdy je měřen signál dynamické odezvy na vlakové soupravě, která má všechny vozy přibližně stejně těžké a jejíž všechna kola jsou bezvadná. Tyto podmínky jsou splněny pouze u menší části vlakových souprav a obecně tento postup použít nelze.

Odezva jednotlivých železničních kol je co do amplitudy dynamické odezvy velmi různorodá. Problémem je například, pokud je za těžkým vozem s defektním kolem řazen lehký vůz s bezvadnými koly. Těžký vůz energeticky vybudí železniční konstrukci nakolik, že se následný průjezd lehkého vozu v měřeném signálu blíží hodnotám šumu signálu. Zkoušené metody filtrace na celém signálu se neosvědčily, protože zvýrazňovaly vyšší hodnoty na úkor nižších a slabou odezvu v signálu v podstatě potlačily.

Předkládaná metodika pro určení dvojkolí je založena na znalosti rozvorů náprav železničních vozů, na vzdálenosti otočných čepů jednotlivých náprav v rámci jednoho železničního vozu a na vzdálenosti náprav dvou za sebou následujících vozů. Dále je při vyhodnocování brána v potaz i velikost železničních kol.

Aby bylo možné převést signál na délkové míry je nezbytně nutné provést určení rychlosti vlakové soupravy. Určení rychlosti probíhá ve dvou následných krocích. Nejdříve se určí rychlost soupravy přibližně na základě stanovené úrovně v závislosti na maximu a v druhém kroku dojde ke zpřesnění na základě porovnání maxima prvního dvojkolí na prvním a posledním čidle.

První krok určení rychlosti spočívá v nalezení maximální výchylky zrychlení v měřeném signálu, následně se nastaví úroveň 10 % maximální hodnoty, tato úroveň však musí být zároveň vyšší než maximální hodnota v úvodní sekvenci signálového šumu měřeného bez dynamických účinků pojezdu vlaku v úvodu signálu (doporučené minimum nastavované úrovně je alespoň dvojnásobek maximální hodnoty prvotního šumu). Určí se první hodnota v této úrovni v signálu z prvního a posledního snímače (obecně ze dvou sledovaných snímačů). Pro tyto dvě hodnoty je odečtena v signálu časová hodnota a pomocí rozdílu zaznamenaných časů a známé vzdálenosti pražců je dopočítána rychlost. Křivka náběhu k maximální hodnotě zrychlení se může v jednotlivých signálech lišit, proto je v následujícím kroku provedeno zpřesnění pomocí maximální hodnoty zrychlení prvního dvojkolí.



Obrázek 23 - Určení prvotní rychlosti, zdroj: autor

Ve druhém kroku určení rychlosti je již známa přibližná hodnota rychlosti, proto lze určit interval pro hledání maxima na základě délky. Osová vzdálenost dvojkolí podvozků lokomotiv nebo řídících vozů je 2,5 m a více, průměr železničního kola je uvažován 1 m, interval pro hledání maximální výchylky prvního dvojkolí je tedy stanoven jako polovina osová vzdálenosti dvojkolí podvozku plus poloměr kola, což představuje délku 1,75 m. Délková míra je přepočtena zpětně na úsek hodnoceného signálu a v takto určeném intervalu je vyhledána maximální výchylka v prvním i ve druhém záznamu, tj. z jednoho i druhého snímače. Maximální výchylky určují polohu průjezdu prvního dvojkolí a opět přes rozdíl časů v prvním a druhém záznamu je dopočítána rychlost vlakové soupravy.

$$v_v = \frac{s_{7\text{pražec}} - s_{1\text{pražec}}}{t_{7\text{pražec}} - t_{1\text{pražec}}}$$

Je vhodné stanovení rychlosti ověřit pro každých 100 m vlakové soupravy, protože i v rámci sledovaného úseku může docházet ke změně rychlosti vlakové soupravy, k jejímu zrychlování nebo zpomalování - brzdění. V krajním případě může vlaková souprava v místě měření zastavit úplně, pak ovšem hodnocení dynamických účinků postrádá smysl.

Zjištění rychlosti soupravy je důležité z důvodu segmentace hodnoceného signálu. Protože je signál dynamické odezvy velice různorodý, je třeba ho zpracovávat po jednotlivých částech, po segmentech. Odezvy různých vlakových souprav jsou různé a různá je například i odezva lokomotivy a tažených vagónů. Základní myšlenkou je tedy rozdělit signál tak, aby

obsahoval vždy jen jednu podvozkovou skupinu a tento segment signálu dále hodnotit a zpracovávat. Podvozkovou skupinou je myšlen první nebo poslední podvozek vlakové soupravy, které jsou samostatné anebo sousedící podvozky dvou vzájemně spojených železničních vozů (podvozkovou skupinou je též Jacobsův podvozek mezi dvěma vozy).

Měřený signál dynamické odezvy je zaznamenáván v čase a jednotlivé maximální výchylky zrychlení v signálu představují průjezd jednotlivých železničních dvojkolí. Rozvory náprav, vzdálenosti otočných čepů podvozků, velikost kol jsou udávány v metrech, tj. délkových jednotkách. Stejně tak jsou v délkových jednotkách zadávány i hodnoty pro velikost okna v posuzovaném signálu a posun v rámci signálu. Je tedy třeba převést časový záznam průjezdu vlaku na vyjádření délky, a to je provedeno pomocí rychlosti vlakové soupravy. Pomocí rychlosti je přepočítán poměr, jak velký časový úsek odpovídá jednomu metru. Velikost sumačního okna je nastavena pevně délkovou mírou, ovšem s ohledem na různé rychlosti průjezdu jednotlivých vlakových souprav tato délková velikost představuje u různých vlaků různě velkou časovou velikost. V případě změny rychlosti vlakové soupravy v místě měření se může měnit velikost hodnotícího okna i v rámci jedné vlakové soupravy.

Dalším krokem je provedení druhé mocniny všech naměřených výchylek zrychlení v hodnoceném signálu. Tím dojde jednak ke zvýraznění měřeného signálu, ale především je tím zajištěn převod výchylek pouze do kladných hodnot.

$$y_i = x(t_i)^2$$

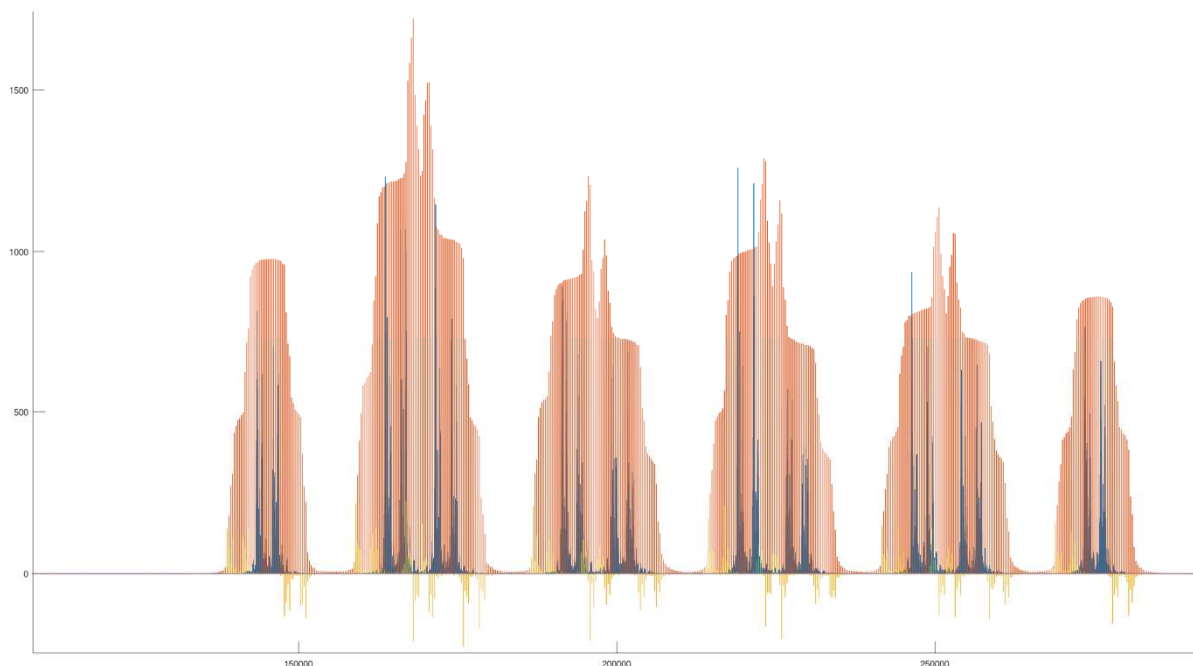
Soubor kladných výchylek měřeného signálu je základem k provedení plovoucí sumy výchylek. Provedením plovoucí sumy se původní signál výchylek vyhladí, jsou eliminovány prudké výkyvy výchylek a je možno následně použít další filtrační postupy.

$$y = \sum_{i=a}^b x_i \quad \text{pro velikost sumačního okna } \langle a, b \rangle$$

Velikost okna plovoucí sumy vychází z konstrukce železničních vozů, kdy je třeba obsáhnout dva následující dvounápravové podvozky sousedních vozů. Velikost okna je stanovena na 8 m. Tato vzdálenost je dostatečná, aby obsáhla dva dvounápravové podvozky za sebou následujících vozů a zároveň není tak velká, aby se ztratila rozlišitelnost jednonápravových rámových podvozků. V datové řadě plovoucí sumy jsou určovány maxima, která představují jednotlivé podvozky, případně podvozkové skupiny. Segmentace těchto podvozkových skupin je založena na změně směrnice přímky dvou následných bodů plovoucí sumy. Neboli v plovoucí sumě je nalezeno maximum a od této hodnoty je hledána směrem k začátku první záporná směrnice k , která reprezentuje konec předcházející podvozkové skupiny, a směrem ke konci datové řady je hledána první kladná směrnice přímky k , která reprezentuje začátek následné podvozkové skupiny.

$$y = k \cdot x$$

Protože jsou v signálu pouze se signálovým šumem bez dynamické odezvy směrnice plovoucí sumy blízké nule a často mění svůj směr, je nutné odfiltrování těchto nežádoucích hodnot. Bylo experimentálně ověřeno, že u vlakových souprav s běžně opotřeбенými koly, je optimální filtrovat hodnoty menší než 2% maximální spočtené směrnice přímký. Tento stupeň filtrace v naprosté většině případů zaručí odfiltrování šumu signálu s určitou rezervou, avšak ponechá všechny hodnoty důležité pro hodnocení.



Obrázek 24 - Podvozkové skupiny reprezentované plovoucí sumou výchylek, zdroj: autor

Na základě filtrace pomocí směrnic přímký jsou separovány z datového souboru druhých mocnin jednotlivé bloky, které představují jednotlivé podvozkové skupiny. Na ně je následně analogicky aplikován popsáný algoritmus, avšak se změnou šířky hodnotícího okna, které odpovídá rozvoru jednotlivých náprav a velikosti kola. Tímto postupem jsou v signálu určena jednotlivá dvojkolí.

Po určení poloh jednotlivých dvojkolí ve vlakové soupravě jsou následně polohy dvojkolí seřazeny za sebe a je provedena kontrola správnosti vyhodnocení. Pro tento účel je důležité po celou dobu vyhodnocování držet globální souřadnice detekovaných dvojkolí, tj. všechny určené polohy podvozkových skupin nebo přímo dvojkolí vztahovat vždy k začátku původního signálu, i když dojde k jeho segmentaci.

Z povahy hodnocených dat a použitého algoritmu nedochází k situaci, že by algoritmus označil polohu dvojkolí v místě, kde ve skutečnosti není, může ale vzhledem k různorodosti snímaného signálu dynamické odezvy dojít k situaci, při které navržený algoritmus podvozkovou skupinu nedetekuje. Proto na závěr vyhodnocení je testována vzájemná

vzdálenost jednotlivých dvojkolí, a pokud je tato vzdálenost větší než 16,5 m, spustí se hodnotící algoritmus znovu s upravenou hodnotou filtru směrníc přímek.

6.2. Metodika pro určení defektních dvojkolí

6.2.1. Měřicí sestava

Měřicí sestava pro určení defektních dvojkolí na základě sledování dynamické odezvy od pojezdu vlakové soupravy je ze tří představených úloh z pohledu měřicí sestavy nejsložitější. Ideální sestava by se měla skládat ze dvou triggerů pro spuštění a zastavení měřicí sestavy a dále ze sady šesti akcelerometrů umístěných na šesti za sebou následujících pražcích na obou stranách koleje. Tato ideální měřicí sestava by se tedy sestávala z 12 akcelerometrů, což však představuje komplikace se zaznamenáváním daného signálu. Zařízení s dvanáctikanálovým zapisovačem by bylo již příliš sofistikované a drahé na to, aby bylo určeno pro autonomní monitorování stavu železničních dvojkolí. A sestava více modulů zase přináší problém se vzájemnou synchronizací jednotlivých zařízení. Nad to je detekce defektního kola pouze nastavbovým měřením a poskytuje pouze informaci, že se defektní dvojkolí v soupravě vyskytuje. Ambicí tohoto měření je pouze poskytnout podnět k podrobnějšímu měření, nikoliv určení rozsahu a typu defektu (zda se jedná o ploché kolo, oválné kolo nebo došlo ke ztrátě materiálu na obvodu kolo apod.)

Ideální sestava z pohledu získaných dat, jak bylo zmíněno výše, není ideální sestavou pro následné použití v praxi, je proto navržena optimalizace dané sestavy. Předmětem optimalizace měřicí sestavy je snížení počtu akcelerometrů v sestavě, aby bylo možno dané měření vyhodnocovat jedním modulem. Použití triggerů, jak je popsáno v úloze určení polohy dvojkolí, je použito beze změn i v případě určení defektních dvojkolí včetně jejich vzájemných vzdáleností od měřicího místa. Dalším prvkem měřicí sestavy jsou 4 akcelerometry umístěné na 1., 3., 5. a 7. pražci. Toto rozmístění vychází ze skutečnosti, že impakt způsobený defektním kolem se propisuje v signálu do jisté míry i na sousední pražce. Naměřené hodnoty zrychlení na pražci před a pražci za pražcem, nad kterým byla naměřena impaktní maximální výchylka zrychlení, je stále dostatečně signifikantní k určení, že se v dané vlakové soupravě na daném vozu nachází defektní kolo. Rozsah sedmi pražců je dán největším používaným kolem s průměrem 1250 mm, jehož obvod činí 3,93 m. Rozsah sedmi pražců představuje vzdálenost 3,6 m, a pokud k tomuto rozsahu připočteme i vzdálenost k sousednímu pražci na začátku a na konci sestavy, tak je signálem pokrytý zkoumaný úsek železniční konstrukce v délce 4,8 m. Tato délka zaručí vyhodnocení případných defektních kol také na elektrických lokomotivách, které mají největší kola ze všech běžných drážních vozidel.

Pokud bude k dispozici jednoduchý a levný nástroj ke sledování stavu železniční konstrukce, pak lze předpokládat jeho rozšíření na železniční síti ve větším měřítku, a tím bude možné eliminovat některé z nedostatků vzniklých zjednodušením měřicí sestavy. Umísťování měřicí sestavy na vnější kolejnicový pás je výhodnější z hlediska přístupu k měřicí aparatuře, avšak z pohledu výsledků měření nezáleží na umístění snímačů, zda se nacházejí na kraji kolejového lože vícekolejných tratí nebo blíže středu. Pro zjišťování stavu dvojkolí je třeba monitorovat dynamickou odezvu na obou stranách koleje, aby byl ověřen stav jednoho i druhého kola daného dvojkolí, není však nutné, data o stavu kol dvojkolí získávat na jednom stanovišti. Stav kol dvojkolí se jízdou opotřebovává (nezlepšuje se), je tedy jen otázkou času, kdy bude vadné kolo zaregistrováno. Při umísťování měřicí sestavy pouze na jednu stranu

koleje, by byly kontrolovány pouze kola na jedné straně drážního vozidla a v průběhu jedné jízdy vlakové soupravy by nemusely být defekty odhaleny. S ohledem na oběhovost železničních vozů a vagónů i při umísťování měřicí sestavy pouze na vnější stranu koleje by po určité době k odhalení defektních kol došlo. Nicméně je doporučeno umístění měřicí sestavy systematicky střídat při použití na jedné i druhé straně koleje. K odhalení defektních kol v takovém případě dojde mnohem dříve a správce železniční infrastruktury bude mít možnost dříve zasáhnout.

6.2.2. Postup hodnocení

Hodnocení defektních kol navazuje na úlohu zjišťování polohy dvojkolí. Postup hodnocení vychází ze skutečnosti, že defektní kolo se neodvaluje rovnoměrně, ale vyvolává na železniční konstrukci významné dynamické rázy, které lze spolehlivě zaznamenat akcelerometrem. Tyto rázy významně tlumí kolejové podpory, pro kontinuální pokrytí odezvy po celém obvodu železničního kola je třeba umístit snímače minimálně na každý druhý pražec. Snímač na pražci tedy sleduje výseč na obvodu kola v délce 1,2 m.

Pro statistické hodnocení je třeba vyhledat maxima výchylky v absolutní hodnotě (tj. maxima z kladných i záporných výchylek) daného železničního kola ve všech měřených signálech v dané měřicí lokalitě.

Základní měřicí sestava je tvořena ze čtyř akcelerometrů v jedné měřicí lokalitě, pro každé železniční kolo je vytvořen soubor 4 hodnot maximálních výchylek odpovídajících konkrétnímu železničnímu kolu. Pro hledání maximálních výchylek jsou použity výsledky z první úlohy určení polohy dvojkolí. Z této úlohy je převzata poloha kola v prvním signálu a na základě znalosti rychlosti pohybu vlakové soupravy je určena předpokládaná poloha dvojkolí v následujících signálech (v signálu z druhého, třetího a čtvrtého akcelerometru). Hledání maximální výchylky následně proběhne v rozsahu $[-0,5 \text{ m}, +0,5 \text{ m}]$ od předpokládané polohy železničního kola, určený rozsah 0,5 m odpovídá poloměru běžného železničního kola. Takto připravené soubory 4 hodnot jsou statisticky vyhodnoceny.

Základním statistickým hodnocením je poměr maximální a minimální výchylky. Poměr limitně se blíží 1 představuje zcela bezvadné kolo. Čím je poměr větší, tím větší byl i zaznamenaný impaktní ráz od pojezdu železničního kola. Stav, že jsou si všechny 4 měřené maximální výchylky rovny prakticky nenastává jednak z důvodu, že žádné železniční kolo není absolutně dokonalé, ale také z důvodu drobně odlišných podmínek pro měření jednotlivých akcelerometrů (např. tolerance při upevnění akcelerometru k pražci, malé imperfekce při přenosu zatížení soustavou kolo-kolejnica-pražec, ne zcela homogenní šterkové lože a podbití pražce atd.).

Úloha pro určení defektních dvojkolí není určena k přesné diagnostice daného železničního dvojkolí, výsledkem této úlohy je pouze určení, zda se v dané vlakové soupravě na železničních vozech defektní dvojkolí nachází a do jaké míry je poškození daného kola závažné.

Kategorizace poškození železničního kola je rozdělena do tří skupin:

<i>popis stavu</i>	<i>doporučení postupu</i>	<i>rozsah hodnot poměru</i>
1. v dobrém stavu	bez zásahu	do 2,5
2. s lehkým poškozením	doporučeno sledovat	2,5 – 5,0
3. s těžkým poškozením	nutno opravit / vyměnit	nad 5,0

Kategorizaci je možno upravit dle potřeb provozovatele dopravní infrastruktury, pro ověření funkčnosti daného řešení však není potřeba mít jednotlivé kategorie příliš podrobné. Ostatně v rámci výzkumu nebylo ani možné přesný stav jednotlivých železničních kol určit. Ověření defektních kol bylo prováděno na základě akustické analýzy záznamu projíždějících vlaků, který byl pořizován souběžně se záznamem dynamické odezvy.

U převzatých měření, kde není k dispozici soubor měření na více pražcích, je identifikace defektních kol problematická. Taková měření obvykle neumožňují srovnání více signálů vyvozených jedním dvojkolím, protože jsou měřena pouze jedním snímačem na jednom pražci. V tomto případě je tedy nutné porovnávat měřený signál s ostatními koly vlakové soupravy. Tento přístup však výrazně snižuje přesnost identifikace defektních kol, a ve své podstatě lze hodnotit pouze velmi špatná kola, která amplitudou naměřeného signálu velmi výrazně převyšují naměřená maxima ostatních kol v soupravě. Dalším problémem tohoto přístupu je skutečnost, že při pojezdu kola nad snímačem může být daná část kola bez defektu, a tudíž není žádná signifikantní změna v amplitudě signálu zaznamenána. Defektní stav kola se v takovém signálu neprojeví a je identifikováno jako kolo bezvadné. Z pohledu relevantního určení defektních kol je toto hodnocení problémem, avšak při zjišťování stavu podbití pod daným pražcem (následující úloha) to zásadní problém není. Při průjezdu nad měřeným pražcem vyvozuje bezvadná část defektního kola stejné dynamické účinky, jako kolo, které je v bezvadném stavu celé. Příímý impaktní ráz defektního kola je většinou také jasně identifikovatelný, problémem může mezilehlá hodnota při odeznívání impaktního rázu. S ohledem na statistické vyhodnocování většího vzorku dat bezvadných kol a míry pravděpodobnosti, že na defektním kole bude zaznamenána zrovna mezilehlá hodnota odeznívání impaktního rázu, je problém rozhodnutí, zda se jedná o defektní kolo v případě určování stavu podbití železniční konstrukce problémem marginálním.

6.3. Metodika pro stanovení stavu podbití

Z pohledu železniční konstrukce je nejdůležitější úlohou úloha pro stanovení stavu podbití. Ve své podstatě je celý měřicí systém primárně vyvíjen pro účely sledování a vyhodnocování stavu železniční konstrukce včetně stavu podbití.

Protože budičem dynamické odezvy jsou železniční vozy, při jejichž průjezdu po železniční konstrukci se uplatňuje fyzikální zákon akce a reakce, lze z odezvy dynamických účinků vyčíst spoustu informací nejen o sledované železniční konstrukci, ale také spoustu informací o vozech samotných. Pro sledování parametrů železničních vozidel existují sice pokročilejší systémy založené na jiných principech, ale základní představu o technickém stavu železničních vozidel, respektive o stavu jejich dvojkolí a jednotlivých kol, lze získat i z dynamické

odezvy při průjezdu daného železničního kola nad akcelerometrem. Čím lépe známe vlastnosti budiče a vyvozovaného buzení – akce, tím lépe následně můžeme hodnotit vyvozené účinky – reakci. Předchozí dvě metodiky jsou věnovány železničním vozům a stavu jejich kol, aby bylo možno na základě znalosti defektních kol z hodnocení vypustit odpovídající části signálu.

Stanovení stavu podbití železniční konstrukce lze hodnotit i bez znalosti částí signálu, které jsou vyvozeny defektním kolem, avšak pro takové hodnocení je zapotřebí většího statistického souboru, a také toto hodnocení vykazuje nižší přesnost.

6.3.1. Měřicí sestava

Měřicí sestava pro úlohu stavu podbití ve své minimální podobě potřebuje údaje pouze z jednoho snímače zrychlení. Pro určení stavu podbití není důležitá směrovost jízdy vlakové soupravy a nehraje zde roli ani rychlost vlakové soupravy. Ve své minimální konfiguraci by dostačoval také pouze jeden trigger umístěný v místě snímače nebo v jeho bezprostřední blízkosti (např. na stejném pražci, avšak na protější straně pod kolejnicovým pásem, pokud by byl triggerem piezoelement).

Požadavky na měřicí sestavu pro stanovení stavu podbití v minimalistické podobě jsou z představených úloh nejnížší, proto při získání dat z předchozích úloh je možné vyhodnotit i stav podbití. Nevýhodou použití minimalistické sestavy je větší rozptyl hodnot zjišťované dynamické odezvy z důvodu projevů defektních kol. Hodnocení stavu podbití je založeno na srovnání maximálních výchylek zrychlení a následném statistickém vyhodnocení. Dynamická odezva defektního kola je při jízdě výrazně vyšší než u bezvadného kola, proto se do vyhodnocení maximálních hodnot prosadí maximální hodnoty vybuze defektním kolem.

V minimalistické variantě měřicí sestavy jsou vyhodnocovány vlakové soupravy bez rozlišení, zda se ve vlakové soupravě nachází či nenachází defektní kolo (na základě jednoho snímače zrychlení nelze relevantně informaci o defektním kole určit). Pro statistické vyhodnocení je použit poměr hodnot maximální výchylky zrychlení v kladných hodnotách a maximální výchylky zrychlení v záporných hodnotách. Rolí tedy nehraje absolutní výchylka, ale vzájemný poměr, proto lze srovnávat a statisticky vyhodnocovat signály jak z vlakových souprav s bezvadnými koly, tak signály vybuze soupravami s defektními koly. Případné výkyvy hodnot jsou na větším souboru dat z průjezdu vlakových souprav eliminovány. Poměr výchylek zrychlení u defektních kol většinou „zvýrazňuje“ stav železniční konstrukce, to ovšem komplikuje stanovení jednotlivých hodnotících kategorií. Přestože lze vyhodnotit stav podbití železniční konstrukce i na základě jednoho snímače zrychlení, je doporučeno s ohledem na následnou kategorizaci stavů podbití vyhodnocovat pouze odezvy z náprav s bezvadnými koly.

Doporučená sestava k určování stavu podbití je tedy totožná s měřicí sestavou pro určení defektního dvojkolí. Je doporučeno stav podbití vyhodnocovat pouze na základě odezvy bezvadných kol, protože lze následně stanovit s přijatelnou přesností kategorie pro určení stavu železniční konstrukce. Úloha stanovení stavu podbití v optimální variantě staví na výsledcích úlohy určení defektního dvojkolí. Nejdříve jsou určena defektní kola a následně jsou posuzovány jen signály kol bezvadných. Vyhodnocení stavu podbití je prováděno na stejných datech jako jsou užity v případě úlohy pro určení defektního dvojkolí, pouze na základě znalosti defektních kol, dojde k filtraci těchto dat.

6.3.2. Postup hodnocení

Základní rozdíl v hodnocení při určení defektních kol a při určení stavu podbití je, že v metodice určení defektního kola se sleduje a porovnává absolutní hodnota výchylek z více signálů v celém měřícím poli, kdežto u metodiky určení stavu podbití se sleduje a porovnává kladná vs. záporná výchylka signálu jednoho snímače.

Pro hodnocení stavu podbití se vychází z předchozí úlohy určení defektních kol, pro hodnocení jsou převzaty pouze polohy amplitudy u bezvadných kol. Defektní kola se pro posuzování stavu podbití nepoužijí.

Pro daný soubor výchylek bezvadných kol se provede sumace maximálních kladných výchylek zrychlení a odděleně sumace maximálních záporných výchylek zrychlení v posuzovaném signálu dynamické odezvy. Ze vzájemného poměru lze následně usuzovat na stav podkladních vrstev, a tedy stavu podbití konstrukce.

S ohledem na složité dynamické děje při pojezdu vlakových souprav po konstrukci v kontextu různých rychlostí a různé váhy jednotlivých souprav je třeba stanovení stavu podbití hodnotit na větším statistickém vzorku. Vyvozované dynamické účinky na železniční konstrukci jsou velmi různorodé a určení stavu podbití pouze z pojezdu jedné vlakové soupravy nemusí být za všech okolností zcela signifikantní. Proto je doporučeno provádět hodnocení stavu podbití po statistickém vyhodnocení minimálně 20 zaznamenaných spojů.

Pokud pomineme málo provozované vlečky a některé výjimky lokálních tratí, tak požadavek na 20 měření na všech běžně provozovaných tratích je splněn nejdéle v rámci jednoho týdne měření, což je navrhovaný systém schopen zajistit i v autonomním režimu s provozem pouze na baterie.

Stav podbití železniční konstrukce je v čase proměnný, avšak změna tohoto stavu je velmi pozvolná, a ne nutně vyžaduje kontinuální měření od prvotního podbití po následné podbíjení. Na železniční konstrukci je třeba sledovat trend změny, toto sledování může být v diskrétních obdobích a může být vztaheno k převezené zátěži, která se významnou měrou podílí na degradaci železniční konstrukci. Minimální doporučené intervaly pro sledování stavu podbití železniční konstrukce je u hlavních tratí 1x za 3 měsíce (tj. 4x ročně), u ostatních tratí je doporučeno sledovat stav minimálně 1x ročně.

Kategorizace stavu podbití (poměr kladných a záporných výchylek v absolutní hodnotě):

<i>popis stavu konstrukce</i>	<i>doporučení postupu</i>	<i>rozsah hodnot poměru</i>
1. nově podbitá kce	bez zásahu	pod 0,9
2. vyhovující stav	bez zásahu	0,9 – 1,1
3. zhoršený stav	doporučeno sledovat	1,1 – 1,3
4. špatný stav	nutno provést podbití	nad 1,3

6.4. Metodika pro určení typu vlaku

Metodika pro určení typu vlaku vychází z metodiky pro určení polohy dvojkolí, není proto popisována měřicí sestava, ale již jen postup hodnocení. Pro hodnocení jsou využita data získaná v rámci předchozích úloh. Čím přesnější jsou vstupní data tím vyšší je následně shoda v určení typu vlakové soupravy.

6.4.1. Postup hodnocení

Určení typu vlaku je založeno na metodě SVM – Support Vector Machine (metoda podpůrných vektorů). Tato metoda vychází z hodnocení jednotlivých tříd dat, která jsou získána měřením.

Základní hodnocení SVM je založeno na velikosti železničních vozů z nichž vycházejí jednotlivé třídy parametrů. Je tedy hodnocena délka rozvoru vnitřních kol železničního vozu, délka rozvoru vnějších kol železničního vozu a poměr vnitřního a vnějšího rozvoru železničního vozu. Na základě těchto charakteristik jsou určovány typy železničních vozidel řazených do vlakové soupravy. V klasifikaci ucelených vlakových souprav se uplatní ještě další korekční parametry jako jsou rychlost vlakové soupravy, počet železničních vozů a řazení osobních více článkových jednotek.

Rozdělení do tříd a jejich popis:

- délka rozvoru vnitřních kol železničního vozu
- délka rozvoru vnějších kol železničního vozu
- poměr rozvoru vnitřních a vnějších kol vozu

Korekční parametry a jejich popis:

- rychlost vlakové soupravy
- počet železničních vozů
- řazení osobních více článkových jednotek

Velikost železničních vozů – základním identifikátorem je velikost železničních vozů, ze kterého vycházejí jednotlivé hodnotící parametry.

Délka rozvoru vnitřních kol železničního vozu je jedním z délkových parametrů, tento parametr je větší než rozvor podvozků a při měření vykazuje nižší procentuální chybu než je tomu v případě rozvoru podvozků.

Délka rozvoru vnějších kol železničního vozu v sobě zahrnuje jak rozvor vnitřních kol, tak i oba rozvory podvozků.

Pro hodnocení nezávislé na délce, tj. nezávislé na rychlosti a přepočtu na délkovou míru je poměr rozvorů vnějších kol a rozvoru vnitřních kol. Tento poměr je důležitým hodnotícím kritériem, protože rozvor podvozku nákladních vozů je menší než používané rozvory pro osobní vozy. Tento poměr je tedy u nákladních vozů vyšší, protože délka podvozků představuje menší část jednotkové délky železničního vagónu.

Rychlost soupravy – rychlost vlakové soupravy jednoznačně určuje typ vlakové soupravy až od rychlosti 120 km/h, protože to je rychlostní limit pro vozbu prázdných nákladních vozů. Při zaznamenaných rychlostech převyšující rychlost 120 km/h se jedná vždy o vlakovou soupravu pro přepravu osob (např. čtyř článkovou elektrickou jednotku, samostatnou lokomotivu s řazenými osobními železničními vagóny atd.).

Pro ložené nákladní vagóny je rychlostní limit 100 km/h. V obecné rovině není tedy rychlost pod 100 km/h hodnotícím kritériem, ovšem v reálném provozu lze pro každou jednotlivou lokalitu nastavit jiné rychlostní limity na základě statistického vyhodnocení průjezdů vlaků. Nákladní vlaky jsou těžší než osobní a mají nižší dynamiku jízdy, tj. menší schopnost akcelerace, s délkou vlaku také souvisí i větší jízdní odpory, a to způsobuje nižší rychlost průjezdu nákladních vlaků daným úsekem než vlakových souprav pro přepravu osob.

Počet železničních vozů – informace o počtu železničních vozů v soupravě přispívá k určení, zda se jedná o nákladní vlak, který má běžně 10 a více vagónů, nebo zda se jedná o vlak pro přepravu osob. Vlaky pro osobní přepravu nemívají více než 9 vagónů. Soupravy vlaků s více než 9 vozy pro přepravu osob mívají řazené i vozy pro přepravu osobních vozidel a motocyklů, řada D (jedná se například o vlaky EuroNight). Vagóny pro přepravu osobních vozidel a motocyklů jsou rozměrově shodné s osobními vagóny a osová souměrnost je zachována. V současné době mají České dráhy 13 vozů řady DDm⁹¹⁵ (10 provozních).

Řazení osobních více článkových jednotek – pro osobní dopravu se stále více začínají prosazovat více článkové osobní jednotky, ať již elektrické nebo motorové. Řazení některých jednotek je specifické a nepřipouští jiné řazení ucelené jednotky.

Například provozované elektrické osobní jednotky řady 680 Pendolino jsou řazeny výhradně jako sedmi článkové jednotky. Jednotky řady 640 a 650 mohou být řazeny ve dvou, tří nebo čtyř článkovém uspořádání a je možné spojovat jednotlivé jednotky do ucelených vlaků. Běžně jsou provozovány vlakové soupravy, kde je maximálně 5 vozů, tj. je spojena jedna dvou článková jednotka a jedna tří článková jednotka.

6.5. Prvky měřicí sestavy

Základními prvky měřicí sestavy po technické stránce jsou trigger, akcelerometry a řídicí modul. Trigger (spouštěče) jsou uvažovány v každé měřicí sestavě dva, na začátku a na konci měřicí sestavy, uprostřed jsou typicky 4 akcelerometry pro měření dynamické odezvy od pojezdu železničních vozidel a vše je napojeno do řídicího modulu.

Ve spojení s SB-dataloggerem může být zapojeno akcelerometrů i více, protože má dostupných až 12 měřicích kanálů, pro typickou měřicí sestavu se však uvažuje s použitím spíše WMP-modulu, který má měřicích kanálů méně.

Triggery (spouštěče)

Pro navrhovanou měřicí sestavu je uvažováno s použitím spouštěčů založených na principu piezoelektrika. V praxi jsou již tyto systémy testovány v podobě piezoelektických podložek (v literatuře označováno Piezoelectric pads), což jsou piezoelektrické desky vkládané pod patu kolejnice. Tyto technologie jsou testovány například na železnicích v Izraeli a použití Piezoelectric pads se věnuje např. i odborný článek „Conceptualizing Implementation of Piezoelectric Materials in Transportation to Harvest Energy“ v International Research Journal of Engeneering and Technology (IRJET).

Do budoucna by se použití piezoelektrických desek mohlo uplatnit i pro zásobování energií navrhované měřicí sestavy. Ne nutně by musel tento systém pokrýt celou spotřebu energie měřicí sestavy, i když to by bylo cílem, pozitivem by bylo i pouhé prodloužení doby autonomního měření.

Testování elektrického napájení pomocí piezoelektrických desek je výzvou a směrem dalšího vývoje navrhované měřicí sestavy.

Akcelerometry

Pro měřicí sestavu je navrženo použití piezo-nábojových akcelerometrů od společnosti Brüel & Kjær. Pro představené úlohy jsou dostačující jednoosé snímače zrychlení, pro celkovou diagnostiku konstrukce lze však předpokládat použití i tříosých snímačů zrychlení.

Parametry snímačů zrychlení použitých v měřicí sestavě jsou:

Typ	B&K 4507 B
Vzorkovací frekvence	30 kHz
Hardwarový filtr dolní propust	1kHz
Přenosová sběrnice	ICP

Řídící modul

Řídícím modulem pro sběr a zaznamenání měřených dat je buď SB-datalogger nebo WMP-modul. SB-datalogger poskytuje širší možnosti měření, má více záznamových pro měření a je možné jej rozšířit o vyhodnocovací jednotku. Oproti tomu u WMP-modulu je kladen důraz na jednoduchost a autonomní provoz.

U WMP-modulu by mohlo v budoucnu dojít k plnému přechodu na napájení pomocí piezoelementů. Použití SB-dataloggeru je energeticky náročnější, proto se jeho použití předpokládá spíše v místech s připojením na elektrickou energii, avšak i SB-datalogger je možné provozovat na akumulátory (délka provozu na jedno nabití je odhadována v jednotkách týdnů). Po přidání vyhodnocovací jednotky je tento řídící modul schopen i základního vyhodnocení nasbíraných dat, avšak to zvyšuje energetické nároky na toto zařízení.

Blíže jsou řídící moduly a celá architektura zařízení popsána v kapitole 3 Autonomní měřicí systém.

7. Matematický aparát

7.1. Měření a zpracování technického signálu

V reálném člověkem běžně vnímaném světě probíhají okolní jevy spojitě v závislosti na představě spojitého času. Analogové jevy jsou spojitě jak v čase, tak i v amplitudě. Tyto jevy jsme v technické praxi schopni analogově pouze měřit a ověřovat aktuální stav, ale již nejsme schopni strojově analogové jevy analogově zpracovávat, analyzovat a následně ukládat. Výsledkem každého měření je proto diskrétní hodnota nebo soubor hodnot, se kterými již stroje pracovat umí.

Analogový signál lze analogově uložit, ale je ukládán společně s rušivými vlivy okolního prostředí, které lze sice analogově omezit, nelze je však zcela eliminovat. Současné technologie neumí analogové signály zpracovávat. Při strojním zpracování signálů dochází vždy k diskretizaci měřených hodnot (zaznamenáváním spojitých hodnot v krátkých časových intervalech, v časových bodech).

Nevýhodou diskretizace analogového měření je ztráta spojitosti, ztráta části měřené informace a riziko nesprávné rekonstrukce analogového signálu. Riziku nesprávné zpětné rekonstrukce signálu je možno předejít vhodným vzorkováním původního signálu.

Pro efektivní práci a zpracování dat je výhodná jejich digitalizace.

7.1.1. Vzorkování signálu

Vzorkování signálu je převod spojitého nejčastěji analogického signálu na signál diskrétní, tj. na soubor jednotlivých za sebou řazených hodnot. Každá hodnota představuje hodnotu analogového signálu v daném časovém okamžiku. Tato řada je sestavena nejčastěji ve stejných časových rozestupech za sebou. Rychlost snímání jednotlivých za sebou řazených vzorků popisuje vzorkovací frekvence (neboli převrácená hodnota časového rozestupu mezi dvěma následujícími vzorky).

$$f_{vz} = \frac{1}{\Delta t} [Hz]$$

Vzorkovací frekvence, respektive řada diskrétních hodnot, musí podléhat jistým pravidlům, aby bylo možné z těchto diskrétních hodnot znovu rekonstruovat původní signál s přiměřenou přesností.

Základním pravidlem pro vzorkování a vzorkovací frekvenci je, aby vzorkování probíhalo dostatečně často, což shrnuje vzorkovací Shannon-Kotělníkův teorém. Tento teorém říká, že vzorkovací frekvence musí být aspoň 2krát vyšší, než je nejvyšší frekvence vzorkovaného signálu. Pokud tato podmínka splněna není, může dojít ke zkreslení rekonstruovaného signálu přeložením spekter, tzv. aliasingu.

$$f_{vz} \geq 2 \cdot f_{max}$$

Aliasing se projevuje v časové oblasti u vyšších frekvencí, než je dvojnásobek frekvence vzorkovací, nesprávnou rekonstrukcí původního signálu. Vyšší frekvence se rekonstruuje zrcadlově ke vzorkovací frekvenci do nižší spektrální oblasti a rekonstruovaná frekvence se pak jeví nižší než frekvence výchozí. Čím vyšší je vzorkovací frekvence než dvojnásobek nejvyšší frekvence obsažené ve sledovaném signálu, tím přesnější bude následná rekonstrukce původního signálu.

7.1.2. Kvantování signálu, A/D převodník

Jádrem digitalizace analogového signálu je A/D převodník. Tento převodník je velmi často složen ze zesilovačů, filtrů, vzorkovače a obvodem digitálního zpracování.

Na vstupu za snímačem je umístěn zesilovač signálu, který signál zesílí na úroveň potřebnou pro zpracování. Zesílený signál je podroben filtraci dolní propustí a případně i horní propustí. Dolní propust může být nastavena maximálně na dvojnásobek vzorkovací frekvence, aby působila i jako antialiasingový filtr. Po provedené filtraci je signál dále zpracováván, je provedeno vzorkování signálu a jednotlivé vzorky jsou převedeny na čísla ve dvojkové soustavě. Převedené hodnoty ale nepředstavují přesně změřené hodnoty analogových signálů, ale jsou převedeny na nejbližší hodnotu danou velikostí bitu A/D převodníku. Čím je vyšší počet bitů pro kvantování vzorků, tím je zaznamenávaná hodnota přesnější. Počet bitů představuje rozlišovací schopnost A/D převodníků. Ovšem s rostoucí rozlišovací schopností A/D převodníků klesá zároveň i rychlost ukládání převáděných vzorků.

Reálné A/D převodníky jsou zatíženy chybami zpracování. Jedná se o „chybu nuly“, jinak též aditivní chyba, kdy je ke každé hodnotě přičítána konstanta a signál se posouvá. Další chybou je „chyba zisku“, neboli multiplikativní chyba, která měřené hodnoty násobí a poslední je chyba linearity.

7.1.3. Filtrování signálu

Filtrování signálu je důležitá část procesu zpracování měřeného signálu. Filtr zajistí odstranění nežádoucích částí signálu a hodnotí se následně jen relevantní část.

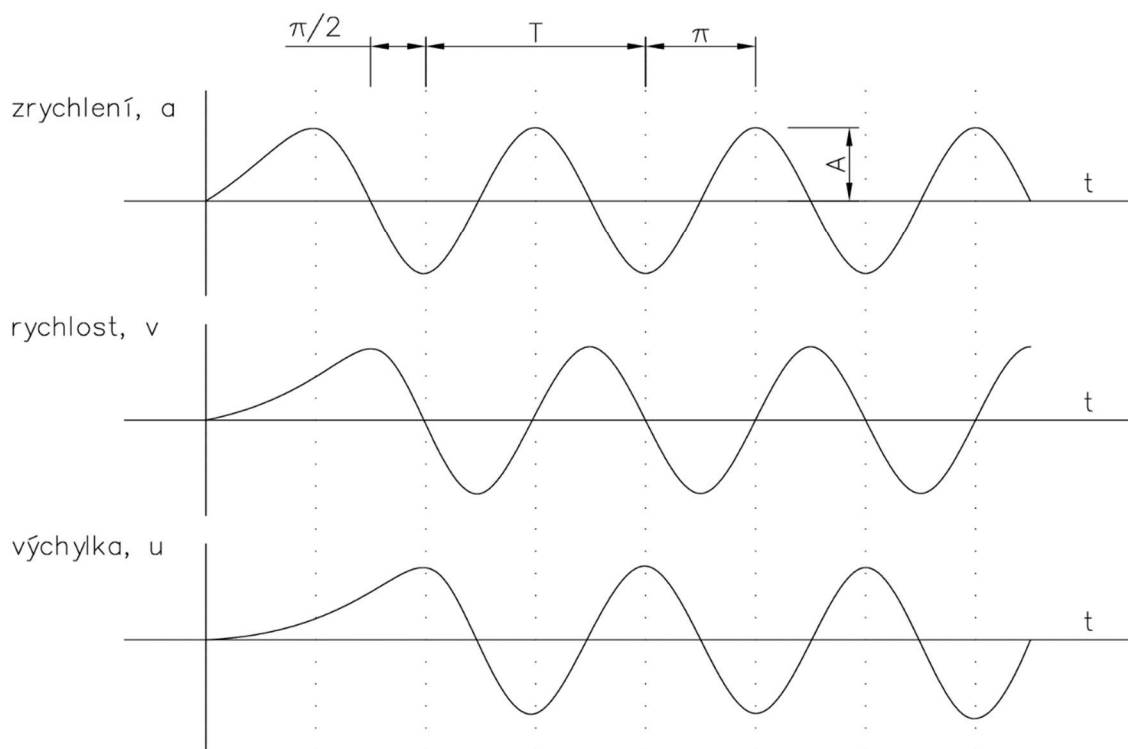
Filtr, který ořezává nízké frekvence a propouští pouze frekvence o vyšších kmitočtech se nazývá horní propust. Filtr, který naopak propouští pouze nižší frekvence a vyšší frekvence ze signálu odstraňuje se nazývá dolní propust. Je účelné ze signálu odstranit alespoň frekvence vyšší než dvojnásobek vzorkovací frekvence, protože pak nedochází k aliasing efektu. Dolní propust, která má nastavenou frekvenci přibližně na dvojnásobek vzorkovací můžeme označovat za antialiasingový filtr. Pokud jsou použity oba filtry, jak horní, tak i dolní propust, hovoříme o pásmovém filtru nebo též o pásmové propusti.

Sklon křivky útlumu filtru nám dává řád filtru. Čím strmější je křivka útlumu, tím je filtr tvrdší a tím menší je rozptyl frekvencí, které filtr dané hodnoty propustí. Ideální filtr má křivku útlumu svislou, ovšem ideální filtr v praxi neexistuje.

7.2. Výpočtové metody měřeného signálu

7.2.1. Analýza v časové oblasti

V časové oblasti nebo též v časové rovině je signál dynamické odezvy posuzován z hlediska výchylky, rychlosti a zrychlení daného konstrukčního prvku. V časové rovině je hodnoceno mechanické kmitání konstrukce a jeho projevy. Jednotlivé charakteristiky jsou na sobě závislé a projevují se mezi sebou vždy s fázovým posunem $\pi/2$.



Obrázek 25 - Vzájemný vztah zrychlení, rychlosti a výchylky, zdroj: autor

Vzájemný vztah jednotlivých veličin je vyjádřen následujícími matematickými rovnicemi:

$$u = A \cdot \sin \omega t$$

$$v = \frac{du}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos \omega t$$

$$v = A \cdot \omega = A \cdot 2\pi \cdot f$$

$$a = \frac{d^2u}{dt^2} = A \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t$$

$$a = A \cdot \omega^2 = A \cdot 4\pi^2 f^2$$

Označení výchylky je u , rychlost je značena v , zrychlení a , maximální výchylka neboli amplituda je označena písmenem A , ω je úhlová rychlost a f je úhlová frekvence. Poslední značenou veličinou je čas t .

Při hodnocení konstrukcí se nejvíce uplatnilo měření zrychlení z důvodu jednoduchosti a dostupnosti potřebných čidel. Měřena byla i výchylka, ale jen jako ověřovací měření, protože při měření výchylek je problém s uchycením čidel a stanovením pevného vztažného bodu.

7.3. Matematické metody vyhodnocení dat

7.3.1. Statistické metody

V práci byly hojně zastoupeny statistické metody z oboru popisné statistiky. Tento druh statistiky analyzuje kvantitativní vlastnosti daného souboru sledovaných entit. Mezi nejčastěji používanými charakteristikami byly suma hodnot souboru, průměrná hodnota, minimální a maximální hodnota a méně pak byla zastoupena směrodatná odchylka.

Aritmetický průměr	$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$
--------------------	---

Mějme uspořádaný výběr hodnot	$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_n$, pak:
-------------------------------	--

Minimální hodnota	$x_{min} = x_1$
-------------------	-----------------

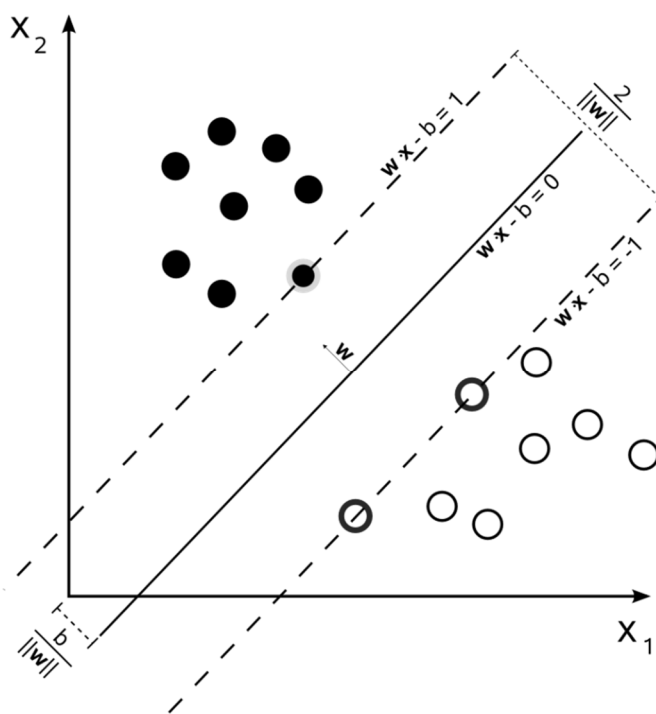
Maximální hodnota	$x_{max} = x_n$
-------------------	-----------------

Výběrový rozptyl	$s_{n-1}^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
------------------	--

Výběrová směrodatná odchylka	$s_{n-1} = \sqrt{s_{n-1}^2}$
------------------------------	------------------------------

7.3.2. Metoda SVM – metoda pomocných vektorů

Metoda SVM (Support Vector Machine), metoda podpůrných vektorů je metodou z oblasti strojového učení. Slouží především pro klasifikaci entit, ale je využitelná i pro regresní analýzu. Základem metody je převedení příznaků dat pomocí jádrové transformace do vyšší dimenze a následně se data oddělí lineální nadrovinou. Snahou při vytváření nadroviny je umístit nadrovinu v prostoru tak, aby hodnota minima vzdálenosti bodů od navrhované roviny byla co největší. Jinými slovy, aby data jednotlivých hodnocených tříd byla od sebe oddělena co možná nejširším pruhem bez dat.



Obrázek 26 – Optimální nadrovina, zdroj: cs.wikipedia.org

Dělicí nadrovinu je možno popsat matematicky jako:

$$\vec{w} \cdot \vec{x} - b = 0$$

Okraje hodnocených tříd metodou SVM jsou dány vztahy:

$$\vec{w} \cdot \vec{x} + b \geq 1 \text{ pro } y_i = 1 (\text{pro 1. hodnocenou třídu})$$

$$\vec{w} \cdot \vec{x} + b \leq -1 \text{ pro } y_i = -1 (\text{pro 2. hodnocenou třídu})$$

Uvedené vztahy vyjadřují přímo podpůrné vektory a vymezují hranice tříd. Vektor $\vec{w}$ představuje normálu dělicí nadroviny, $\vec{x}$ je bod (obecně p-dimenzionální reálný vektor), y_i je klasifikátorem, který nabývá hodnot +1 a -1 pro určení, do které z hodnocených tříd daný výsledek spadá.

7.3.3. Další matematické metody

RMS

RMS (Root Mean Square, česky efektivní hodnota nebo též kvadratický průměr) byla jednou z prvních použitých metod pro vyhodnocení. Tato metoda převádí signál zrychlení, který nabývá kladných i záporných hodnot, na signál s pouze kladnými hodnotami. Protože se

jedná o průměr hodnot, bylo nutno tuto metodu použít pouze na malém okénku signálu (při širokém okně, by docházelo k nežádoucí ztrátě informace ze signálu).

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

Nebylo účelné mít pro celý rozsah pouze jednu hodnotu RMS, ale hodnoty RMS byly počítány na jednotlivých okénkách. Velikost okénka byla určena na základě okrajových podmínek na 250 zaznamenaných hodnot v signálu zrychlení a krok posunu okénka byl stanoven na 5 hodnot.

Jak se ukázalo, tento postup byl vhodný pouze pro kvalitní signál dynamické odezvy a zároveň bylo nutné, aby byl rozptýl maximálních amplitud vyvozených jednotlivými snímanými koly malý. Tedy, aby všechny výchylky zrychlení byly přibližně stejně velké. Tyto podmínky splňovaly vesměs pouze osobní elektrické jednotky, které mají všechny vozy přibližně stejně hmotné. Osobní vlak s řazenou lokomotivou tímto přístupem nebylo možné hodnotit, proto se tato metoda v dalším posouzení již neuplatnila.

Kumulativní součet

Další metodou, která byla v průběhu zpracování zkoušena byl kumulativní součet výchylek zrychlení. Tato metoda vycházela z předpokladu, že výchylky zrychlení oscilují okolo nulové hodnoty, a že tímto postupem dojde k vyhlazení protichůdných výchylek a po zpracování se projeví jen relevantní data generovaná průjezdem vlakové soupravy.

$$x_n = \sum_{i=1}^n x_i$$

Jak bylo následně zjištěno, do tohoto kumulovaného součtu se propisovaly i měřené imperfekce a mimo odezvu od pojezdu železničních kol se do výstupu propisovaly i nežádoucí trendy.

Wavelet-transformace

Ve výstupu kumulativního součtu se projevovaly posuny výsledků a vytvářela se ve výstupu druhotná vlna. Z průběhu lze usuzovat, že na konstrukci probíhá nějaký systematický doprovodný děj, u které není dosud přesně vysvětleno, co jej způsobuje. Pro eliminaci tohoto (z matematického hlediska) nežádoucího jevu a srovnání výstupů se základní osou pro potřebu dalších analýz byla zkoušena filtrace signálu pomocí Wavelet transformace.

Základní myšlenkou této transformace je dekompozice signálu v časově-frekvenční rovině na jednotlivé dílčí složky. Dekompozice signálu na nejnižších frekvencích představuje v signálu nejdelší trend, který je požadováno eliminovat.

Spojité Wavelet transformace (WT) je dána vztahy:

$$WT(\tau, S) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi_{\tau, S}(t) \cdot dt$$

$$\psi_{\tau, S}(t) = \frac{1}{\sqrt{|S|}} \cdot \Psi\left(\frac{t - \tau}{S}\right)$$

kde τ je časové posunutí, S je měřítko, Ψ je transformační funkce – mateční wavelet a $x(t)$ je analyzovaný signál.

Při pokusech s touto transformací byla snaha o vyrovnaní dlouhého trendu kumulativního součtu, avšak v průběhu zpracování této práce nebyl nalezen univerzálně použitelný transformační wavelet, který by dal přijatelné výsledky. Kumulativní součet jako vyhodnocovací metoda má svůj potenciál a je doporučeno tuto metodu zkoušet s více druhy transformačních waveletů, případně použít jiný druh transformace k vyrovnaní dlouhého trendu kumulativního součtu.

7.4. Použitý výpočtový software

Pro analýzu naměřených dat a následné zpracování byly použity dva základní programy, kterými jsou LibreOffice Calc a GNU Octave.

7.4.1. LibreOffice Calc

Program LibreOffice Calc je tabulkový procesor na zpracování tabulek a grafů. Pro předkládanou práci byla použita verze 6.2.4.2. Program byl využíván na řazení dat do tabulek a následné vytváření grafů. Dále pro jednodušší úlohy při zpracování dat, a to zejména statistické analýzy. Program je plně kompatibilní s programem Excel od společnosti Microsoft a část dat byla zpracována i v tomto programu, primárně však byl využíván LibreOffice Calc.

7.4.2. GNU Octave

GNU Octave je software obsahující vlastní programovací jazyk se stručnou jednoduchou syntaxí primárně zaměřený na numerické výpočty. Pomocí Octave lze řešit jak lineární, tak nelineární matematické problémy, statistiku, ale také třeba pokročilejší metody strojního učení (neuronové sítě ap.). Program má své grafické rozhraní a rozhraní příkazového řádku. Pro zobrazování výsledků má GNU Octave vestavěné vizualizační prostředí. Je snadno rozšiřitelný pomocí uživatelských knihoven, ve kterých jsou předdefinovány nové funkce, které vlastní jádro programu neobsahuje.

Pro řešení analýz v rámci práce byly k základnímu programu GNU Octave ve verzi 4.2.1 přidány moduly pro řešení signálové analýzy a řešení Fourierových transformací. Dalším modulem byl modul pro řešení SVM (Support vector machine) a využívány byly též knihovny pro statistiku. Výhodou programu GNU Octave je snadná dostupnost všech knihoven zdarma a možnost naprogramovat si své vlastní knihovny a zveřejnit je.

GNU Octave je volně šiřitelný software pod licencí GNU General Public License (GPL). GNU Octave je obdobou komerčního programu Matlab, se kterým má mnoho procesů kompatibilních a lze tyto procesy převést z jednoho programu do druhého. GNU Octave nemá sice tak výkonné jádro jako komerční Matlab, který používá JIT kompilátor, ale pro analýzy a vyhodnocení dat dynamické odezvy byl zcela dostačující.

Cílem práce bylo mimo jiné najít jednoduché, efektivní a výpočetně nenáročné řešení vyhodnocování dynamické odezvy na železniční konstrukci, proto i z tohoto pohledu je použití programu GNU Octave vlastně vhodnější než použití výkonnostně lepšího komerčního produktu Matlab.

8. Realizace měření

Cílem práce byl návrh algoritmů pro vyhodnocení stavu podbití železniční konstrukce a sestavení autonomního měřicího zařízení s možností okamžitého vyhodnocení získaných dat. Dalším cílem bylo též ověření možnosti pomocí navržených algoritmů vyhodnocovat stav podbití železniční konstrukce i ex-post na základně dat získávaných pro jiné účely.

Byla provedena měření in-situ k ověření navržených algoritmů pro navrhovaný autonomní měřicí modul a dále byla posuzována data z měření, která nebyla primárně určena pro sledování stavu podbití.

8.1. Příprava měření

8.1.1. Výběr vhodného stanoviště měření

Pro každé měření bylo potřeba připravit odpovídající měřicí místo. Ohledně místa měření byl rozdíl v požadavcích na měřicí místo pro testování a ověřování funkčnosti navržené autonomní měřicí aparatury a měřicího místa v případě následného uvedení do provozu.

Stanoviště pro vývoj měřicího systému

U každého nového prvku v železniční trati, zařízení nebo technologického postupu musí být nejdříve provedeny ověřovací zkoušky vlastností a kvality. K tomu má Správa železnic, státní organizace, která spravuje státní dráhy v České republice, zaveden „Systém péče o kvalitu v oblasti traťového hospodářství“ [26]. Podle tohoto předpisu správce dráhy rozhodne o způsobu ověření vlastností a kvality daného prvku nebo postupu, přičemž je často tímto způsobem provozní ověření vlastností v provozované trati. Pro průkaznost zkoušek je vhodné volit spíše náročnější podmínky, aby byly vlastnosti daného prvku nebo postupu s určitostí prokázány. Obecně platná pravidla pro výběr zkušebních úseků nejsou dána, výběr místa je proveden vždy na základě více faktorů a daných předpokladů, ovšem vybraný zkušební úsek je pak nutno provést v souladu s technickoprovozními požadavky, které uvádí norma ČSN EN 13146-8 [20] a ČSN ISO 3095 [].

Některé z prováděných zkoušek nemohou být prováděny bez dozoru obsluhy měření, proto je třeba mnohdy řešit i organizační záležitosti s ohledem na předpis Bp1 o bezpečnosti a ochraně zdraví při práci [27]. Na zkušebních úsecích s povolenou rychlostí nad 120 km/h musí být při instalaci měřicí aparatury a při provádění měření s lidskou obsluhou zajištěno předávání informací o jízdě drážních vozidel mezi zpracovatelem měření a zaměstnancem zajišťujícím provoz na předmětném zkušebním úseku. Proto je nutné vybrat takový zkušební úsek, na kterém bude možné zajistit spolehlivé spojení s dopravní kanceláří dle předem domluvené formy komunikace (pomocí mobilního telefonu, rádiové vysílačky, přes síť GSM-R atd.). Pokud na daném místě zkušebního úseku nelze zajistit spolehlivé spojení s dopravní kanceláří, je nutné buď vybrat jiné měřicí místo, kde spolehlivé spojení bude zajištěno nebo v krajním případě dočasně omezit provozní rychlost, což však může být u některých typů měření problém a mimo to, je omezování provozní rychlosti pro všechny dotčené nežádoucí stav.

Mimo normativní požadavky na měřicí místo v podobě směrnic, předpisů a norem je třeba při výběru stanoviště přihlídnout k praktickým potřebám při provádění měření. Na prvním místě je nutno zmínit bezpečnost. I když je zajištěna bezpečnost práce v kolejišti dle příslušných předpisů a je zajištěno spojení s dopravní kanceláří a dohodnuto informování o

průjezdu vlaků, vždy je lepší vybírat pro měření taková stanoviště, která mají výborné rozhledové poměry, aby každý z účastníků měření měl možnost dbát o svou osobní bezpečnost. V místě měření musí být trať přístupná, musí umožňovat bezpečný a bezproblémový pohyb obsluhy měření v kolejišti a také bezpečnou manipulaci s příslušným vybavením a měřicí aparaturou. Je nutné vymezit bezpečný prostor, kam se obsluha měření stáhne při průjezdu vlaku. Vhodné je též myslet na umístění výpočetní techniky a celkového zázemí měření.

Dalším praktickým požadavkem je dobrá dostupnost měřicího místa, nejlépe s příjezdem osobním vozidlem do blízkosti tohoto místa. Důvodem je přesun měřicí aparatury, výpočetní techniky, kabeláže a potřebného nářadí na místo měření.

Aby bylo možné měření provést, je nutné zajistit napájení elektrickou energií. Pro dlouhodobější měření je vhodnější nalézt místo měření s dosahem pevného zdroje elektrického napětí 230 V. Pro krátkodobější měření je dostačující zajištění elektrické energie pomocí diesel-agregátu nebo baterií s měničem napětí.

Stanoviště měření pro běžný provoz

Výběr stanoviště pro umístění autonomního měřicího systému je ve své podstatě bez zásadnějších omezení.

V době instalace systému musí být samozřejmě splněny všechny předpisy pro pohyb a práci v kolejišti. V tomto bodě se požadavky na měřicí stanoviště v plném provozu a stanoviště pro vývoj měřicího systému v zásadě nemění.

Rozdíl při instalaci autonomního systému je, že není třeba objemná výpočetní technika a stejně tak není třeba zajišťovat dodávku elektrické energie. Z tohoto pohledu jsou požadavky na přístupnost míst nižší než v případě místa pro vývoj měřicího systému. Také délka instalace a propojení všech komponent je kratší. Je tedy vhodné v dané lokalitě hledat dopravní sedlo, aby byla instalace měřicího systému rušena průjezdy vlaků co nejméně.

Omezení na stanoviště dané návrhem měřicího systému je blízkost výhybek. Měřicí místo by mělo být s ohledem na umístění triggerů minimálně 90 – 110 m od výhybky. Při umístění blíže k výhybce by musela být řešena jízda vlaku v odbočné větvi a spouštění záznamu. Do měřicí aparatury by pak bylo třeba přidat třetí trigger na odbočnou větev výhybky a řešit jejich vzájemnou koordinaci.

Z pohledu zjišťování stavu podbití nemá samozřejmě význam měřicí systém osazovat do míst, kde se kolejové lože nenachází (např. na přímo pojížděné mostní objekty), ale principiálně lze tento systém umístit i na tyto konstrukce.

8.1.2. Měřicí aparatura

Měřicí aparatura pro všechna uvedená měření byla stejná, pouze rozložení jednotlivých komponent se lišilo v případě měření v lokalitě Doubravice nad Svitavou od zbývajících dvou lokalit.

Základem měřicí aparatury byla měřicí ústředna DEWETRON (DEWE-2502) s integrovaným počítačem s operačním systémem Windows. Tento přístroj obsahuje 16 analogových vstupů pro měření zrychlení vibrací, 16 napěťových vstupů a 12 vstupů pro

indukčnostní snímače, dále poskytuje možnost vytvořit virtuální kanály a na nich provádět další operace jako je filtrování signálů, integrace pro převod v závislosti na čase a další. Měření prováděná na DEWETRONu byla průběžně ukládána do jeho vnitřní paměti a následně byla obsluhou měření ještě zálohována na FLASH disky.



Obrázek 27 - Měřicí stanoviště, zdroj: autor

Hlavními čidly pro měření dynamické odezvy konstrukce byly piezoelektrické snímače zrychlení (akcelerometry), konkrétně byly použity jednoosé (B&K 4507 B) a tříosé (B&K 4524 B) snímače zrychlení od společnosti Brüel & Kjær. Snímače byly ke konstrukci uchyceny pomocí originálních plastových úchytek, určených přímo pro tento typ snímačů. Podložky byly k přilepeny k očištěnému povrchu konstrukce (ať již k patě kolejnice nebo na hlavu pražce).

Snímače při měření v Doubravici nad Svitavou byly osazeny v řadě za sebou na jednotlivé pražce, v lokalitách Hranice na Moravě a Napajedla byly snímače osazeny v jednom profilu na jednotlivé prvky kolejového roštu. Rozložení snímačů je popsáno v rámci jednotlivých měřených lokalit.

Pro ověření polohy dvojkolí vlakové soupravy v měřeném signálu se osvědčilo do měřicí sestavy přidat na hlavu pražce i snímač posunu, který zaznamenával pohyby ve svislé ose (osa Z). Z měřených posunů bylo možné následně jasně identifikovat polohu dvojkolí. Naměřené výchylky posunu (zatlačení pražce do podloží) se však ve výsledném hodnocení dynamické odezvy konstrukce neuplatnily. Pro měření posunů pražce byl použit snímač s odpruženým

hrotem, instalace tohoto snímače na měřicím místě byla provedena uchycením speciálním ramenem na ocelovou tyč průměru 20 mm, zaraženou skrz kolejové lože do hloubky 800 mm. Ocelová tyč zaražená do kolejového lože a do podkladních vrstev tak byla pevným vztažným bodem pro měření průhybů pražce. Tento pevný bod bylo však nutno brát s rezervou, protože ocelová tyč zaražená skrz kolejové lože se pohybovala společně s pohyby podloží železniční tratě a potažmo i s pohyby kolejového lože. Tyto pohyby byly ovšem ve srovnání s pohyby pražce zanedbatelné a výsledky tohoto měření byly jen pomocné, ověřovací, na navrhované metody a algoritmy neměly žádný faktický vliv. Ve finální verzi autonomního měřicího systému se s měřením posunů nepočítá.



Obrázek 28 - Snímač posunu, zdroj: autor

Posledním měřicím prvkem, který byl použit, byl ruční radar Bushnell 10-1900. Tímto radarem byla měřena rychlost projíždějících vlakových souprav, zaznamenaná rychlost byla ručně zapisována do připraveného formuláře a následně po skončení měření byly údaje o rychlostech jednotlivých vlaků přepsány do elektronické podoby textového dokumentu.

Nastavení snímaných rozsahů

Před zahájením každého měření bylo třeba ověřit pomocí kalibrátoru, že všechna čidla fungují správně a také bylo zapotřebí v měřicí ústředně DEWETRON nastavit všechny příslušné měřicí rozsahy čidel.

Kalibrace snímače posunu proběhla in-situ po osazení na hlavu pražce pomocí Johansonových kostek. Kalibrace akcelerometrů byla provedena předem v laboratorních podmínkách pomocí kalibrátoru 4294 společnosti Brüel & Kjær. V místě měření byly

akcelerometry již jen zapojeny do vlastní měřicí sestavy a v měřicí ústředně byly nastaveny příslušné měřicí rozsahy čidel.

Nastavení pracovních rozsahů jednotlivých snímačů bylo možné provést až po zapojení snímačů do měřicí ústředny. Hodnoty jednotlivých nastavení byly výsledkem celého souboru různých požadavků. U akcelerometrů byly nastavovány hodnoty dolní a horní propusti a nejdůležitějším nastavovaným parametrem byla vzorkovací frekvence.

Dolní propust (tj. filtr propouštějící všechny frekvence, které jsou nižší než nastavená mez), byla nastavena na hodnotu 1 kHz. Vyšší frekvence kmitání nemá na sledovanou konstrukci z hlediska dynamické odezvy významnější vliv, u vyšších frekvencí kmitání začíná převažovat emise hluku nad šířením vibrací prostředím. Proto tedy byla dolní propust nastavena na 1 kHz.

Horní propust (tj. filtr propouštějící všechny frekvence, které jsou vyšší než nastavená mez), byla nastavena na hodnotu 3,4 Hz. Tento filtr měl za úkol odfiltrovat všechny nežádoucí nízké frekvence, které se mohly v měřeném signálu vyskytnout. Z hlediska dynamických účinků nemají frekvence pod 3,4 Hz na konstrukci žádný významný vliv, ale na nízkých frekvencích se mohou vyskytovat různé druhy šumů a rušení signálu, které by měřený signál mohly zkreslovat.

Z důvodu minimalizace zkreslení výstupního měřeného signálu byla přijata příslušná opatření v podobě nastavení frekvenčních filtrů, a byly také použity stíněné přenosové kabely, které působení nepříznivých vlivů dále snižují.

U nastavení vzorkovací frekvence bylo zapotřebí vzít v potaz fyzikální vlastnosti měřených jevů, předpokládané využití měření, ale byla zohledněna i velikost datového toku. Datový tok pro měřicí ústředny se zajištěným trvalým napájením (ať již pomocí benzinových elektrocentrál nebo připojením k rozvodné síti elektrické energie) není problémem. Objemy ukládaných dat nejsou při použití měřicí ústředny s trvalým napájením problémem ani z pohledu výkonu, ani z pohledu energetické náročnosti. U autonomních zařízení využívající baterie je však datový tok, a s ním spojená spotřeba energie, významným kritériem ovlivňující vlastní nastavení měřicí sestavy. Práce je zaměřena na zpracování dynamické odezvy na železniční konstrukci, se zaměřením na vibrace na pražcích, které slouží k následnému hodnocení jak konstrukce, tak i železničních vozů. Měřicí aparatura by však měla umožňovat měření v celém frekvenčním pásmu dynamických účinků vyvozených na železniční konstrukci. Měla by umožnit nejen měření vibrací konstrukce, ale i měření hluku vyvozeného pojezdem železniční soupravy. Rozhodujícím faktorem tedy byla v tomto případě možnost měřit zvuk, který se z fyzikální podstaty realizuje ve vyšších frekvenčních pásmech. Oblast slyšitelného zvuku pro člověka se pohybuje rámcově v rozmezí 15 Hz – 20 kHz. Zvuky na horní hranici 20 kHz jsou schopni registrovat pouze někteří jedinci, mladí lidé v běžné populaci slyší zvuky cca do 16 kHz, přičemž s přibývajícím věkem se tato hranice snižuje. S ohledem na výše zmíněné byla tedy za výchozí maximální měřenou frekvenci pro měření zvukových projevů dynamické odezvy použita frekvence 15 kHz, která pokrývá téměř celé pásmo slyšitelnosti, a také velikost datových toků při následném stanovení vzorkovací frekvence byla přijatelná. Měřený signál ve vztahu ke vzorkovací frekvenci musí splňovat Shannon-Kotělníkův vzorkovací teorém, který udává, že vzorkovací frekvence musí být alespoň 2 krát větší než nejvyšší měřená frekvence vzorkovaného signálu. Pokud toto pravidlo není dodrženo, dochází ke zkreslení signálu, k tzv. aliasingu. Všechna omezující kritéria vedla ke stanovení vzorkovací frekvence na hodnotě 30 kHz a s touto vzorkovací frekvencí byla prováděna veškerá měření.

Při měření vibrací s nastavenou dolní propustí 1 kHz byly požadavky na vzorkovací frekvenci násobně splněny, nutno však podotknout, že při měření hluku od pojezdu vlakových souprav je třeba vždy nastavit filtr dolní propusti na maximálně 15 kHz (nebo méně).

8.2. Lokalita Doubravice nad Svitavou

Měřicí stanoviště je situováno cca 1,1 km severně od obce Doubravice nad Svitavou ve staničení km 189,900 na trati č. 260 Brno – Česká Třebová. Trať je navržena pro traťovou třídu zatížení D4 a je součástí I. tranzitního koridoru. Trať je dvojkolejná, elektrifikovaná s napájecí soustavou 25kV / 50 Hz. Maximální dovolená rychlost pro vozy s naklápěcími skříněmi je v daném úseku 140 km/h, pro vlaky s kotoučovými brzdami 125 km/h a pro ostatní vlaky je maximální rychlost 120 km/h. Měřicí stanoviště se nachází v přímém úseku trati, na násypovém tělese výšky 3,5 m. Podélný sklon trati ve směru staničení je 5 ‰ (tj. ve směru Doubravice nad Svitavou -> Skalice nad Svitavou). Železniční svršek je tvořen kolejnicemi UIC60 (nově značených jako 60E1), bezpodkladnicovým upevněním Vossloh W14 a příčné kolejové podpory tvoří betonové pražce B91 S/1.

8.2.1. Provedení měření

V lokalitě Doubravice nad Svitavou byla provedena dvě měření s odstupem dvou měsíců. Měření bylo provedeno na úseku trati, který byl na základě dat získaných měřícím vozem určen k podbití. V tomto úseku bylo prováděno pouze podbití trati, kolejový rošt zůstal bez zásahu. (U některých dalších úseků v rámci prováděných oprav byly broušeny kolejnice, případně byly i vyměňovány kolejnicové pásy.)

První měření bylo provedeno 9.6.2022, jen pár dní před podbíjením kolejového roštu. Druhé měření bylo provedeno dne 18.8.2022 po prvotní konsolidaci šterkového lože po podbití.

Při obou měřících kampaních bylo použito stejné rozložení jednotlivých snímačů. Pro umístění snímačů zrychlení při druhém měření byly použity úchyty, které zůstaly na pražcích uchyceny měření z prvního. Před osazením snímačů byla ověřena pevnost přichycení, a protože úchyty nevykazovaly žádné zjevné vady, byly do nich snímače i při druhém měření osazeny.

Přestože se dle metodiky měření předpokládá umístění snímačů zrychlení na 1., 3., 5. a 7. pražec, pro potřeby měření byly snímače zrychlení osazeny na všechny pražce od 1. po 7. pražec. Na pražec uprostřed měřící sestavy byl umístěn tříosý snímač zrychlení, na ostatní pražce byly osazeny pouze jednoosé snímače se záznamem výchylky v ose z. Na prostřední, 4. pražec byl mimo tříosého snímače zrychlení umístěn i snímač posunů.

Rychlost projíždějících vlakových souprav byla zaznamenávána ručním radarem Bushnell.



Obrázek 29 - Osazení snímačů zrychlení, zdroj: autor

První měření před podbitím (9.6.2022)

První měření ve sledované lokalitě Doubravice nad Svitavou proběhlo ve čtvrtek 9.6.2022 v čase 9:00 – 16:30 hod. Na začátku měření byla teplota ve stínu 15 °C, maximální teplota ve 14 hodin byla 19 °C. Počátkem dne bylo jasno, po poledni polojasno, celý den bylo beze srážek. Rychlost větru se pohybovala v rozmezí 2,5 – 4,5 m/s. Tlak vzduchu byl na hodnotě 1011 hPa. Povětrnostní podmínky výsledky měření nijak zásadně neovlivnili, výsledky lze tedy považovat za relevantní.

V čase 9:00 – 10:00 byla provedena instalace snímačů, ověření všech funkčních prvků, nastavení příslušných měřicích rozsahů a zprovoznění celého systému. Při přípravě měřicího stanoviště byl přítomen pověřený pracovník správce dopravní cesty. Vlastní měření proběhlo již mimo provozovanou kolej.

První vlaková souprava byla zaznamenána v 10:16. Celkem bylo zaznamenáno v rámci měřicí kampaně 13 vlakových souprav. Poslední záznam byl učiněn v 15:47.

Po ukončení měření bylo měřicí místo uvedeno opět do původního stavu, a pověřený pracovník správce dráhy vydal souhlas s opuštěním stanoviště.

Druhé měření po podbití (18.8.2022)

Druhé měření v Doubravici nad Svitavou proběhlo opět ve čtvrtek dne 18.8.2022 ve stejný čas jako první měření, tedy v 9:00 – 16:30 hod. Teplota v průběhu měření byla 25 – 31 °C, po celý den bylo oblačno (zataženo střední oblačností). Celý den byl beze srážek, rychlost větru se pohybovala v rozsahu 2,5 – 3 m/s a tlak vzduchu byl na hodnotě 1011 hPa.

Čas instalace měřicí aparatury byl stejný jako v případě prvního měření. Instalace snímačů, ověření všech funkčních prvků a nastavení příslušných měřicích rozsahů probíhal od 9. hodiny ráni. Systém byl zprovozněn v 9:50. Při přípravě měřicího stanoviště byl opět přítomen pověřený pracovník správce dopravní cesty. Při vlastním měření byla obsluha měřicí aparatury již mimo provozovanou kolej.

Pro překryv jednotlivých měřených vlakových souprav byla první měřenou vlakovou soupravou souprava s průjezdem kolem stanoviště v 10:20. Celkem bylo zaznamenáno v rámci měřicí kampaně 16 vlakových souprav. Poslední záznam byl učiněn v 15:48.

Po ukončení měření bylo měřicí místo uvedeno opět do původního stavu, a pověřený pracovník správce dráhy vydal souhlas s opuštěním stanoviště.

8.2.2. Zaznamenané vlakové soupravy

V předmětném úseku jezdila pouze část běžného objemu dopravy z důvodu rekonstrukce úseku trati Brno-Maloměřice – Blansko se zavedeným nickolejným provozem v tomto úseku trati, tzn. že na tomto traťovém úseku byla vyloučena veškerá železniční doprava. Část dopravy projíždějící běžně měřeným úsekem tedy byla vedena odklonem směr Tišnov, jednalo se zejména o mezinárodní vlaky vyšší kvality EC, IC, SC a o nákladní dopravu. Na stanovené výzkumné cíle však toto omezení dopravy nemělo vliv, protože pro posouzení stavu podbití je vhodné vyhledávat pouze osobní vlakové soupravy, které mají menší rozptýl hmotností jednotlivých vozů a na sledovanou konstrukci působí rovnoměrněji. V průběhu měření byly zaznamenány jak osobní vlaky a rychlíky, tak i nákladní vlaky.

První měření před podbitím (9.6.2022)

Lokalita:	DOUBRAVICE NAD SVITAVOU, 9.6.2021					
Pořadí (ID)	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr jízdy	Rychlost [km/h]
1	10:16	R	660	5	Blansko	100
2	10:22	Os	560	5	Blansko	90
3	11:15	Os	263	5	Blansko	85
4	12:18	Os	640	3	Blansko	78
5	13:16	Os	560	5	Blansko	98
6	13:46	Os	560	5	Blansko	88
7	14:19	R	380	7	Blansko	105
8	14:24	Os	263	5	Blansko	89
9	14:46	Os	263	5	Blansko	97
10	15:16	Na	363	30	Blansko	70
11	15:19	Os	650	5	Blansko	96
12	15:45	Sp	362	4	Blansko	103
13	15:47	Os	640	3	Blansko	83

Tabulka 3 - Zaznamenané vlaky, Doubravice n S., červen

Druhé měření po podbití (18.8.2022)

Lokalita:	DOUBRAVICE NAD SVITAVOU, 18.8.2021					
Pořadí (ID)	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr jízdy	Rychlost [km/h]
1	10:20	Os	242	5	Blansko	92
2	10:26	R	660	5	Blansko	110-120
3	10:45	Na	363	16	Svitavy	82
4	11:16	Os	263	5	Blansko	81
5	12:19	Os	640	3	Blansko	89
6	13:16	Os	560	5	Blansko	93
7	13:47	Os	560	5	Blansko	81
8	14:13	R	380	7	Blansko	117-124
9	14:21	Os	242	5	Blansko	79
10	14:27	Na	363	11	Blansko	70
11	14:47	Os	263	5	Blansko	108
12	15:03	Na	363	32	Blansko	81
13	15:16	Os	650	5	Blansko	86
14	15:32	MVT	810	2	Blansko	73
15	15:46	Sp	362	4	Blansko	106-111
16	15:48	Os	640	3	Blansko	106

Tabulka 4 - Zaznamenané vlaky, Doubravice n S., srpen

8.3. Lokalita Hranice na Moravě

Měřicí stanoviště je situováno cca 1,7 km severovýchodně od stanice Hranice na Moravě ve staničení km 213,692 na trati č. 270 Česká Třebová – Přerov – Bohumín. Trať je navržena pro traťovou třídu zatížení D4 a je součástí II. a III. tranzitního koridoru. Trať je dvojkolejná, elektrifikovaná s napájecí soustavou 3kV stejnosměrné trakce. Maximální dovolená rychlost pro vozy s naklápečími skříněmi je v daném úseku 150 km/h, pro ostatní vlaky je maximální rychlost 120 km/h. Měřicí stanoviště se nachází ve směrovém oblouku o poloměru R 704 m, projektované převýšení je D = 113 mm, nedostatek převýšení I = 90 mm, přechodnice je řešena kubickou parabolou, železniční konstrukce je v úrovni terénu s oboustrannými příkopy. Podélný sklon trati ve směru staničení je 4,6 ‰ (tj. ve směru Hranice na Moravě -> Bohumín podélný sklon stoupá). Železniční svršek je tvořen kolejnicemi UIC60 (nově značených jako 60E1), bezpodkladnicovým upevněním Vossloh W14 a příčné kolejové podpory tvoří betonové pražce B91 S/1.

Rekonstrukce trati proběhla v roce 2004, podstatnější údržba proběhla v roce 2009, kdy byly broušeny kolejnice a provedeno souvislé podbití trati, měření bylo provedeno 2013.

8.3.1. Provedení měření

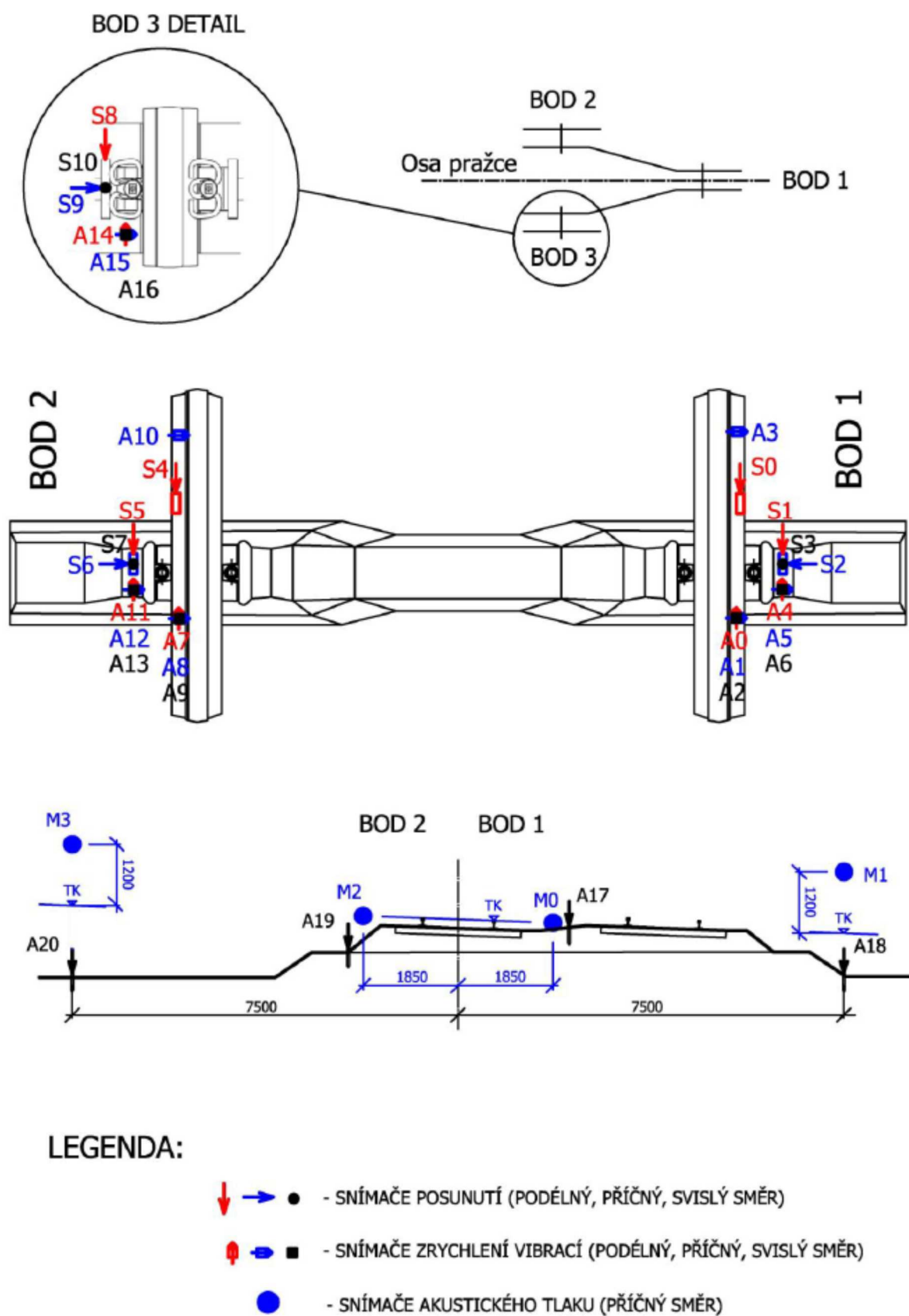
Metodika měření na stanovišti Hranice na Moravě byla uzpůsobena k porovnávání upevnění kolejnic u jednotlivých železničních sestav. Primárně tedy nebyla určena pro diagnostiku stavu podbití a pro určení pozice dvojkolí v rámci vlakové soupravy. Toto měření však společně s měřením v lokalitě Napajedla bylo do hodnocení přidáno z důvodu ověření použitelnosti naměřených dat i v rámci jiných měření, se snahou identifikovat případné problémy pro vyhodnocení takovýchto měření.

Spektrum použitých snímačů a jejich poloh v rámci kolejového roštu je různorodější než u měření v lokalitě Doubravice nad Svitavou, které bylo určeno primárně k identifikaci polohy dvojkolí v rámci vlakové soupravy a určení stavu podbití. Schéma rozložení snímačů je uvedeno na obrázku 30. Pro měření byly použity tříosé snímače zrychlení umístěné na patě pražce na obou jeho koncích, dále byly tříosé snímače zrychlení osazeny na patu kolejnice co nejblíže místa uchycení a jednoosé snímače zrychlení, které byly osazeny na patu kolejnice do středu vzdálenosti mezi pražci zaznamenávající příčné zrychlení kolejnicového pásu.

Pro měření bylo předepsáno i značné množství snímačů posunů, které zaznamenávaly na obou stranách koleje posuny v místě upevnění ve všech třech osách a na každém kolejnicovém pásu také podélný posun.

Vlastní měření proběhlo v úterý dne 16.7.2013. Po ránu bylo jasno, v průběhu dopoledne se lehce zatáhlo a bylo polojasno. Teplota vzduchu byla při zahájení měření 22 °C, na konci měření před 14. hodinou byla maxima na 34 °C, tlak vzduchu se pohyboval okolo 1020 hPa a rychlost větru byla v průběhu měření do 2,5 m/s.

První vlaková souprava byla zaznamenána v 9:57, během měřicí kampaně bylo zaznamenáno celkem 25 vlakových souprav, přičemž poslední zaznamenaná souprava projela měřícím stanovištěm v 13:59.



Obrázek 30 - Schéma měření v lokalitách Hranice na Moravě a Napajedla, zdroj: [7]

8.3.2. Zaznamenané vlakové soupravy

Lokalita:	HRANICE NA MORAVĚ, 16.7.2013					
Pořadí (ID)	Čas	Druh vlaku	Typ lokomotivy	Počet vozů	Směr jízdy	Rychlost [km/h]
1	9:57	SC	680	7	Hranice	144
2	10:11	PV	podbíječka	1	Hranice	52-44
3	10:20	Na	363	26	Hranice	40-45
4	10:23	Na	363	35	Hranice	56
5	10:29	R	363	5	Hranice	116
6	10:43	Na	Taurus	34	Hranice	40-45
7	10:47	Rex	151	8	Hranice	103
8	10:54	R (Leo)	480	5	Hranice	92
9	11:17	R	362	6	Hranice	107
10	11:22	Os	163	3	hranice	104
11	11:32	EC	380	6	Hranice	112
12	11:57	SC	680	7	Hranice	150
13	12:10	Na	363	25	Hranice	86
14	12:16	Na	363	22	Hranice	60-50
15	12:26	Na	740	4	Hranice	64
16	12:29	R	363	5	Hranice	107
17	12:37	R	151	7	hranice	114
18	12:47	Na	363	25	Hranice	77
19	12:59	R (Leo)	480	5	Hranice	128
20	13:17	R	362	6	Hranice	110
21	13:27	Os	163	3	Hranice	101
22	13:38	Na	130	44	Hranice	78
23	13:41	Lv	130	4	Hranice	79
24	13:56	Na	742	24	Hranice	45
25	13:59	R	EP09 (PL)	7	Hranice	53

Tabulka 5 - Zaznamenané vlaky, Hranice n M.

8.4. Lokalita Napajedla

Měřicí stanoviště je situováno cca uprostřed mezi stanicemi Otrokovice a Napajedla, tj. cca 2,5 km jihozápadně od stanice Otrokovice a cca 2,6 km severně od stanice Napajedla. Přesná lokace stanoviště je ve staničení km 152,106 trati č. 330 Břeclav – Přerov. Trať je navržena pro traťovou třídu zatížení D4 a je součástí II. tranzitního koridoru. Trať je dvojkolejná, elektrifikovaná s napájecí soustavou 3kV stejnosměrné trakce (pozn. v nedávné době došlo na

této trati ke změně napájecí soustavy na 25 kV/50 Hz, ale v době měření byla v místě trakce stejnosměrná). Maximální dovolená rychlost v úseku je 120 km/h, pro vozidla schopná průjezdu obloukem při působícím nedostatku převýšení alespoň 130 mm je maximální dovolená rychlost 130 km/h. Měřicí stanoviště se nachází ve směrovém oblouku o poloměru R 761 m, projektované převýšení je $D = 133$ mm, nedostatek převýšení $I = 91$ mm, přechodnice je řešena kubickou parabolou, železniční konstrukce je na náspu vysokém cca 1,0 m. Podélný sklon trati ve směru staničení je $-3,3 \text{ ‰}$ (tj. ve směru Napajedla -> Otrokovice podélný sklon klesá). Železniční svršek je tvořen kolejnicemi UIC60 (nově značených jako 60E1), bezpodkladnicovým upevněním Pandrol FC I a příčné kolejové podpory tvoří betonové pražce B91 S/1.

8.4.1. Provedení měření

Metodika měření na stanovišti Napajedla byla stejná jako při měření v Hranicích na Moravě, tedy byla uzpůsobena k porovnávání jednotlivých typů sestav upevnění kolejnic. Rozmístění snímačů bylo tedy účelové jiné než pro úlohy identifikace dvojkolí ve vlakové soupravě a pro zjišťování stavu podbití.

Rozložení snímačů je zřejmé z obrázku 30 uvedeném u předchozí měřicí lokality. Snímače zrychlení byly osazeny na pražci, patě kolejnice u upevnění a na patě kolejnice uprostřed mezi pražci. Snímače byly osazeny na obou stranách koleje. Dále byly osazeny v místě upevnění kolejnice i snímače posunu opět na osou stranách koleje a snímač posunu byl upevněn i na patě kolejnice na obou kolejnicových pásech. Při měření v lokalitách Napajedla a Hranice na Moravě byly též osazovány hlukoměry, a byly měřeny hladiny akustického tlaku. Tato měření však se zkoumanou problematikou zcela nesouvisí.

Měření v lokalitě Napajedla proběhlo ve středu dne 17.7.2013. Celý den bylo jasno s teplotami vzduchu od 23°C v ranních hodinách až po 39°C v odpoledních maximech. Tlak vzduchu se pohyboval okolo 1030 hPa, po poledni se začal mírně snižovat k hodnotám 1026 hPa. Rychlost větru byla v průběhu měření maximálně 1,8 m/s.

První vlaková souprava byla zaznamenána v 8:39, během měřicí kampaně bylo zaznamenáno celkem 20 vlakových souprav, přičemž poslední zaznamenaná souprava projela měřicím stanovištěm v 13:19.

8.4.2. Zaznamenané vlakové soupravy

Lokalita:	NAPAJEDLA, 17.7.2013					
Pořadí (ID)	Čas	Druh vlaku	Typ loko- motivy	Počet vozů	Směr jízdy	Rychlost [km/h]
1	8:39	R	150	6	Napajedla	116
2	8:50	Na	363	25	Otrokovice	83
3	9:05	Na	742	10	Napajedla	54-59
4	9:12	Na	363	11	Napajedla	45
5	9:20	R	363	6	Otrokovice	106-110
6	9:33	Lv	podbíječka	2	Napajedla	55
7	9:54	R	363	6	Napajedla	98-102
8	10:38	R	150	6	Napajedla	96
9	10:50	Na	380	30	Otrokovice	46
10	10:56	Na	363	33	Otrokovice	50-56
11	11:19	R	150	5	Otrokovice	108
12	11:25	Na	363	19	Napajedla	65
13	11:48	R	362	5	Napajdle	110
14	12:02	MUV	muv	2	Napajedla	57
15	12:18	EC	380	6	Napajedla	114
16	12:23	Os	163	4	Napajedla	101
17	12:43	Os	163	3	Otrokovice	110
18	12:50	Na	363	26	Napajedla	60
19	13:16	Os	362	3	Napajedla	115
20	13:19	Na	Taurus	32	Napajedla	79-50

Tabulka 6 - Zaznamenané vlaky, Napajedla

9. Vyhodnocení měření

9.1. Určení polohy dvojkolí

9.1.1. Lokalita Doubravice nad Svitavou

V lokalitě Doubravice nad Svitavou proběhla měření zaměřená na zjištění změny dynamické odezvy od pojezdu vlakových souprav při kvalitativní změně stavu železniční konstrukce. Lokalita Doubravice nad Svitavou byla vybrána k posouzení na základě výsledků měřicího vozu, z důvodů nevyhovujících stavebně technických parametrů byl předmětný traťový úsek určen k podbití. Kolejový rošt byl zachován beze změny, v místě měřicího stanoviště proběhlo pouze podbití železniční trati. Lze tedy předpokládat, že změny v dynamické odezvě jsou tedy v přímé souvislosti s podbíjením trati.

V lokalitě Doubravice nad Svitavou byla měření uzpůsobena potřebě ověření navrhovaných metodik, bylo využito všechny navrhované postupy. Prvním postupem, který bylo třeba učinit při určení polohy dvojkolí, bylo stanovení rychlosti jízdy vlakové soupravy. Na základě rychlosti byly následně určeny jednotlivé segmenty signálu, které byly vyhodnocovány samostatně.

Lokalita:	DOUBRAVICE NAD SVITAVOU, 9.6.2021							
Pořadí (ID)	Čas	Druh vlaku	Rychlost změněná [km/h]	I. iterace		II. iterace (maximum 1. dvojkolí)		Poměr rychlostí
				Rozdíl časů na pražcích [s]	Rychlost předběžná [km/h]	Rozdíl časů na pražcích [s]	Rychlost finální [km/h]	
1	10:16	R	100	0,14177	91,4	0,13313	97,3	97,3%
2	10:22	Os	90	0,13414	96,6	0,13454	96,3	107,0%
3	11:15	Os	85	0,15164	85,5	0,15074	86,0	101,1%
4	12:18	Os	78	0,12810	101,2	0,13483	96,1	123,2%
5	13:16	Os	98	0,12946	100,1	0,12937	100,2	102,2%
6	13:46	Os	88	0,15770	82,2	0,14363	90,2	102,5%
7	14:19	R	105	0,12384	104,7	0,12437	104,2	99,2%
8	14:24	Os	89	0,16783	77,2	0,12787	101,4	113,9%
9	14:46	Os	97	0,13144	98,6	0,12150	106,7	110,0%
10	15:16	Na	70	0,17093	75,8	0,16840	77,0	109,9%
11	15:19	Os	96	0,09473	136,8	0,11947	108,5	113,0%
12	15:45	Sp	103	0,12987	99,8	0,10440	124,1	120,5%
13	15:47	Os	83	0,12180	106,4	0,14683	88,3	106,3%

Tabulka 7 - Poměry měřené a vypočtené rychlosti, Doubravice n S., červen

Postup pro zjištění rychlosti je uveden v kapitole 6.1.2., v tabulce níže je uvedeno srovnání rychlosti měření ručním rychloměrem v porovnání s rychlostí vypočtenou na základě měřených dat dynamické odezvy.

V souladu s navrženou metodikou byla rychlost určována na základě časového rozdílu mezi výchylkami odečtenými z prvního signálu, který reprezentuje první pražec a výchylkami odečtenými ze signálu měřeném na posledním 7. pražci. Délka rozestupu mezi 1. a 7. pražcem byla 3,6 m.

Při vzájemném porovnání rychlostí bylo zjištěno, že rozdíl mezi rychlostí změřenou ručním rychloměrem a spočtenou na základě navrženého algoritmu byl v maximu až 21 km/h u vlakové soupravy spěšného vlaku (ID 12, průjezd 15:45), což v daném případě představovalo rozdíl v rychlostech 20,5 %. Rozdíl v rychlostech větší než 20 % byl zaznamenán také u soupravy osobního vlaku (ID 4, průjezd 12:18), konkrétně rozdíl rychlostí činil 18 km/h, což v daném případě představovalo rozdíl 23,2 %. Byla však také zaznamenána měření, ve který rozdíl rychlostí měřená vs. vypočtená pohyboval okolo 1 %.

Stanovení správné rychlosti bylo pro navrhované algoritmy zásadním problémem, respektive určení odchylky od reálné rychlosti, protože na tom závisí relevance získaných výsledků. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k ověření rychlosti výpočtem ještě třetím postupem založeným na základě znalosti délky jednotlivých vlakových souprav a času průjezdu měřícím bodem.

Rychlost určená dle metodiky i rychlost určená ověřovacím postupem byla stanovena výpočtem, avšak oba postupy se od sebe liší a nejsou na sobě závislé. Zatímco rychlost vlakové soupravy určená dle metodiky počítala s použitím dvou snímačů osazených na pražcích ve známé vzdálenosti, přičemž byl zaznamenáván průjezd prvního dvojkolí, v případě ověřovacího postupu byl použit pouze jeden snímač a byl sledován průjezd prvního a posledního dvojkolí vlakové soupravy a následně podle řazení vozů ve vlakové soupravě byl dopočten rozstup prvního a posledního dvojkolí.

Dynamická odezva dvojkolí se v měřeném signálu projevuje velmi výrazně, a polohu dvojkolí lze poměrně přesně identifikovat. Polohová nepřesnost v rámci signálu v přepočtu na délku představuje jednotky, maximálně první desítky centimetrů. Při rozestupu prvního a posledního dvojkolí u osobních vlakových souprav v rozmezí běžně 60 – 150 m, můžeme chybu měření délky v řádu centimetrů zanedbat. Stejně i měření času založené na vzorkovací frekvenci 30 kHz bylo pro následný výpočet rychlosti více než dostatečné. Ověřovací postup výpočtu rychlosti můžeme označit za velmi přesný s chybou do 0,5 % od reálné rychlosti.

Pro vybrané vlakové soupravy bylo provedeno ověření reálné rychlosti pomocí výše popsaného ověřovacího postupu. Následně byly vzájemně porovnány výsledky všech tří postupů pro určení rychlosti s tím, že výchozí rychlostí se stala rychlost určená pomocí ověřovacího postupu a byla považována za rychlost reálnou. Výsledkem porovnání bylo, že v jednom případě se rychlost měřená ručním radarem v maximu lišila od reálné rychlosti o více než 21 %, průměrná odchylka od reálné rychlosti činila 10,4 %. Rychlost vypočtená pomocí navržené metodiky se od reálné rychlosti v maximu lišila cca o 8 % a průměrná odchylka obou rychlostí činila 4,3 %.

Rychlost měřená ručním radarem byla ve sledovaných případech vždy nižší než reálná rychlost, v případě rychlosti počítané dle metodiky byla rychlost v 60 % nižší než reálná rychlost a ve 40 % případů byla výpočtově určena rychlost vyšší. Rozložení odchylek výpočtové rychlosti

ve vztahu k reálné rychlosti bylo rovnoměrnější než v případě rychlosti měřené ručním radarem.

Porovnání rychlosti měřené ručním radarem a rychlosti vypočtené dle metodiky bylo provedeno i pro druhé měření v Doubravici nad Svitavou, které proběhlo dne 18.8.2021.

Lokalita: DOUBRAVICE NAD SVITAVOU, 18.8.2021								
Pořadí (ID)	Čas	Druh vlaku	Rychlost změřená [km/h]	I. iterace		II. iterace (maximum 1. dvojkolí)		Poměr rychlostí
				Rozdíl časů na pražcích [s]	Rychlost předběžná [km/h]	Rozdíl časů na pražcích [s]	Rychlost finální [km/h]	
1	10:20	Os	92	0,11966	108,3	0,15324	84,6	91,9%
2	10:26	R	110	0,13570	95,5	0,12860	100,8	91,6%
3	10:45	Na	82	0,14820	87,4	0,15597	83,1	101,3%
4	11:16	Os	81	0,16343	79,3	0,16323	79,4	98,0%
5	12:19	Os	89	0,16077	80,6	0,14370	90,2	101,3%
6	13:16	Os	93	0,14207	91,2	0,13664	94,8	102,0%
7	13:47	Os	81	0,13103	98,9	0,16640	77,9	96,2%
8	14:13	R	117	0,11233	115,4	0,11043	117,4	100,3%
9	14:21	Os	79	0,17177	75,4	0,15493	83,7	105,9%
10	14:27	Na	70	0,18440	70,3	0,17573	73,7	105,4%
11	14:47	Os	108	0,12787	101,4	0,12203	106,2	98,3%
12	15:03	Na	81	0,16133	80,3	0,15883	81,6	100,7%
13	15:16	Os	86	0,12990	99,8	0,14356	90,3	105,0%
14	15:32	MVT	73	0,21290	60,9	0,17677	73,3	100,4%
15	15:46	Sp	106	0,12130	106,8	0,11990	108,1	102,0%
16	15:48	Os	106	0,13244	97,9	0,13050	99,3	93,7%

Tabulka 8 - Poměry měřené a vypočtené rychlosti, Doubravice n S., srpen

Při vzájemném porovnání rychlosti měřené ručním radarem ve vztahu k výpočtové rychlosti dle metodiky nebyly rozdíly tak velké, jako při prvním měření v této lokalitě v červnu. Maximální rozdíl měřené a výpočtové rychlosti činil cca 9 km/h, což představovalo rozdíl 8,4 %. Ve vztahu k reálné rychlosti získané ověřovacím postupem byla průměrná odchylka rychlosti měřené radarem 1,7 %, průměrná odchylka výpočtové rychlosti dle metodiky od reálné rychlosti byla 5 %.

Měření rychlosti ručním radarem bylo prováděno na všech měřených lokalitách, a dosud bylo nejjednodušším způsobem získání informace o rychlosti projíždějících vlakových souprav. Nebyla však ověřena relevance těchto měření. V návodu k použití rychloměru

Bushnell 10-1900 bylo sice uvedeno, že přesnost měření rychlosti je ± 2 km/h, ale pouze pokud se měřený objekt pohybuje v ose měření. Pokud se měřený objekt pohybuje v úhlu, přesnost měření klesá se zvyšujícím se úhlem. Tato vlastnost se zřejmě stala zdrojem nahodilých chyb měření rychlosti a velkým rozptylem měřených hodnot od reálné rychlosti v případě prvního měření na stanovišti v Doubravici nad Svitavou v červnu 2021. Měření ručním rychloměrem při druhém měření v srpnu 2021 bylo již ve vztahu k reálné rychlosti mnohem přesnější. I přes větší rozptyl v měřených hodnotách oproti reálné rychlosti, bylo v kombinaci se signálem dynamické odezvy na kolejovém roštu s upevňovacími typy Vossloh možné určit polohy jednotlivých dvojkolí. Počty dvojkolí odpovídaly skutečnosti jen jejich vzájemná vzdálenost byla vlivem nepřesného určení rychlosti systematicky zkrácena nebo prodloužena. Na vzájemný poměr polohy dvojkolí v signálu nemělo měření rychlosti vliv, protože dynamická odezva konstrukce je měřena v časové rovině. Jednotlivé pozice dvojkolí tedy v signálu odpovídaly jednotlivým časovým okamžikům při měření.

Rychlost byla v průběhu vyhodnocení potřeba pro dva účely. Prvním bylo stanovení příslušných rozsahů pro vyhodnocovací algoritmus polohy dvojkolí a druhým bylo při určování typu vlakové soupravy. Zde se uplatnil také poměr jednotlivých vzájemných vzdáleností v rámci vlakové soupravy.

Při sestavování výsledků bylo hodnoceno, do jaké míry odpovídá reálná poloha dvojkolí pozici v měřeném signálu, a to jak relativně v podobě srovnání poměrů vzájemných vzdáleností dvou následujících dvojkolí k délce celé vlakové soupravy, tak i absolutně při přepočtu vzájemných časových rozestupů dvojkolí reálnou rychlostí.

Odchyly od reálné vzájemné vzdálenosti dvojkolí se v měřeném signálu vyskytují jednak z důvodu nedokonalosti jízdní dráhy, ale zejména z důvodu nedokonalosti železničních kol. V případě, že se impakt plochého kola realizoval v těsné blízkosti kolejové podpory, převýšil svou amplitudou vlastní průjezd železničního kola nad kolejnicovou podporou a došlo ke zdánlivému posunutí pozice dvojkolí v měřeném signálu.

I přes výkyvy v přesnosti určení rychlosti, navržené algoritmy pro určení polohy dvojkolí na výstupech z prvního měření v lokalitě Doubravice nad Svitavou pracovaly dobře. Dvojkolí byla v signálu detekována spolehlivě, odchylka od správné reálné polohy se u všech měřených vlakových souprav pohybovala v absolutní hodnotě do 0,5 m. Jistá nerovnoměrnost v určení polohy byla dána imperfekcemi celého měřicího systému, jednotlivá dvojkolí určená na základě měřeného signálu odpovídala dvojkolím v reálném stavu.

Určení vzájemných poměrů bylo velmi důležité pro následné hodnotící algoritmy. Na základě správných poměrů bylo následně možno korigovat i větší rozptyl měřené či vypočtené rychlosti.

Přesnost vypočtené případně měřené rychlosti má vliv na určení rozsahů při sestavování hodnotícího algoritmu „Určení typu vlakové soupravy“. Problémem bylo sčítání chyb při zjišťování rychlosti s chybami způsobenými imperfekcemi. Tak vznikaly rozdíly vzájemné polohy dvojkolí v maximech až 25 %. Takto vysoké rozdíly v poloze se však týkaly výhradně vzájemných vzdáleností podvozků, jejichž rozvor je u osobních vozů běžně v rozmezí 2,5 – 2,7 m a u nákladních podvozků 1,8 – 2,0 m. U rozvoru vnitřních kol železničních vozů byly odchylky do 5 %, a to bylo v rámci měření zcela dostačující pro následné relevantní hodnocení.

Doubravice nad Svitavou, 9.6.2021									
Osobní vlak (Os), čas průjezdu 14:24 (ID 8)									
rychlost reálná: 102,4 km/h					rychlost vypočtená: 101,0 km/h				
vzájemné skutečné vzdálenosti dvojkolí [m]	poměr vzájemných reálných vzdáleností ku celkové délce soupravy	vozy vlakové soupravy	zaznamenaný čas v měřeném signálu [s]	časové rozestupy jednotlivých dvojkolí [s]	přepočtené vzájemné vzdálenosti dvojkolí [m]	poměr vypočtených vzdáleností ku celkové délce soupravy	srovnání vzájemných vzdáleností výpočtových a reálných	srovnání poměru reál. vzdáleností a poměru pozic dvojkolí v signálu	rozdíl vzájemné vzd. reálného dvojkolí vs. pozice v signálu [m]
0	0,0000	lokomotiva řada 263	3,9917	0,0000	0,00	0,0000	---	---	0,000
3,2	0,0273		4,1063	0,1147	3,22	0,0278	100,5 %	101,9 %	0,061
5,1	0,0435		4,2847	0,1783	5,00	0,0432	98,1 %	99,4 %	-0,028
3,20	0,0273		4,4017	0,1170	3,28	0,0284	102,6 %	104,0 %	0,127
5,02	0,0428	1. vůz Bdmtee ²⁸¹	4,5753	0,1737	4,87	0,0421	97,1 %	98,4 %	-0,081
2,60	0,0222		4,6573	0,0820	2,30	0,0199	88,5 %	89,7 %	-0,268
16,40	0,1398		5,2433	0,5860	16,44	0,1420	100,2 %	101,6 %	0,265
2,60	0,0222		5,3370	0,0937	2,63	0,0227	101,1 %	102,5 %	0,064
4,80	0,0409	2. vůz Bdmtee ²⁸¹	5,5037	0,1667	4,68	0,0404	97,4 %	98,7 %	-0,060
2,60	0,0222		5,5927	0,0890	2,50	0,0216	96,0 %	97,3 %	-0,069
16,40	0,1398		6,1693	0,5767	16,18	0,1398	98,7 %	100,0 %	-0,000
2,60	0,0222		6,2630	0,0937	2,63	0,0227	101,1 %	102,5 %	0,064
4,80	0,0409	3. vůz Bdmtee ²⁷⁵	6,4177	0,1547	4,34	0,0375	90,4 %	91,6 %	-0,401
2,60	0,0222		6,5067	0,0890	2,50	0,0216	96,0 %	97,3 %	-0,069
16,40	0,1398		7,0973	0,5907	16,57	0,1432	101,0 %	102,4 %	0,398
2,60	0,0222		7,1770	0,0797	2,24	0,0193	86,0 %	87,1 %	-0,334
4,80	0,0409	4. vůz Bdmtee ²⁸¹	7,3530	0,1760	4,94	0,0427	102,9 %	104,3 %	0,205
2,60	0,0222		7,4397	0,0867	2,43	0,0210	93,5 %	94,8 %	-0,135
16,40	0,1398		8,0257	0,5860	16,44	0,1420	100,2 %	101,6 %	0,265
2,60	0,0222		8,1170	0,0913	2,56	0,0221	98,6 %	99,9 %	-0,003

Tabulka 9 - Polohy dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Doubravice n S., červen

Výsledky z druhého měření v lokalitě Doubravice nad Svitavou, které bylo provedeno 18.8.2021 po konsolidaci nově podbité trati, se téměř shodovaly s výsledky prvního měření a potvrdily tak funkčnost navržených algoritmů v dané lokalitě. V některých parametrech druhé měření dopadlo lépe než první měření, například u rozvoru vnitřních kol železničních vozů dosahovala odchylka od reálné polohy v maximech pouze 4,6 %, a celkově se maximální odchylka u podvozků pohybovala v maximech do 23 %. Zlepšení při druhém měření souviselo s podbitím trati pouze částečně, protože hlavní vliv na pozici dvojkolí v měřeném signálu má především stav železničního kola.

Doubravice nad Svitavou, 18.8.2021									
Osobní vlak (Os), čas průjezdu 15:16 (ID 13)									
rychlost reálná: 86,1 km/h					rychlost vypočtená: 90,3 km/h				
vzájemné skutečné vzdálenosti dvojkolí [m]	poměr vzájemných reálných vzdáleností ku celkové délce soupravy	vozy vlakové soupravy	zaznamenaný čas v měřeném signálu [s]	časové rozestupy jednotlivých dvojkolí [s]	přepočtené vzájemné vzdálenosti dvojkolí [m]	poměr vypočtených vzdáleností ku celkové délce soupravy	srovnání vzájemných vzdáleností výpočtových a reálných	srovnání poměru reál. vzdáleností a poměru pozic dvojkolí v signálu	rozdíl vzájemné vzd. reálného dvojkolí vs. pozice v signálu [m]
0	0,0000	el. jednotka řada 650	5,7087	0,0000	0,00	0,0000	---	---	0,000
2,5	0,0196		5,8113	0,1027	2,58	0,0193	103,0 %	98,3 %	-0,043
16,6	0,1302		6,5147	0,7033	17,64	0,1320	106,3 %	101,4 %	0,230
2,50	0,0196		6,6203	0,1057	2,65	0,0198	106,0 %	101,1 %	0,028
4,90	0,0384	el. jednotka řada 650	6,8197	0,1993	5,00	0,0374	102,0 %	97,3 %	-0,130
2,50	0,0196		6,9223	0,1027	2,58	0,0193	103,0 %	98,3 %	-0,043
16,60	0,1302		7,6197	0,6973	17,49	0,1309	105,4 %	100,5 %	0,086
2,50	0,0196		7,7163	0,0967	2,42	0,0181	97,0 %	92,5 %	-0,187
4,80	0,0376	el. jednotka řada 640	7,9307	0,2143	5,38	0,0402	112,0 %	106,8 %	0,329
2,50	0,0196		8,0270	0,0963	2,42	0,0181	96,7 %	92,2 %	-0,195
16,60	0,1302		8,7183	0,6913	17,34	0,1297	104,5 %	99,7 %	-0,057
2,50	0,0196		8,8180	0,0997	2,50	0,0187	100,0 %	95,4 %	-0,115
4,90	0,0384	el. jednotka řada 640	9,0387	0,2207	5,54	0,0414	113,0 %	107,8 %	0,380
2,50	0,0196		9,1320	0,0933	2,34	0,0175	93,6 %	89,3 %	-0,267
16,60	0,1302		9,8263	0,6943	17,42	0,1303	104,9 %	100,1 %	0,014
2,50	0,0196		9,9230	0,0967	2,42	0,0181	97,0 %	92,5 %	-0,187
4,90	0,0384	el. jednotka řada 640	10,140	0,2173	5,45	0,0408	111,3 %	106,1 %	0,301
2,50	0,0196		10,243	0,1027	2,58	0,0193	103,0 %	98,3 %	-0,043
16,60	0,1302		10,934	0,6913	17,34	0,1297	104,5 %	99,7 %	-0,057
2,50	0,0196		11,037	0,1027	2,58	0,0193	103,0 %	98,3 %	-0,043

Tabulka 10 - Polohy dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Doubravice n S., srpen

Vyhodnocení polohy jednotlivých dvojkolí bylo velmi úspěšné, jednotlivá dvojkolí byla identifikována 93 % případů. Zbylé případy představovaly stavy, při kterých bylo železniční dvojkolí natolik špatné, že svou dynamickou odezvou překrylo i odezvu sousedních dvojkolí.

9.1.2. Lokalita Hranice na Moravě

Měření v lokalitě Hranice na Moravě bylo vybráno z důvodu ověření funkčnosti algoritmů na při sekundárním využití měřených dat. Měření v této lokalitě bylo zaměřeno na zjišťování jiných problémů spojených s železniční konstrukcí, nebylo primárně zaměřeno na zjišťování polohy dvojkolí v rámci vlakové soupravy.

Důležitým parametrem bylo též, že se posuzovaná konstrukce shodovala s konstrukcí v lokalitě Doubravice nad Svitavou. Na obou místech byl kolejový rošt sestaven ze stejných konstrukčních prvků.

Hranice na Moravě, 16.7.2013									
SC Pendolino, čas průjezdu 11:57 (ID 12)									
rychlost reálná: 150,4 km/h					rychlost změřená: 150,0 km/h				
vzájemné skutečné vzdálenosti dvojkolí [m]	poměr vzájemných reálných vzdáleností ku celkové délce soupravy	vozy vlakové soupravy	zaznamenaný čas v měřeném signálu [s]	časové rozestupy jednotlivých dvojkolí [s]	přepočtené vzájemné vzdálenosti dvojkolí [m]	poměr vypočtených vzdáleností ku celkové délce soupravy	srovnání vzájemných vzdáleností výpočtových a reálných	srovnání poměru reál. vzdáleností a poměru pozic dvojkolí v signálu	rozdíly vzájemné vzd. reálného dvojkolí vs. pozice v signálu [m]
0	0,0000	el. jednotka 682 Bmpz	4,8723	0,0000	0,00	0,0000	- - -	- - -	0,000
2,7	0,0152		4,9370	0,0647	2,69	0,0153	99,8 %	100,1 %	0,002
16,3	0,0920		5,3233	0,3863	16,10	0,0912	98,8 %	99,0 %	-0,157
2,70	0,0152		5,3937	0,0703	2,93	0,0166	108,5 %	108,8 %	0,239
4,20	0,0237	el. jednotka 082 Bmpz	5,4880	0,0943	3,93	0,0223	93,6 %	93,9 %	-0,258
2,70	0,0152		5,5557	0,0677	2,82	0,0160	104,4 %	104,7 %	0,127
16,30	0,0920		5,9393	0,3837	15,99	0,0905	98,1 %	98,4 %	-0,268
2,70	0,0152		6,0150	0,0757	3,15	0,0179	116,8 %	117,1 %	0,462
4,20	0,0237	el. jednotka 684 Bmpz	6,1093	0,0943	3,93	0,0223	93,6 %	93,9 %	-0,258
2,70	0,0152		6,1717	0,0623	2,60	0,0147	96,2 %	96,5 %	-0,095
16,30	0,0920		6,5660	0,3943	16,43	0,0930	100,8 %	101,1 %	0,177
2,70	0,0152		6,6307	0,0647	2,69	0,0153	99,8 %	100,1 %	0,002
4,20	0,0237	el. jednotka 084 Bmpz	6,7253	0,0947	3,94	0,0223	93,9 %	94,2 %	-0,244
2,70	0,0152		6,7983	0,0730	3,04	0,0172	112,7 %	113,0 %	0,350
16,30	0,0920		7,1873	0,3890	16,21	0,0918	99,4 %	99,7 %	-0,046
2,70	0,0152		7,2520	0,0647	2,69	0,0153	99,8 %	100,1 %	0,002
4,20	0,0237	el. jednotka 683 BRmpz	7,3493	0,0973	4,06	0,0230	96,6 %	96,8 %	-0,133
2,70	0,0152		7,4197	0,0703	2,93	0,0166	108,5 %	108,8 %	0,239
16,30	0,0920		7,8033	0,3837	15,99	0,0905	98,1 %	98,4 %	-0,268
2,70	0,0152		7,8707	0,0673	2,81	0,0159	103,9 %	104,2 %	0,114
4,20	0,0237	el. jednotka	7,9653	0,0947	3,94	0,0223	93,9 %	94,2 %	-0,244
2,70	0,0152		8,0383	0,0730	3,04	0,0172	112,7 %	113,0 %	0,350

16,30	0,0920	el. jednotka 681 Bmpz	8,4217	0,3833	15,97	0,0904	98,0 %	98,3 %	-0,282
2,70	0,0152		8,4893	0,0677	2,82	0,0160	104,4 %	104,7 %	0,127
4,20	0,0237		8,5893	0,1000	4,17	0,0236	99,2 %	99,5 %	-0,021
2,70	0,0152		8,6567	0,0673	2,81	0,0159	103,9 %	104,2 %	0,114
16,30	0,0920		9,0430	0,3863	16,10	0,0912	98,8 %	99,0 %	-0,157
2,70	0,0152		9,1107	0,0677	2,82	0,0160	104,4 %	104,7 %	0,127

Tabulka 11 - Polohy dvojkoľí vybrané vlakové soupravy, Hranice n M.

Výsledky měření v lokalitě Hranice na Moravě byly srovnatelné s výsledky z obou měření v lokalitě Doubravice nad Svitavou. Odchylna od reálné polohy se u rozvoru vnitřních dvojkoľí pohybovala do 5 %, odchylna rozvoru podvozků s kumulovanou chybou měření rychlosti a s chybou pozice dvojkoľí v měřeném signálu nepřesáhla 25 %. Zjištěné výsledky byly použitelné pro další vyhodnocovací algoritmy.

Přesnost určení dvojkoľí v měřeném signálu přesahovala 90 %.

9.1.3. Lokalita Napajedla

Měření v lokalitě Napajedla bylo druhým ověřovacím stanovištěm funkčnosti algoritmů při sekundárním využití měřených dat. Toto měřicí stanoviště bylo od dříve popisovaných stanovišť odlišné v konstrukci kolejového roštu.

Železniční trať v místě měřicího stanoviště v lokalitě Napajedla byla konstrukčně založena na systému uchycení Fastclip od společnosti Pandrol, zatímco na předchozích lokalitách byl použit systém upevnění od společnosti Vossloh (W14). Tato změna způsobu uchycení měla zásadní vliv na výstupní měřený signál dynamické odezvy.

Signál na této konstrukci vykazoval vysoký rozkmit hodnot zrychlení, přičemž nedocházelo k jeho podstatnému útlumu ani v místě rozvoru vnitřních kol osobních vagónů. V této podobě nebylo možné signál navrženými postupy zpracovat, protože hodnotící algoritmus je založený na posuzování směrnic křivky signálu. Při vysokém rozkmitu signálu dosahovala směrnice křivky stále vysokých hodnot a nebylo možno měřený signál dle metodiky segmentovat, proto bylo přistoupeno před dalším zpracováním k úpravě vstupního signálu.

Tato úprava spočívala v provedení klouzavého průměru na měřeném signálu s malým sčítacím okénkem. Zásadu malého sčítacího okénka bylo nutno dodržet z důvodu minimalizace změn ve vstupním signálu. Sčítací okénko pro provedení klouzavého průměru bylo navrženo ve velikosti do 10 cm, aby bylo zajištěno dostatečné vyhlazení signálu, ale aby nedošlo k přílišné deformaci maximálních hodnot zrychlení, které představují pozice dvojkoľí v měřeném signálu.

Po úpravě signálu bylo již možné navržené algoritmy použít i v lokalitě Napajedla, ale z důvodu úprav vstupního signálu a z důvodu celkové dynamické odezvy na tomto typu konstrukce vykazovaly výstupy výrazně nižší přesnost.

Možný potenciál pro vyšší přesnost vyhodnocení nabízí kumulativní součet výchylek zrychlení ve spojení s vyrovnáním křivky pomocí waveletů. V průběhu návrhu hodnotících

algoritmů byly zkoušeny i tyto postupy, nicméně se nepodařilo najít takový předpis waveletu, který by křivku kumulativního součtu vyrovnal do použitelného stavu.

Napajedla, 17.7.2013									
rychlík (R), čas průjezdu 8:39 (ID 1)									
rychlost reálná: 116,5 km/h					rychlost změřená: 116,0 km/h				
vzájemné skutečné vzdálenosti dvojkolí [m]	poměr vzájemných reálných vzdáleností ku celkové délce soupravy	vozy vlakové soupravy	zaznamenaný čas v měřeném signálu [s]	časové rozestupy jednotlivých dvojkolí [s]	přepočtené vzájemné vzdálenosti dvojkolí [m]	poměr vypočtených vzdáleností ku celkové délce soupravy	srovnání vzájemných vzdáleností výpočtových a reálných	srovnání poměru reál. vzdáleností a poměru pozic dvojkolí v signálu	rozdíl vzájemné vzd. reálného dvojkolí vs. pozice v signálu [m]
0	0,0000	lokomotiva řada 150.2	5,8907	0,0000	0,00	0,0000	---	---	0
3,2	0,0238		6,0007	0,1100	3,36	0,0265	105,0 %	111,3 %	0,362
5,1	0,0380		6,1557	0,1550	4,74	0,0374	92,9 %	98,4 %	-0,081
3,20	0,0238		6,2493	0,0937	2,86	0,0226	89,4 %	94,8 %	-0,167
5,02	0,0374	1. vůz A ¹⁴⁹	6,4000	0,1507	4,60	0,0363	91,7 %	97,2 %	-0,141
2,50	0,0186		6,4733	0,0733	2,24	0,0177	89,6 %	95,0 %	-0,125
14,70	0,1095		6,9340	0,4607	14,08	0,1111	95,8 %	101,5 %	0,217
2,50	0,0186		7,0277	0,0937	2,86	0,0226	114,5 %	121,3 %	0,533
4,80	0,0358	2. vůz BD ⁴⁴⁹	7,1377	0,1100	3,36	0,0265	70,0 %	74,2 %	-1,238
2,50	0,0186		7,2437	0,1060	3,24	0,0256	129,6 %	137,3 %	0,932
14,70	0,1095		7,6757	0,4320	13,20	0,1042	89,8 %	95,2 %	-0,711
2,50	0,0186		7,7697	0,0940	2,87	0,0227	114,9 %	121,8 %	0,544
4,80	0,0358	3. vůz B ²⁴⁹	7,9080	0,1383	4,23	0,0334	88,1 %	93,3 %	-0,321
2,50	0,0186		7,9937	0,0857	2,62	0,0207	104,7 %	111,0 %	0,274
14,70	0,1095		8,4340	0,4403	13,45	0,1062	91,5 %	97,0 %	-0,441
2,50	0,0186		8,5277	0,0937	2,86	0,0226	114,5 %	121,3 %	0,533
4,80	0,0358	4. vůz B ²⁴⁹	8,6500	0,1223	3,74	0,0295	77,9 %	82,5 %	-0,839
2,50	0,0186		8,7437	0,0937	2,86	0,0226	114,5 %	121,3 %	0,533
14,70	0,1095		9,1920	0,4483	13,70	0,1082	93,2 %	98,8 %	-0,182
2,50	0,0186		9,2733	0,0813	2,49	0,0196	99,4 %	105,3 %	0,134
4,80	0,0358	5. vůz B ²⁴⁹	9,4120	0,1387	4,24	0,0335	88,3 %	93,5 %	-0,310
2,50	0,0186		9,4853	0,0733	2,24	0,0177	89,6 %	95,0 %	-0,125
14,70	0,1095		9,9297	0,4443	13,58	0,1072	92,4 %	97,9 %	-0,312
2,50	0,0186		10,0357	0,1060	3,24	0,0256	129,6 %	137,3 %	0,932

Tabulka 12 - Polohy dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Napajedla

Nižší přesnost při vyhodnocení polohy dvojkolí mělo vliv zejména na úlohy přímo spojené s železničními vozidly, tedy na úlohu určení polohy dvojkolí, úlohu určení defektního dvojkolí a na úlohu určení typu vlaku. V úloze pro stanovení stavu podbití nebylo nutné bezpodmínečně využít polohu dvojkolí, v této úloze bylo možné využít pouze maximální výchylky zaznamenané v daném signálu.

Odchytky polohy dvojkolí vyšší než 25 % už přestavovaly problém zejména v následném hodnocení určení typu vlakové soupravy. Problém vyšší chyby v určení dvojkolí se vyskytoval především u vagónů, lokomotivy měly obecně vyšší dynamické účinky a v hodnoceném signálu byly algoritmem lépe rozpoznatelné. Identifikovat dvojkolí lokomotivy nebyl proto problém, problémem bylo určit polohu následných dvojkolí, které se vlivem vysokého rozkmitu signálu v tomto signálu ztrácely.

9.2. Vyhodnocení stavu dvojkolí

Pouze v lokalitě Doubravice nad Svitavou bylo měření provedeno v souladu s navrženou metodikou pro určení stavu dvojkolí, a bylo možné dle této metodiky stav dvojkolí vyhodnotit. Hodnocení bylo založeno na srovnání dynamické odezvy ze čtyř snímačů zrychlení umístěných v řadě za sebou (dle metodiky na 1., 3., 5. a 7. pražci). V lokalitách Hranice na Moravě a Napajedla byla pro analýzy k dispozici data pouze z jednoho snímače zrychlení umístěném na pražci. Respektive byly k dispozici data ze dvou snímačů zrychlení, nikoliv však v řadě za sebou, ale na jednom a druhém konci téhož pražce.

Při porovnání signálu dynamické odezvy ze snímačů umístěných na jednom pražci vyplynulo, že dynamická odezva defektního kola se v rámci dvojkolí nepřenáší z jedné strany na druhou, respektive přenos dynamické odezvy defektního kola nebyl v signálu druhého kola dvojkolí signifikantní.

9.2.1. Lokalita Doubravice nad Svitavou

Vyhodnocení stavu železničních dvojkolí dopadlo úspěšně. Navrženým algoritmem byla detekována defektní kola, správnost určení byla u velmi poškozených kol ověřena akusticky na základě impaktních rázů (klepání kola). Dle očekávání bylo zjištěno, že stav železničních kol na lokomotivách a na osobních elektrických jednotkách byl lepší než na vozech bez trakce, tj. na vagónech. Velmi špatná kola se vyskytovala jak u nákladních vagónů, tak i u osobních.

Doubravice nad Svitavou, 9.6.2021													
Osobní vlak (Os), čas průjezdu 12:18 (ID 4)													
poř. kola		1. snímač		2. snímač		3. snímač		4. snímač		absolutní hodnota		poměr	stav
		-	+	-	+	-	+	-	+	min	max		
1	el. jednotka 1. vůz	-11,3	10,9	-11,8	9,3	-12,7	12,6	-9,6	10,1	9,3	12,7	1,4	dobrý
2		-13,7	9,9	-13,4	10,0	-16,4	18,3	-11,4	10,5	9,9	18,3	1,8	dobrý
3		-10,6	9,4	-11,5	12,9	-15,4	15,6	-11,2	15,6	9,4	15,6	1,7	dobrý
4		-19,6	18,7	-13,8	12,9	-18,4	19,9	-21,3	16,3	12,9	21,3	1,6	dobrý
5	el. jednotka 2. vůz	-24,6	20,8	-22,1	27,6	-23,1	23,1	-20,8	22,4	20,8	27,6	1,3	dobrý
6		-23,7	21,1	-22,2	28,6	-30,0	17,8	-15,2	19,0	15,2	30,0	2,0	dobrý
7		-10,2	12,3	-11,3	12,3	-14,0	13,0	-9,7	8,5	8,5	14,0	1,6	dobrý
8		-11,7	13,2	-23,9	14,1	-16,7	15,4	-22,6	23,7	11,7	23,9	2,0	dobrý
9	el. jednotka 3. vůz	-11,0	12,6	-12,7	12,0	-13,9	13,4	-12,5	12,3	11,0	13,9	1,3	dobrý
10		-12,6	12,5	-12,5	13,4	-21,9	12,6	-17,6	14,8	12,5	21,9	1,7	dobrý
11		-27,9	21,6	-22,2	22,1	-29,0	21,1	-20,4	22,8	20,4	29,0	1,4	dobrý
12		-13,4	11,9	-19,7	17,4	-21,1	16,4	-19,7	20,2	11,9	21,1	1,8	dobrý

Tabulka 13 - Vyhodnocení stavu dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Doubravice n S., červen

Ze sledovaných vlakových souprav bylo zaznamenáno 107 železničních kol zařazených do kategorie zhoršeného stavu a 82 železničních kol v havarijním stavu. V procentuálním vyjádření to představovalo 15,4 % železničních kol se zhoršeným stavem a 11,8 % ve stavu velmi špatném, u který bylo doporučeno daná kola opravit nebo vyměnit. Daná kategorizace byla stanovena odborným odhadem na základě výsledků měření. Přesně diagnostikovaný stav železničních kol pro přesnou kategorizaci při přípravě algoritmů k dispozici nebyl, vyvíjený měřicí systém si však ani nekladal za cíl přesnou diagnostiku železničních kol, ale byl vyvíjen s cílem pouze upozorňovat na možný špatný stav vozového parku. Přesná kontrola stavu železničního kola by byla následně provedena až v depu kolejových vozidel. Zjištěné výsledky odrážely nerovnoměrnosti v naměřené odezvě dynamických účinků. Ne vždy však musí nerovnoměrnost dynamické odezvy odrážet špatný stav kola, ale špatný stav železničních kol k nerovnoměrnosti přispívá velmi podstatnou měrou.

Doubravice nad Svitavou, 18.8.2021													
Osobní vlak (Os), čas průjezdu 11:16 (ID 4)													
poř. kol a		1 snímač		2 snímač		3 snímač		4 snímač		absolutní hodnota		poměr	stav
		-	+	-	+	-	+	-	+	min	max		
1	lokomotiva	-41,3	39,8	-68,5	46,7	-41,9	49,6	-46,4	39,6	39,6	68,5	1,7	dobrý
2		-104	77,5	-93,6	71,5	-66,9	84,9	-62,4	62,7	62,4	104,3	1,7	dobrý
3		-55,4	61,1	-51,0	49,7	-47,3	73,8	-48,0	53,7	47,3	73,8	1,6	dobrý
4		-79,8	61,6	-56,7	50,0	-55,4	47,3	-45,2	46,6	45,2	79,8	1,8	dobrý
5	1. vůz	-17,1	16,4	-16,5	12,5	-10,4	11,1	-17,9	14,6	10,4	17,9	1,7	dobrý
6		-33,3	41,4	-8,9	14,3	-31,5	36,5	-19,4	19,7	8,9	41,4	4,6	zhor- šený
7		-14,5	13,8	-23,2	17,7	-13,1	9,2	-21,8	20,4	9,2	23,2	2,5	dobrý
8		-11,7	13,5	-10,8	12,2	-15,4	13,1	-11,6	17,7	10,8	17,7	1,6	dobrý
9	2. vůz	-163	96,2	-151	141,4	-32,7	30,7	-232	160,0	30,7	231,8	7,5	špatný
10		-20,5	18,0	-20,4	41,6	-271	110,3	-21,0	38,4	18,0	270,6	15,1	špatný
11		-14,5	14,1	-25,0	19,2	-21,1	28,4	-35,5	24,8	14,1	35,5	2,5	dobrý
12		-61,9	45,8	-68,5	76,9	-201	126,5	-44,9	38,8	38,8	201,4	5,2	špatný
13	3. vůz	-14,0	33,6	-13,2	16,2	-13,5	21,9	-12,0	20,8	12,0	33,6	2,8	zhor- šený
14		-11,2	19,8	-11,1	13,1	-16,5	23,1	-9,7	17,7	9,7	23,1	2,4	dobrý
15		-10,6	9,6	-24,1	24,6	-19,6	14,2	-12,8	16,5	9,6	24,6	2,6	zhor- šený
16		-8,0	9,1	-15,6	17,1	-13,8	13,8	-7,3	14,2	7,3	17,1	2,3	dobrý
17	4. vůz	-22,1	23,7	-35,9	25,5	-28,5	9,6	-51,5	37,3	9,6	51,5	5,4	špatný
18		-16,9	18,7	-53,7	49,7	-8,5	31,5	-48,0	46,6	8,5	53,7	6,3	špatný
19		-23,9	22,9	-18,6	31,9	-16,5	20,8	-27,6	29,4	16,5	31,9	1,9	dobrý
20		-80,1	77,5	-70,3	70,9	-11,2	14,2	-141	112,7	11,2	141,4	12,7	špatný

Tabulka 14 - Vyhodnocení stavu dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Doubravice n S., srpen

9.2.2. Lokalita Hranice na Moravě a Napajedla

V lokalitách Hranice na Moravě a Napajedla nebylo možné z dat, která byla k dispozici, vyhodnotit stav dvojkolí podle navrhované metodiky. Omezené možnosti vyhodnocení stavu železničního kola však měřené signály poskytly. V rámci vyhodnocení nebyly srovnávány dynamické účinky jednoho železničního kola v různých pozicích, ale byla porovnávána maximální amplituda výchylky zrychlení daného kola s průměrnou výchylkou všech ostatních kol ve vlakové soupravě. Tímto přístupem bylo možno identifikovat železniční kolo pouze ve velmi špatném stavu, kdy maximum amplitudy bylo výrazně vyšší než průměrná hodnota a zároveň defekt kola se projevil právě v místě snímače. Značná část defektních kol tímto přístupem nebyla odhalena, protože pokud nedošlo k příznivé souhře okolností, kdy by byl defekt kola v kontaktu s kolejnicí zrovna v místě kolejnicové podpory s osazeným snímačem zrychlení, tak defektní kolo nebylo zaznamenáno. Problémem byla také rozdílná hmotnost jednotlivých zaznamenaných vozů, typicky lokomotiva versus osobní vagón.

Hranice na Moravě, 16.7. 2013									
Rychlík (R), čas průjezdu 10:29 (ID 5)									
poř. kola		ampl. zrychlení		abs. hodnota	průměr		poměr		stav
		-	+	max	typ	celk.	typ	celk.	
1	lokomotiva	-118,3	103,4	118,3	118,9		1,0	2,0	dobrý
2		-124	125,6	125,6			1,1	2,1	dobrý
3		-129,7	122,8	129,7			1,1	2,2	dobrý
4		-91,0	102,0	102,0			0,9	1,7	dobrý
5	1. vůz	-38,6	42,6	42,6			0,9	0,7	dobrý
6		-38,6	29,8	38,6			0,9	0,6	dobrý
7		-99,9	64,8	99,9			2,2	1,7	zhoršený
8		-44,7	44,9	44,9			1,0	0,8	dobrý
9	2. vůz	-20	21,8	21,8	45,1	59,8	0,5	0,4	dobrý
10		-19,2	18,0	19,2			0,4	0,3	dobrý
11		-16,4	20,9	20,9			0,5	0,3	dobrý
12		-46,6	58,1	58,1			1,3	1,0	dobrý
13	3. vůz	-237,7	204,9	237,7			5,3	4,0	špatný
14		-29,6	23,2	29,6			0,7	0,5	dobrý
15		-24,9	23,2	24,9			0,6	0,4	dobrý
16		-30,1	24,2	30,1			0,7	0,5	dobrý
17	4. vůz	-11,2	12,4	12,4			0,3	0,2	dobrý
18		-9,3	10,5	10,5			0,2	0,2	dobrý
19		-16,9	14,3	16,9			0,4	0,3	dobrý
20		-9,8	12,8	12,8			0,3	0,2	dobrý

Tabulka 15 - Vyhodnocení stavu dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Hranice n M.

Z výsledků vyplynulo, že za špatné železniční kolo bylo možno označit pouze takové, které se svou maximální výchylkou násobně lišilo od průměrné hodnoty zrychlení ostatních kol. Za optimální byla na základě vyhodnocení výsledků určena hranice 3 násobku průměrné hodnoty maximální výchylky. Tímto přístupem také nebylo možno dobře škálovat stav železničních kol z důvodu různorodosti dynamických účinků s ohledem na hmotnost daného železničního vozidla.

Hranice 3 násobku průměrné hodnoty maximálních výchylek jednotlivých kol byla stanovena na základě výsledků měření a jedním z příkladů vyhodnocení těchto měření byl i průjezd rychlíkové soupravy uvedené výše (Hranice na Moravě, průjezd 10:29, ID 5). Nejdříve byly určeny amplitudy zrychlení u jednotlivých kol vlakové soupravy, následně byla stanovena maximální amplituda v absolutní hodnotě a těchto hodnot byly dále vypočteny průměrné hodnoty amplitudy výchylky. Průměrné hodnoty byly počítány ve dvou variantách, a to průměrné hodnoty samostatně pro jednotlivé typy vozidel, tedy samostatně pro lokomotivu a samostatně pro osobní rychlíkové vagóny a druhou variantou byla průměrná hodnota výchylek zrychlení všech vozů ve vlakové soupravě.

Lepší výsledky byly dosahovány při rozdělení vozidel dle typu, protože daným typům odpovídala i jejich hmotnost, a tedy i vyšší či nižší dynamické účinky. Tímto postupem bylo zjištěno, že stav železničních kol lokomotivy je dobrý, všechna kola vykazují stejnou dynamickou odezvu, zatím co u osobních vagónů bylo detekováno jedno velmi špatné kolo a další jedno kolo již mělo zhoršený stav. Při tomto posouzení byla sdružena přibližně stejně hmotná vozidla, a proto také nedocházelo ke zvyšování průměrné hodnoty výchylky vagónů vlivem vyšších dynamických účinků lokomotivy a na druhou stranu nedocházelo ke snižování průměrných hodnot ve vztahu k lokomotivě.

Druhá varianta posouzení tyto rozdíly ve hmotnosti vozidel nereflektovala, a kladla výchylky všech vozidel na stejnou úroveň. Zde se projevil efekt snížení průměrné hodnoty ve vztahu k lokomotivě a jejímu vyššímu dynamickému účinku na železniční konstrukci. V tomto případě se hodnoty amplitudy výchylky zrychlení jednotlivých kol lokomotivy dostaly na dvojnásobek průměrné hodnoty všech výchylek. Naopak u sedmého dvojkolí této soupravy poměr změřené a průměrné výchylky klesl pod dvojnásobek a kolo se jevílo v tomto kontextu lepší, než skutečně bylo. U 13. dvojkolí se poměr měřené a průměrné výchylky sice snížil, ale stále zůstal dostatečně vysoký, aby bylo možno konstatovat, že 13. dvojkolí vykazuje defektní chování.

I když byla navržena v rámci této práce i metodika na určení typu jednotlivých drážních vozidel, je doporučeno v případě měřených dat pouze z jednoho snímače zrychlení z důvodu možných chyb při určení drážního vozidla postupovat spíše dle druhé popisované varianty hodnocení v této kapitole.

9.3. Vyhodnocení stavu podbití

Určení stavu podbití bylo metodikou navrženo posuzovat pouze na základě bezvadných kol (nebo též kol, která nevykazují zjevné defekty). Ovšem při sekundárním využití měřených dat nebylo možno přesně určit všechna defektní kola, a proto posouzení vycházelo pouze z přibližné identifikace defektních kol. Z lokality Hranice na Moravě a Napajedla byla k dispozici data pouze z jednoho snímače zrychlení, kterým byl tříosý akcelerometr od společnosti Brüel & Kjær s typovým označením B&K 4524 B. Stejný typ snímače zrychlení byl osazen při

měření v lokalitě Doubravice nad Svitavou na 4. pražci. Z důvodu porovnatelnosti výsledků byla proto pro vyhodnocení stavu podbití využita ve všech případech data právě z tohoto typu snímače.

Dalším parametrem, který byl při posouzení zohledněn byl typ vlakové soupravy. Z důvodu rovnoměrnějšího zatížení železniční konstrukce byly pro hodnocení vybírány vlakové soupravy s menším hmotnostním rozptylem, to znamená, že byly vybírány k posouzení výhradně osobní vlaky, které mají rovnoměrnější rozložení hmotnosti po délce vlaku. (Z tohoto pohledu byly nejlepší osobní elektrické jednotky, u nichž byly všechny vozy přibližně stejně těžké.)

9.3.1. Lokalita Doubravice nad Svitavou

Měření v lokalitě Doubravice nad Svitavou bylo účelově zaměřeno na zjišťování dynamické odezvy na železniční konstrukci v dobrém a špatném stavu, tedy na konstrukci správně podbitou s bezvadnými GPK a na konstrukci určenou k podbíjení s rozpadlými GPK.

Hodnocení vycházelo z předpokladu změny tlumících schopností podbité a nepodbité konstrukce. První měření bylo provedeno dne 9.6. 2021 na nepodbité trati. Výsledky ukázaly, že v případě nepodbité trati byly maximální amplitudy kladných výchylek zrychlení větší než maximální amplitudy záporných výchylek zrychlení.

Doubravice nad Svitavou, 9.6.2021							
Pořadí (ID)	Čas	Druh vlaku	suma výchylek		poměr	průměr	stav
			-	+			
1	10:16	R	-716,0	797,8	1,11	1,36	špatný stav, doporučeno podbít
2	10:22	Os	-1649,5	1878,3	1,14		
3	11:15	Os	-598,7	731,9	1,22		
4	12:18	Os	-216,3	330,9	1,53		
5	13:16	Os	-959,5	1304,6	1,36		
6	13:46	Os	-1577,9	1972,6	1,25		
7	14:19	R	-962,5	1444,3	1,50		
8	14:24	Os	-600,6	870,6	1,45		
9	14:46	Os	-804,1	1148,7	1,43		
11	15:19	Os	-471,7	693,6	1,47		
12	15:45	Sp	-465,0	704,3	1,51		
13	15:47	Os	-242,3	315,4	1,30		

Tabulka 16 - Vyhodnocení stavu podbití, Doubravice n S., červen

Poměr kladné výchylky a záporné výchylky pak určil hodnotící kritérium míry poškození železniční trati.

Ihned po prvním měření proběhlo v lokalitě Doubravice nad Svitavou podbíjení předmětného traťového úseku. Druhé měření v této lokalitě proběhlo přibližně dva měsíce po

provedení podbití trati. Tento časový odstup byl zvolen z důvodu konsolidace železniční konstrukce, aby se zrna čerstvě podbité trati mohla do sebe pevně zaklesnout a nedocházelo v konstrukci již k žádným druhotným pohybům.

Doubravice nad Svitavou, 18.8.2021							
Pořadí (ID)	Čas	Druh vlaku	suma výchylek		poměr	průměr	stav
			-	+			
1	Os	10:20	-554,6	403,2	0,73	0,86	nově podbitá konstrukce
2	R	10:26	-801,6	591,5	0,74		
4	Os	11:16	-522,9	503,5	0,96		
5	Os	12:19	-412,8	386,6	0,94		
6	Os	13:16	-1383,1	1152,2	0,83		
7	Os	13:47	-997,1	948,0	0,95		
8	R	14:13	-1064,4	818,0	0,77		
9	Os	14:21	-622,0	527,4	0,85		
11	Os	14:47	-382,0	365,9	0,96		
13	Os	15:16	-735,6	552,5	0,75		
15	Sp	15:46	-909,0	816,8	0,90		
16	Os	15:48	-491,3	463,7	0,94		

Tabulka 17 - Vyhodnocení stavu podbití, Doubravice n S., srpen

Před podbitím kladné výchylky zrychlení převyšovaly záporné hodnoty výchylek s poměrem 1,36, a tedy byly větší o 36 %. Vlivem podbití a vyrovnání GPK se změnily tlumicí účinky železniční konstrukce a poměr kladných ku záporným výchylkám byl 0,86. Záporné výchylky zrychlení převyšovaly v absolutní hodnotě kladné výchylky o 14 %. Tento rozdíl v tlumicích účincích železniční konstrukce bylo možno škálovat a vytvořit předkládanou metodiku pro určení stavu podbití.

9.3.2. Lokalita Hranice na Moravě

V lokalitě Hranice na Moravě byl proveden soupis vlakových souprav pro osobní přepravu, a byly zaznamenány průměry kladných výchylek a záporných výchylek zrychlení. V signálu dynamické odezvy rychlíku s pořadovým číslem 25, s časem průjezdu 13:59, byly zaznamenány před příjezdem vlastní vlakové soupravy rušivé vlny, u kterých nebylo možno rozhodnout, čím byly způsobeny, proto byly výsledky z dynamické odezvy této vlakové soupravy z hodnocení stavu podbití vyřazeny. Stejně tak nebyly do posouzení zahrnuty ani nákladní vlaky, z důvodu nerovnoměrnosti zatížení a přílišné variability dynamických účinků.

Hranice na Moravě, 16.7. 2013							
Pořadí (ID)	Čas	Druh vlaku	suma výchylek		poměr	průměr	stav
			-	+			
1	9:57	SC	-581,1	638,5	1,10	0,97	konstrukce v dobrém stavu
5	10:29	R	-912,0	878,3	0,96		
7	10:47	Rex	-581,6	607,5	1,04		
8	10:54	R (Leo)	-178,0	231,1	1,30		
9	11:17	R	-1637,5	1606,0	0,98		
10	11:22	Os	-559,4	644,1	1,15		
11	11:32	EC	-816,0	811,9	0,99		
12	11:57	SC	-597,3	627,9	1,05		
16	12:29	R	-788,2	688,7	0,87		
17	12:37	R	-518,6	550,9	1,06		
19	12:59	R (Leo)	-183,8	189,8	1,03		
20	13:17	R	-1499,2	1474,2	0,98		
21	13:27	Os	-459,4	452,6	0,99		

Tabulka 18 - Vyhodnocení stavu podbití, Hranice n M.

Po zpracování výsledů kladných a záporných výchylek zrychlení bylo zjištěno, že poměr mezi nimi osciloval okolo hodnoty 1,0 a tedy maximální kladné výchylky zrychlení se rovnaly v absolutní hodnotě maximálním záporným výchylkám.

Z vyhodnocení bylo tedy usuzováno, že železniční konstrukce se nacházela v dobrém technickém stavu a nebylo nutné ji podbíjet. S ohledem na velký časový odstup mezi měřením a následným vyhodnocováním dat se již nepodařilo zajistit k porovnání výsledky měřícího vozu na dané trati. Předmětný traťový úsek byl v době měření (a stále je) součástí II. a III. tranzitního železničního koridoru, lze tedy předpokládat, že stav železniční konstrukce byl dobrý.

9.3.3. Lokalita Napajedla

Charakter dynamické odezvy z lokality Napajedla nebyl pro zpracování dle metodiky určení polohy dvojkolí ideální, proto i výsledky určení polohy nebyly zcela přesné. Pro následné hodnocení typů železničních vozidel vykazovala tato data poměrně vysokou chybovost, avšak pro určení stavu podbití byla získaná data dostačující. Pro určení stavu podbití bylo třeba znát poměr maximální kladné a záporné výchylky zrychlení alespoň u několika železničních kol několika vlakových souprav, aby bylo možno vytvořit si přibližný obrázek o stavu železniční konstrukce. V krátkodobém horizontu průjezdu jedné vlakové soupravy se tlumící vlastnosti konstrukce nezmění nakolik, aby došlo ke změně poměru maximálních hodnot kladných a záporných výchylek, proto by ze své podstaty stačil záznam pouze jednoho železničního kola u každé vlakové soupravy, ale s ohledem na velkou různorodost měřených dat byly hodnoceny vždy větší soubory dat, aby se nahodilé nerovnoměrnosti srovnávaly průměrováním hodnot.

Napajedla, 17.7. 2013							
Pořadí (ID)	Čas	Druh vlaku	suma výchylek		poměr	průměr	stav
			-	+			
1	8:39	R	-760,97	798,10	1,05	0,97	konstrukce v dobrém stavu
5	9:20	R	-856,46	809,96	0,95		
7	9:54	R	-679,00	670,67	0,99		
8	10:38	R	-874,81	857,26	0,98		
11	11:19	R	-792,08	825,86	1,04		
13	11:48	R	-618,52	595,29	0,96		
15	12:18	EC	-674,00	601,18	0,89		
16	12:23	Os	-292,66	281,87	0,96		
17	12:43	Os	-420,39	408,28	0,97		
19	13:16	Os	-300,61	275,54	0,92		

Tabulka 19 - Vyhodnocení stavu podbití, Napajedla

Stejně jako v případě železniční trati v Hranicích na Moravě bylo možné označit stav železniční konstrukce v lokalitě Napajedla za dobrý. Stejně jako trať v Hranicích byla (a stále je) i trať v Napajedlech součástí tranzitního železničního koridoru. V případě Napajedel se jednalo pouze o II. železniční koridor. Koridorové tratě byly a jsou udržovány v dobrém technickém stavu, takže výsledek „konstrukce v dobrém stavu“ byl považován za relevantní. Tento výsledek však nebylo možno ověřit na základě dat z měřicího vozu, protože se je nepodařilo získat k dispozici.

9.4. Určení typu vlakové soupravy

Určení typu vlakové soupravy byla poslední úlohou, která byla v rámci této práce řešena. Tato úloha vycházela ze znalosti polohy dvojkolí v měřeném signálu dynamické odezvy a dalších informací, které bylo možné ze sledovaného signálu vyčíst. Jednalo se zejména o počet vozů vlakové soupravy a rychlost soupravy.

Rychlost vyšší než 120 km/h například determinovala vlakovou soupravu pro přepravu osob. Ale i na základě počtu vozů bylo možné provést jisté korekce ve výsledném určení vlakové soupravy. Typicky šlo o počet vozů osobních elektrických jednotek, které se provozují jako celek a mají většinou daný počet vozů (dvou, tří nebo čtyř článkové jednotky, ale též sedmi článková jednotka). Pokud bylo zaznamenáno více než 10 železničních vozů, jednalo se vždy o nákladní soupravu. Mezi měřenými soupravami se nevyskytovala žádná osobní vlaková souprava, která by měla více než 10 vozů. Obecně sice mohou být provozovány i delší osobní vlakové soupravy, ale s ohledem na dělbu přepravní práce se v běžném provozu vyskytují spíše výjimečně. Daleko běžnější je provozování kratších osobních vlakových souprav ve vyšším taktu (častěji).

Určení typu vlakové soupravy vycházelo ze znalosti parametrů osobních vozů (jak osobních vagónů, tak i osobních elektrických jednotek) a ze znalosti parametrů lokomotiv. Do ověření správnosti určování typu železničního vozidla byly přidány i nákladní vagóny, které se

svými rozměry blížily provozovaným osobním vagónům. Tyto parametry pak tvořily základ posouzení jednotlivých železničních vozidel.

Parametry železničních vozidel, které byly posuzovány a byly zároveň výběrovou množinou podpůrného vektoru byly:

- délka rozvoru vnitřních kol železničního vozu
- délka rozvoru vnějších kol železničního vozu
- poměr rozvoru vnitřních kol železničního vozu k rozvoru vnějších kol

Rozvor podvozku pro posuzování typu železničního vozu přímo využít nebyl, nicméně tato hodnota byla zahrnuta jednak v délce rozvoru vnějších kol (délka rozvoru vnitřních kol a rozvory podvozků tvoří vnější rozvor kol) a jednak byla zahrnuta i v poměru rozvoru vnitřních kol k rozvoru vnějších kol.

Rozvory podvozků byly pro určení typu železničního vozu důležité, protože nákladní vozy mají obvykle rozvor do 2,0 m (nejčastěji používaný nákladní podvozek Y25 má rozvor 1,8 m), kdežto podvozky osobních vozů mívají rozvor 2,5 m a více.

Protože metodika určení stavu podbití byla navržena pro posouzení dynamické odezvy od osobních vlaků, zaměřila se i metodika určení typu vlakové soupravy na přesnou identifikaci zvláště osobních vlakových souprav. Variabilita osobních železničních vozů (ať již samostatných vagónů nebo jednotlivých článků ucelených jednotek) byla nižší než rozměrová variabilita nákladních vozů, proto stačil pro posuzování menší soubor vzorových parametrů pro podpůrné vektory. Protože byly do posouzení zařazeny parametry všech nejběžněji provozovaných osobních vozů na příslušných tratích, bylo možné neidentifikované železniční soupravy označit za soupravy nákladní.

Tento princip lze případně využít na všech měřicích místech, že do hodnotících parametrů budou nahrány jen údaje o železničních vozech, které budeme chtít v daném úseku identifikovat.

Tabulka udává parametry, které vstupovaly do posouzení jako podpůrné vektory. Pro účely posouzení shody byly do srovnání přidány i parametry nákladních železničních vozů, které se rozměrově blížily některým z posuzovaných osobních vozů. V tabulce jsou uvedeni typičtí zástupci dané kategorie, například elektrická jednotka řady 640 a řady 650 je postavena na stejném základu jako jednotky řad 440, 530, 550, 660 a 661. V posouzení byly tedy určovány jedna či dvě typické typové řady, a nebylo dále rozlišováno, o kterou konkrétní řadu ze všech příbuzných typových řad se jedná.

Podpůrné vektory - rozvory kol železničních vozů								
typ železničního vozu		délky rozvorů			rozvor vnějších kol	poměry rozvorů		
		pod- voz.	vnitřní kola	pod- voz.		pod- voz.	vnitřní kola	pod- voz.
osobní vozy a jednotky	el. jednotka 640, 650	2,5	16,6	2,5	21,6	0,116	0,769	0,116
	osobní vagón 26,4 m	2,6	16,4	2,6	21,6	0,120	0,759	0,120
	SC Pendolino	2,7	16,3	2,7	21,7	0,124	0,751	0,124
	osobní vagón 24,5 m	2,5	14,7	2,5	19,7	0,127	0,746	0,127
	Leo (Stadler)	2,7	13,3	2,7	18,7	0,144	0,711	0,144
loko.	řada 380	2,5	6,2	2,5	11,2	0,223	0,554	0,223
	řada 150, 263, 363	3,2	5,1	3,2	11,5	0,278	0,443	0,278
nákladní vozy	Eanos II.	1,8	8,9	1,8	12,5	0,144	0,712	0,144
	Roos	1,8	12,8	1,8	16,4	0,110	0,780	0,110
	Habbins	1,8	15,924	1,8	19,524	0,092	0,816	0,092

Tabulka 20 - Parametry železničních vozů

Posouzení bylo provedeno ve dvou krocích. Nejdříve bylo provedeno určení typu jednotlivých železničních vozů a v druhém kroku byla provedena případná korekce výstupu a určení vlakové soupravy. V posouzení se pracovalo se shodou tří parametrů a na základě jejich průměru byla pak vyčíslena shoda s určitým typem železničního vozu. Při hledání jednotlivých vozů se postupovalo od největších zaznamenaných délek rozvorů následných železničních kol.

9.4.1. Lokalita Doubravice nad Svitavou

Určení typu vlakové soupravy vychází z polohy jednotlivých dvojkolí. V lokalitě Doubravice nad Svitavou při prvním i při druhém měření byl měřený signál dynamické odezvy vhodný ke zpracování a polohy jednotlivých dvojkolí byly určeny relativně přesně. Z toho následně vyplynula i vysoká úspěšnost při určování typu vlakové soupravy.

Pro prezentaci vyhodnocení byly vybrány železniční vozy, které si byly podobné. Nahodilými nepřesnostmi v měřeném signálu došlo k situaci, že druhý až čtvrtý vůz u zaznamenaného spěšného vlaku měl plnou shodu s poměrem rozvoru vnitřních kol, ovšem plná shoda byla u každého zaznamenaného vozu s jiným typovým vozem. Druhý vůz spěšného vlaku vykazoval úplnou shodu s parametrem poměru vnitřního rozvoru nákladního vozu typu Roos (čtyřnápravový plošinový vůz s pevnými čelními stěnami a vysokými klanicemi, který je určen pro přepravu kmenového dříví). Třetí vůz spěšného vlaku se plně v jednom parametru shodoval s parametrem článku elektrické jednotky řady 680 Pendolino a čtvrtý vůz vykazoval plnou shodu s parametrem osobního vagónu s délkou přes nárazníky 26,4 m.

První vůz spěšného vlaku se o následujících tří vozů zásadně lišil.

Doubravice nad Svitavou, 9.6.2021														
Spěšný vlak (Sp), čas průjezdu 15:45 (ID 12)														
měřené rozvory			poměr mezi hodnotami reálného vozu a měřenými hodnotami											
následná kola [m]	vnější kola vozu [m]	poměry kol	os. vagón 26,4 m			SC Pendolino			Roos - nákl. vůz			loko ř. 363		
			16,4	21,6	0,76	16,3	21,7	0,75	12,8	16,4	0,78	5,1	11,5	0,44
			[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]
0,00														
3,40	12,37	0,275												
5,68		0,460	0,35	0,57	0,61	0,35	0,57	0,61	0,44	0,75	0,59	1,11	1,08	1,04
3,28		0,266												
5,57	spojení vagónů													
2,76	23,40	0,118												
18,30		0,782	1,12	1,08	1,03	1,12	1,08	1,04	1,43	1,43	1	3,59	2,03	1,77
2,34		0,100												
5,16	spojení vagónů													
2,93	23,40	0,125												
17,59		0,752	1,07	1,08	0,99	1,08	1,08	1	1,37	1,43	0,96	3,45	2,03	1,7
2,88		0,123												
5,27	spojení vagónů													
2,53	23,34	0,108												
17,70		0,758	1,08	1,08	1	1,09	1,08	1,01	1,38	1,42	0,97	3,47	2,03	1,71
3,11		0,133												

Tabulka 21 - Určení shody parametrů železničních vozů, Doubravice n S., červen

Po provedení vyhodnocení a určení finální shody jednotlivými typy vzorových železničních vozidel bylo určeno, že první vůz spěšného vlaku byla lokomotiva typové řady 363 a příbuzných řad a 2., 3. i 4. vůz spěšného vlaku byl osobní vagón s délkou přes nárazníky 26,4 m. Konkrétně se jednalo o lokomotivu řady 362 a osobní vagóny v pořadí od 2. po 4. vagón Bdmtee²⁸¹, Bdmtee²⁷⁵ a Bdmtee²⁸¹. Vyhodnocení dopadlo úspěšně, jednotlivé vozy spěšného vlaku byly identifikovány v souladu se skutečností.

V rámci posouzení typu vlakové soupravy došlo také ke korekci vypočtené rychlosti, která byla u posuzované vlakové soupravy o 8 % nadhodnocena. V tabulce 19. byly červeně označeny hodnoty, na základě kterých byla korekce provedena. Jedná se o parametr rozvoru vnějších kol železničního vozu, u které byl u všech zkoumaných vozů údaj o délce rozvoru vnějších kol zvětšen ve stejném poměru. Tento údaj odpovídal dříve zjištěným skutečnostem.

Pro korekci rychlosti je doporučeno používat parametr rozvoru vnějších kol železničního vagónu, protože rozvor vnitřních kol vykazoval při měření o něco nižší spolehlivost.

Doubravice nad Svitavou, 9.6.2021										
Spěšný vlak (Sp), čas průjezdu 15:45 (ID 12)										
měřená data		os. vagón 26,4 m		SC Pendolino		Roos - nákl. vagón		loko ř. 363		vyhodnocení
		poměr	shoda	poměr	shoda	poměr	shoda	poměr	shoda	
0,00										
3,40	1. vůz	0,5082	50,8%	0,5102	51,0%	0,5958	59,6%	1,0757	92,4%	lokomotiva řady 363
5,68										
3,28										
5,57	spoj									
2,76	2. vůz	1,0766	92,3%	1,0809	91,9%	1,2864	71,4%	2,4629	-	osobní vagón 26,4 m
18,30										
2,34										
5,16	spoj									
2,93	3. vůz	1,0487	95,1%	1,0528	94,7%	1,2549	74,5%	2,3935	-	osobní vagón 26,4 m
17,59										
2,88										
5,27	spoj									
2,53	4. vůz	1,0532	94,7%	1,0573	94,3%	1,2596	74,0%	2,4044	-	osobní vagón 26,4 m
17,70										
3,11										

Tabulka 22 - Určení skladby vlakové soupravy, Doubravice n S., červen

Shoda osobních vozů s typovým osobním vagónem a také shoda lokomotivy s typovou lokomotivou přesáhla 92 %. Pokud by byla korigována vypočtená rychlost a bylo provedeno nové posouzení shody s korigovanou rychlostí, byla by shoda u jednotlivých vozů ještě vyšší.

U další měřené soupravy, která byla zaznamenána v lokalitě Doubravice nad Svitavou při druhém měření, byla již rychlost vypočtená dle předkládaných postupů pomocí dvou snímačů zrychlení shodná s reálnou rychlostí vypočtenou na základě délky celé vlakové soupravy. Tato skutečnost se následně projevila i posouzení vyšší shodou některých parametrů.

Posuzovanou vlakovou soupravou byla v tomto případě tříčlánková elektrická osobní jednotka řady 640. Do porovnání byly přidány parametry osobního vagónu s délkou 26,4 m, článek elektrické jednotky 680 Pendolino a lokomotiva řady 363.

Doubravice nad Svitavou, 18.8.2021														
Osobní vlak (Os), čas průjezdu 12:19 (ID 5)														
měřené rozvory			poměr mezi hodnotami reálného vozu a měřenými hodnotami											
následná kola [m]	vnější kola vozu [m]	poměry kol	os. vagón 26,4 m			SC Pendolino			el. jednotka 640			loko ř. 363		
			16,4	21,6	0,76	16,3	21,7	0,75	16,6	21,6	0,77	5,1	11,5	0,44
			[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]
0,00														
2,67	21,71	0,123												
16,84		0,775	1,03	1,01	1,02	1,03	1,00	1,03	1,01	1,01	1,01	3,30	1,89	1,75
2,20		0,102												
4,88	spojení vagónů													
2,67	21,80	0,123												
16,32		0,749	1,00	1,01	0,99	1,00	1,00	1,00	0,98	1,01	0,97	3,20	1,90	1,69
2,81		0,129												
5,07	spojení vagónů													
2,44	21,66	0,113												
16,93		0,781	1,03	1,00	1,03	1,04	1,00	1,04	1,02	1,00	1,02	3,32	1,88	1,76
2,30		0,106												

Tabulka 23 - Určení shody parametrů železničních vozů, Doubravice n S., srpen

Již při prvním porovnání vstupních parametrů bylo zřejmé, že ani jeden z vozů vlakové soupravy není lokomotivou. Dále shoda u parametru rozvoru vnějších kol železničního vagónu určovala, že vypočtená rychlost téměř odpovídá reálné rychlosti vlakové soupravy.

Výsledná shoda parametrů dosahovala velmi vysoké míry shody přesahující 98 %.

První vůz byl identifikován jako článek osobní elektrické jednotky řady 640, druhý vůz byl identifikován jako článek osobní elektrické jednotky řady 680 Pendolino a třetí vůz byl identifikován opět jako článek osobní elektrické jednotky řady 640. Protože byly identifikovány články osobních elektrických jednotek vzájemně jiných řad, bylo nutno provést korekci.

V lokalitě Doubravice nad Svitavou nebyly vlaky řady 680 Pendolino vedeny a nad to, elektrické jednotky 680 Pendolino jsou provozovány jednotně se 7 články. Na měřicím stanovišti byla však zaznamenána pouze tříčlávková jednotka. Bylo tedy vyhodnoceno, že článek jednotky Pendolino se v dané elektrické jednotce nevyskytoval a byl z posouzení vypuštěn. Další nejvyšší míru shody vykazoval osobní vagón s délkou 26,4 m. Ten však nebývá řazen do ucelených jednotek, a první a poslední vůz byl identifikován jako článek osobní elektrické jednotky řady 640. V tří vozové vlakové soupravě nebyla identifikována lokomotiva, proto byl i osobní vagón byl z posouzení vypuštěn. Následující, třetí nejvyšší míru shody vykazoval článek elektrické osobní jednotky řady 640. Míra shody činila 98,9 % a předchozí i následný železniční vůz byl identifikován jako článek osobní elektrické jednotky řady 640.

Řada jednotek 640 je provozována běžně jako tří článková vlaková souprava. Bylo vyhodnoceno, že se jednalo o osobní elektrickou jednotku řady 640, čímž také posuzovaná vlaková souprava ve skutečnosti byla.

Doubravice nad Svitavou, 18.8.2021										
Osobní vlak (Os), čas průjezdu 12:19 (ID 12)										
měřená data		os. vagón 26,4 m		SC Pendolino		el. jednotka ř. 640, 650		loko ř. 363		vyhodnocení
		poměr	shoda	poměr	shoda	poměr	shoda	poměr	shoda	
0,00										
2,67	1. vůz	1,0179	98,2%	1,022	97,8%	1,0095	99,0%	2,3133	-	el. jednotka 640, 650
16,84										
2,20										
4,88	spoj									
2,67	2. vůz	0,9969	99,7%	1,0009	99,9%	0,9888	98,9%	2,2618	-	SC Pendolino
16,32										
2,81										
5,07	spoj									
2,44	3. vůz	1,0216	97,8%	1,0258	97,4%	1,0132	98,7%	2,3224	-	el. jednotka 640, 650
16,93										
2,30										

Tabulka 24 - Určení skladby vlakové soupravy, Doubravice n S., srpen

9.4.2. Lokalita Hranice na Moravě

Na koridorovém úseku trati severně od Hranic na Moravě byla v místě měření provozována stejná konstrukce železničního svršku jako v lokalitě Doubravice nad Svitavou. (Doubravice nad Svitavou leží také na koridorové trati, konkrétně na I. tranzitním železničním koridoru). Naměřené signály dynamické odezvy od pojezdu vlakových souprav na tomto stanovišti byly bez problému zpracovatelné navrženými algoritmy. Výsledky z určení polohy železničních kol byly použitelné pro následnou analýzu typu vlakových souprav.

V lokalitě Hranice na Moravě byla pro posouzení použita rychlost měřená ručním rychloměrem. V této lokalitě byly k dispozici data pouze z jednoho snímače zrychlení, proto nebylo možno rychlost dopočítat na základě pohybu prvního dvojkolí přes dva snímače zrychlení umístěné ve známé vzájemné vzdálenosti, jako tomu bylo v případě měření v Doubravici nad Svitavou. Měření rychlosti ručním rychloměrem ve vztahu k reálné rychlosti vlakové soupravy však bylo v tomto případě relativně přesné. Rychlost naměřená ručním rychloměrem byla 150 km/h, reálná rychlost určená na základě délky vlakové soupravy a času průjezdu byla 150,4 km/h. Rychlosti bylo možné považovat za identické, což se následně projevilo také ve vysoké míře shody mezi měřeným železničním vozem a typovým srovnávacím vozem.

Již rychlost vyšší než 120 km/h vyřadila z posouzení nákladní vlaky. Posouzení tedy spočívalo v určení, zda se jedná o vlakovou soupravu sestavenou z lokomotivy a osobních vagónů nebo jde o osobní jednotku.

Hranice na Moravě, 16.7. 2013														
Pendolino (SC), čas průjezdu 11:57 (ID 12)														
měřené rozvory			poměr mezi hodnotami reálného vozu a měřenými hodnotami											
následná kola [m]	vnější kola vozu [m]	poměry kol	os. vagón 26,4 m			SC Pendolino			el. jednotka 640			loko ř. 380		
			16,4	21,6	0,76	16,3	21,7	0,75	16,6	21,6	0,77	6,2	11,2	0,55
			[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]
0,00														
2,69	21,72	0,124												
16,10		0,741	0,98	1,01	0,98	0,99	1,00	0,99	0,97	1,01	0,96	2,60	1,94	1,34
2,93		0,135												
3,93	spojení vagónů													
2,82	21,96	0,128												
15,99		0,728	0,97	1,02	0,96	0,98	1,01	0,97	0,96	1,02	0,95	2,58	1,96	1,32
3,15		0,144												
3,93	spojení vagónů													
2,60	21,72	0,120												
16,43		0,756	1,00	1,01	1,00	1,01	1,00	1,01	0,99	1,01	0,98	2,65	1,94	1,37
2,69		0,124												
3,94	spojení vagónů													
3,04	21,94	0,139												
16,21		0,739	0,99	1,02	0,97	0,99	1,01	0,98	0,98	1,02	0,96	2,61	1,96	1,33
2,69		0,123												
4,06														
2,93	21,72	0,135												
15,99		0,736	0,97	1,01	0,97	0,98	1,00	0,98	0,96	1,01	0,96	2,58	1,94	1,33
2,81		0,129												
3,94	spojení vagónů													
3,04	21,83	0,139												
15,97		0,732	0,97	1,01	0,96	0,98	1,01	0,97	0,96	1,01	0,95	2,58	1,95	1,32
2,82		0,129												
4,17	spojení vagónů													
2,81	21,72	0,129												
16,10		0,741	0,98	1,01	0,98	0,99	1,00	0,99	0,97	1,01	0,96	2,60	1,94	1,34
2,82		0,130												

Tabulka 25 - Určení shody parametrů železničních vozů, Hranice n M.

Posouzení ukázalo, že se ve vlakové soupravě nenachází žádná lokomotiva, respektive nebyla ve vlakové soupravě identifikována. Porovnávána lokomotiva řady 380 „Emil Zátopek“,

vykazovala pouze 2 – 5 % shodu s měřenými daty, tedy měřená data se prakticky neshodovala s parametry lokomotivy.

Tím, že nebyla ve vlakové soupravě identifikována žádná lokomotiva, se ukázalo, že se jedná nejspíše o osobní jednotku.

Hranice na Moravě, 16.7. 2013													
Pendolino (SC), čas průjezdu 11:57 (ID 12)													
měřená data		os. vagón 26,4 m		SC Pendolino		el. jednotka řada 640, 650		lokomotiva řada 380		vyhodnocení			
		poměr	shoda	poměr	shoda	poměr	shoda	poměr	shoda				
0,00													
2,69	1. vůz	0,9878	98,8%	0,9918	99,2%	0,9799	98,0%	1,958 2	4,2%	SC Pendolino			
16,10													
2,93													
3,93	spoj												
2,82	2. vůz	0,9835	98,4%	0,9873	98,7%	0,9756	97,6%	1,951 4	4,9%	SC Pendolino			
15,99													
3,15													
3,93	spoj												
2,60	3. vůz	1,0014	99,9%	1,0054	99,5%	0,9932	99,3%	1,985 3	1,5%	osobní vagón 26,4 m			
16,43													
2,69													
3,94	spoj												
3,04	4. vůz	0,9925	99,2%	0,9964	99,6%	0,9845	98,4%	1,969 3	3,1%	SC Pendolino			
16,21													
2,69													
4,06	spoj												
2,93	5. vůz	0,9833	98,3%	0,9872	98,7%	0,9754	97,5%	1,949 1	5,1%	SC Pendolino			
15,99													
2,81													
3,94	spoj												
3,04	6. vůz	0,9829	98,3%	0,9867	98,7%	0,975	97,5%	1,949	5,1%	SC Pendolino			
15,97													
2,82													
4,17	spoj												
2,81	7. vůz	0,9878	98,8%	0,9918	99,2%	0,9799	98,0%	1,958 2	4,2%	SC Pendolino			
16,10													
2,82													

Tabulka 26 - Určení skladby vlakové soupravy, Hranice n M.

U šesti ze sedmi vozů vlakové soupravy bylo identifikováno, že se jedná o osobní elektrickou jednotku řady 680 Pendolino. Jeden vůz byl identifikován jako osobní vagón s délkou 26,4 m. Protože ale do soupravy Pendolina nejsou řazeny osobní vozy a v soupravě se nevyskytovala žádná lokomotiva, byl osobní vagón po korekcích z posouzení vypuštěn. Druhou nejvyšší míru shody (99,5 %) u 3. vozu vlakové soupravy vykazoval článek jednotky Pendolino. Všechny vozy byly identifikovány jako články osobní elektrické jednotky řady 680 Pendolino, a tato identifikace se také shodovala s reálným stavem. Posuzovaná vlaková souprava byla skutečně jednotka Pendolino.

9.4.3. Lokalita Napajedla

V lokalitě Napajedla byla konstrukce železničního svršku založena na systému uchycení Fastclip od společnosti Pandrol. Tento systém uchycení zřejmě způsobil, že ani v delších úsecích rozvoru vnitřních kol osobních vagónů nedocházelo na pražcích k útlumu výchylek zrychlení a rozkmit výchylek byl natolik výrazný, že nebylo možné přímo použít navrhované metody určení polohy železničních dvojkolí. Po úpravě signálu plovoucím průměrem s malým průměrovacím oknem došlo sice k částečnému vyhlazení signálu, aby bylo možno použít navrhované metody, ale úpravou signálu byly do něj vneseny další nepřesnosti a výsledky určení polohy dvojkolí vykazovaly vyšší odchylky od reálné polohy dvojkolí železničních vozů.

Tyto nepřesnosti byly přeneseny samozřejmě i do vyhodnocení typu vlakové soupravy. Identifikace jednotlivých železničních vozů vykazovala nižší míru shody s reálnými vzorovými vozy. S horšími vstupními daty polohy železničních dvojkolí v měřeném signálu, které se projeví nepřesvědčivým určením typu železničního vozu, bylo pak méně přesné výsledné určení vlakové soupravy. Mnoho souprav nebylo možno z důvodu špatné identifikace železničních vozů zařadit do některé z kategorií vlakových souprav. Typicky se prolínaly ve vlakových soupravách osobní a nákladní vozy a nebylo možno rozhodnout, zda se jednalo o nákladní nebo osobní vlakovou soupravu. Byly také zaznamenány případy, kdy byl vlak sestavený z lokomotivy a pěti osobních vagónů vyhodnocen jako čistě nákladní vlak.

Základní problém při vyhodnocení v signálu dynamické odezvy od pojezdu vlakových souprav v lokalitě Napajedla byl v rozkmitu měřeného signálu a nepřesné identifikaci projevu dvojkolí v tomto signálu. Možným řešením je úprava algoritmu prvotního zpracování signálu. Nadějným se zdá být přístup kumulativního součtu výchylky zrychlení s následným vyrovnáním křivky pomocí waveletů. Tento přístup byl při zpracování této práce zkoušen, avšak se nepodařilo nalézt vhodný typ waveletu, který by výslednou křivku kumulativního součtu vyrovnal do patřičné podoby. Nicméně je to možný směr dalšího vývoje vyhodnocovacích algoritmů, který v sobě skýtá jistý potenciál.

10. Optimalizace měřicí aparatury

Možností pro optimalizaci měřicí aparatury se nabízí velké množství, ovšem při každé takové snaze je třeba brát na zřetel původní záměr, kterým bylo vytvoření jednoduché, levné, funkční aparatury ke sledování dynamických účinků od pojezdu kolejových vozidel. Je třeba věnovat pozornost tomu, aby nově zařazované prvky svou cenou a složitostí nesnižovaly následnou použitelnost měřicího systému.

Prvkem, který není v sestavě přesně typově zakotvený je například spouštěcí trigger, na kterém lze demonstrovat vhodnost a nevhodnost použitých prvků. Pro spouštění měření záznamu lze užít celou řadu elektrotechnických prvků, jako jsou světelné brány založené na laserovém nebo infračerveném paprsku, indukční snímače magnetického pole, elektrotechnické prvky na bázi piezoelektrika, akcelerometry a čidla zaznamenávající změnu mechanického kmitání, ale i čidla zaznamenávající změnu deformace v kolejnici, čili tenzometry.

Například světelná brána založená na laserovém paprsku a fotobuňce by požadovanou funkci spouštěcího triggeru jistě zajistila, dokonce by mohla být využita jako čítač náprav pro ověření měření. Pro navrhované autonomní zařízení však není světelná brána vhodným řešením, protože musí být stále napájena, což snižuje možnosti provozu čistě jen na baterie. Dále jsou zde povětrnostní vlivy, které mohou zhoršit podmínky použití (např. při sněžení nebo dešti) a v neposlední řadě jde o možnost poškození ať již úmyslného nebo neúmyslného. Obdobnými problémy trpí většina dalších technických řešení, a to zejména problémem nutnosti stálého napájení. Některé z problémů u prototypového provedení mohou být následně při velkosériové produkci odstraněny, jako například problematické osazování tenzometrů na patu kolejnice. Při větších počtech osazovaných tenzometrů by byl jistě vyvinut automatický aplikátor, což komplikuje a prodražuje další vývoj měřicího zařízení. Použití nevhodného typu triggeru může proto celou autonomní měřicí soupravu odsoudit k zániku. V tomto kontextu se pro použití nejlépe hodí piezoelektrické triggery.

Triggery v podobě piezoelementů jsou do autonomního měřicího zařízení navrženy jako optimální řešení, které se jeví nejméně náchylné k poškození vnějšími vlivy, tj. jak vlivy povětrnostními, tak vandalismem nebo třeba náhodným střetem s projíždějící vlakovou soupravou. Dále jsou piezoelementy velmi energeticky nenáročné a není je nutné stále držet pod proudem a nespornou výhodou je i snadná instalace tohoto prvku. Piezoelektrické desky se totiž vkládají pod patu kolejnice. Přes nesporné výhody však v reálu tento typ triggerů s představenou měřicí aparaturou ještě odzkoušen nebyl. Pro ověřování funkčnosti hlavní části aparatury byl zvolen trigger bez nutnosti zásahu do kolejového roštu z důvodu nižší náročnosti provedení měření, a to jak po stránce technické, tak i administrativní. Funkčnost piezoelementů v reálné konstrukci je tedy nutno ještě ověřit, lze však předpokládat jejich plná využitelnost.

Výhodou zařazení piezoelementů do měřicí sestavy je možnost přidání čítače impulzů a sledování celistvosti průjezdu vlakové soupravy porovnáním počtu impulzů na počátečním a koncovém triggeru. Lze tak snadno detekovat průjezd celé vlakové soupravy měřicím stanovištěm a případně vyřadit z hodnocení vlakové soupravy, které v místě měřicí sestavy zastavily.

11. Závěry a doporučení

V průběhu zpracování se ukázalo, že předpokladem pro dobré výsledné výstupy je velmi důležitý kvalitní vstupní signál. Takový signál byl měřen na konstrukcích s upevněním systému W14 od firmy Vossloh, zatímco na kolejovém svršku s upevněním typu Fastclip od společnosti Pandrol byl rozkmit pražce i mimo polohu železničního kola velmi výrazný a docházelo k překrytí poloh dvojkolí v signálu. Navrhované algoritmy pro tento typ konstrukce a měřené signály dynamické odezvy na těchto konstrukcích nebyly příliš vhodné a před dalším zpracováním je bylo nutno upravit. To do signálu s vyšší mírou chybovosti při zpracování vnášelo další chyby v podobě posunu snímané odezvy od pojezdu dvojkolí v rámci měřeného signálu. Poloha dvojkolí se v signálu mohla posunout v rozsahu průměrovacího okna při vstupní úpravě signálu, a to následně zkreslovalo výsledky a snižovalo úspěšnost určení typu železničního vozu a také bylo zdrojem chyb při určování typu vlakové soupravy.

Pro prvotní vyhodnocení dat z konstrukcí s upevněním Fastclip je doporučeno použít jiné vyhodnocovací algoritmy. Nadějnou metodou se zdá být kumulativní součet výchylek zrychlení, který není tolik citlivý na rozkmit a následný útlum signálu, ale je u něj nutná ještě následná úprava a srovnání s nulovou hodnotou osy y. Tato úprava byla v rámci práce zkoušena pomocí transformace Wavelet, ale nepodařilo se dohledat správný typ transformace Waveletu, kterým by došlo k vyrovnaní křivky do přijatelné podoby. Nicméně tato metoda v sobě skýtá jistý potenciál k dalšímu zkoumání.

Zpracování signálů dynamické odezvy z lokalit Doubravice nad Svitavou a Hranice na Moravě proběhlo bezproblémově a výsledky zpracování byly velmi dobré. Pro signály dynamické odezvy měřené na železničním svršku s upevněním Vossloh, konkrétně typ upevnění W14, jsou navržené algoritmy bezproblémové a vykazují ve všech úlohách velmi dobrou shodu s reálným stavem.

V úloze určení polohy dvojkolí jsou jednotlivá dvojkolí v měřeném signálu dynamické odezvy dle předložených metodik identifikována poměrně přesně s rozptylem v časové rovině průměrně $\pm 0,02$ s od reálné polohy dvojkolí. Problém s přesností v metrech závisí na přesnosti určení rychlosti pohybující se vlakové soupravy a následném přepočtu na délkovou míru.

Ohledně rychlosti lze konstatovat, že použití ručního rychloměru v kombinaci se signály s menší hodnotou šumu a rychlejšího útlumu vibrací pražce je plně použitelné. Nicméně je doporučeno přidávat do měřících sestav minimálně dvojici akcelerometrů, které budou zajišťovat kontrolní měření rychlosti. Doporučení je pro měřící aplikace, které nebudou realizovány dle předkládané metodiky. Aplikace prováděné v souladu s předkládanými metodikami s použitím minimálně dvou snímačů v řadě počítají. Určování rychlosti na základě dvou snímačů eliminuje chybu lidského faktoru a další výhodou je možnost ověření rychlosti i po skončení měření, což je současně jistou nevýhodou, že se rychlost na základě dvou snímačů vyhodnocuje ex-post a není známa v průběhu vlastního měření. Ovšem u většiny měření není okamžitá znalost rychlosti nutná.

Pro relevantní určení defektních železničních kol bylo třeba mít záznam dynamické odezvy z několika snímačů v řadě zas sebou, aby byl pokrytý obvod celého kola. Pokud je impaktní ráz vzdálen od místa snímání o více než jeden pražec v měřeném signálu dynamické odezvy se již neprojeví. V lokalitě Doubravice nad Svitavou byla defektní kola určena s vysokou mírou pravděpodobnosti (ovšem 100 % kontrolu stavu železničního dvojkolí lze provést pouze na specializovaných pracovištích). V lokalitě Hranice na Moravě byla defektní kola určována jen za základě průměrné výchylky zrychlení všech kol a kola s výchylkou výrazně větší byla považována za defektní. Tento postup však neodhalí defektní dvojkolí, které se v místě snímače zrychlení neprojeví.

Sledování působení defektních dvojkolí na rozpad GPK je další oblastí, kterou by bylo vhodné zkoumat podrobněji. Navržený systém autonomního měřicího modulu společně s navrženou metodikou měření dává k tomuto typu měření vhodné prostředky k realizaci.

Sledování stavu podbití je úlohou zaměřenou na hodnocení stavu vlastní železniční konstrukce. Stav konstrukce je hodnocen na základě změny tlumicích vlastností kolejového lože, která se projeví změnou velikosti výchylky zrychlení v kladných a záporných hodnotách. Tuto úlohu lze realizovat ve své podstatě bez znalosti přesné polohy dvojkolí. Vstupními daty je pouze velikost výchylek zrychlení pro stanovení vzájemného poměru. Tuto úlohu lze realizovat a vyhodnotit i pokud jsou do posouzení zařazena defektní kola, v tom případě ovšem nelze vycházet pro hodnocení stavu z navržené metodiky, ale výsledek určuje pouze trend vývoje. Pokud jsou kladné a záporné výchylky vzájemně vyrovnané a jejich poměr se pohybuje kolem hodnoty 1, pak je stav železniční konstrukce vyhovující. Pokud je poměr výchylek 1,1 a větší lze očekávat zhoršený stav železniční konstrukce.

Poslední úlohou bylo určení typu vlakové soupravy, která vychází z určení polohy železničních dvojkolí. U měření, kde byla dobrá vstupní data, bylo i určení polohy dvojkolí relativně přesné a určení jak typu železničního vozu, tak určení typu celé vlakové soupravy vykazovalo vysokou míru shody. Po zkušenostech s vyhodnocením dat je doporučeno vytvořit pro každé stanoviště soubor vzorových vozidel, která budou hodnocena. Sníží se tím náročnost hodnotícího procesu a také nebude docházet k chybám mylného určení vlakové soupravy, která daným traťovým úsekem ani neprojíždí. Snahou je ve vztahu k hodnocení železniční konstrukce vybírat a hodnotit pouze dynamickou odezvu od pojezdu osobních vlaků, proto je doporučeno zahrnout do vzorových vozů všechny vozy osobní, všechny osobní jednotky a všechny běžně provozované typy lokomotiv. Neidentifikované vozy pak budou s vysokou mírou pravděpodobnosti vozy nákladní a vlaková souprava s těmito neidentifikovanými vozy bude nákladní vlakovou soupravou.

Práce ověřila funkčnost navrženého měřicího systému i příslušných výpočetních algoritmů a tím je systém připraven k pilotnímu dlouhodobějšímu měření v reálných podmínkách.

12. Možnosti využití algoritmů a měřicího systému

Primárním cílem práce je vytvoření teoretického základu a vyhodnocovacích algoritmů pro autonomní měřicí modul, který by byl schopen zaznamenávat dynamickou odezvu na železniční konstrukci vyvolanou průjezdem železniční soupravy a následně ji vyhodnocovat. V rámci předkládané práce byly sestaveny výpočetní algoritmy, které mohou najít své uplatnění i samostatně.

12.1. Kontinuální měření stavu podbití

Autonomní měřicí systém je vyvíjen pro dlouhodobější sledování stavu železniční konstrukce. Systémy, které by dokázaly dlouhodobě sledovat dynamické účinky od pojezdu železničních vozidel u nás dosud provozovány nejsou, anebo jsou využívány jen omezeně ve velmi malé míře, což je škoda, protože ekonomika a efektivita správy železniční trati stojí v popředí zájmu všech správců tratí a takový systém by jim mohl výrazně pomoci.

Systém je možno využít kdekoliv na trati, zprvu lze očekávat nasazování spíše na problémových místech, například kde je okolí tratě silně podmáčeno a hrozí riziko rychlejší degradace trati. Zde se systém uplatní k průběžnému sledování stavu konstrukce, zda se nepříznivé okolní podmínky nepřenáší i do konstrukce železniční trati. Dále se může uplatnit v místech, kde měřicí vůz zjistí abnormalitu v podbití, a je žádoucí dané místo průběžně sledovat, zda a jak rychle se kvalita podbití mění a zda se jednalo pouze o nahodilý jev, nebo jestli rychlejší degradace kolejového lože pokračuje i po novém podbití. Za základě těchto informací lze následně hledat příčinu. Své opodstatnění si najde nasazení měřicího systému i na zkušebních úsecích při sledování chování nových konstrukcí.

Nezanedbatelným přínosem by mohlo být nasazení systému na lokálních tratích, kde jsou malé jízdní výkony a degradace trati je jen velmi pozvolná. Tento systém by mohl pomoci při optimalizaci údržby trati.

Využití systému je vskutku široké. Ostatně nemusí být umísťován jen na problematická místa, ale může sloužit i k měření běžných tratí bez zjevných abnormalit. To by přispělo k všeobecné znalosti působení železniční dopravy na železniční konstrukci v čase. A toto je těžiště navrhovaného systému – dlouhodobé sledování železniční trati.

12.2. Zjišťování rychlosti

Jedním z parametrů, který je třeba znát pro relevantní vyhodnocení dynamických účinků od pojezdu železniční soupravy je její rychlost. U měření, která jsou prováděna v souvislosti dynamickým buzením konstrukce je zaznamenávána rychlost průjezdu vlakové soupravy ručním radarem. Tento způsob zaznamenávání rychlosti je používán pouze v rámci měření s obsluhou pro jeho jednoduchost, ovšem pro autonomní měření se vůbec nehodí. Problém je, že měření dynamických účinků je prováděno leckdy pouze v jednom řezu konstrukce a není tudíž jiná možnost zjištění rychlosti, než je ruční radar.

Řešení je jednoduché a široce použitelné. Do měřicí aparatury se přidá k některému vybranému čidlu ještě jedno čidlo párové, které se osadí ve známé vzájemné vzdálenosti a rychlost je následně určována porovnáním záznamů z těchto dvou párových čidel. Z důvodu následného zpracování dat je doporučeno vybírat čidla umístěná na pražcích, protože měření

signál po průchodu konstrukcí kolejového roštu vykazuje již útlum amplitud a frekvencí zrychlení a je lépe čitelný. Postup je však univerzální a lze pracovat i s daty z kolejnicového pásu. Nutno však podotknout, že umístění čidel musí být v řadě, na jedné straně konstrukce, aby dynamické účinky vyvozovalo na obou čidlech jedno a totéž kolo dvojkolí.

Výhody tkví v tom, že pak měřicí sestava nepotřebuje k určení rychlosti přítomnost člověka. Snižuje se riziko chyby lidského faktoru, například že by některé z měření nebylo zaznamenáno, a dále lze ze záznamu poměrně přesně určit, zda daná vlaková souprava jela konstantní rychlostí nebo svou rychlost měnila (zrychlovala či zpomalovala).

12.3. Počítání náprav

Dalším užitečným nástrojem, který lze implementovat do dalších úloh je počítání jednotlivých náprav a dvojkolí. K tomuto algoritmu je zapotřebí znát rychlost jedoucí soupravy, protože vychází ze znalostí o velikosti železničních vozů a dále časový záznam signálu zrychlení převádí pomocí rychlosti na záznam v délkové míře (tj. že například u vlakové soupravy jedoucí rychlostí 85 km/h určí rozvor dvojkolí v podvozku délkou 2,5 m a nikoliv časem 0,1059 s záznamu).

Počet a poloha dvojkolí v hodnoceném záznamu je důležitá z pohledu následného vyhodnocení signálu, protože nám určuje okamžik maximálního zatížení konstrukce v místě a čase.

13. Seznamy

13.1. Bibliografie

- [1] NOHÁL, Viktor. Identifikace drážních vozidel na základě jejich dynamické odezvy v železniční konstrukci. In: JUNIORSTAV 2019. 31.1.2019. Brno: ECON publishing, 2019, s. 140-145. ISBN 978-80-86433-71-4.
- [2] SMUTNÝ, Jaroslav a Luboš PAZDERA. The using Wavelet transformation for acoustic response analysis. Akustika. České Budějovice: Studio D - akustika, 2014, 2014(VOLUME 21). ISSN 1801-9064.
- [3] KOVÁŘ, Ondřej. Využití dat ze sítě diagnostiky závad jedoucích železničních vozidel. In: Zabezpečovací a telekomunikační systémy na železnici: Aktuální vývoj zabezpečovací a telekomunikační techniky - "safety and security". Praha: Správa železniční dopravní cesty, 2017, s. 109-115. ISBN 978-80-905200-9-7.
- [4] KOVÁŘ, Ladislav, David KRÁSENSKÝ, Vlastimil POLACH a Zdeněk ZOUHAR. Diagnostika jedoucích železničních vozidel. In: Vědeckotechnický sborník ČD č. 37/2014. Praha: ČD, 2014, s. 1-18.
- [5] SOHRAB, Fahad. Railway vehicle detection from audio recording using one-class classification. Istanbul, Turecko, 2016. Master of Science degree. Sabanci university.
- [6] BATENKO, Anatoly, Alexander GRAKOVSKI, Igor KABASHKIN, Elmars PETERSONS a Yuri SIKERZHICKI. Weight-in-motion (WIM) measurements by fiber optic sensor: problems and solutions. Transport and Telecommunication. Litva, 2011, 2011(Vol. 12), 27-33.
- [7] TOMANDL, Vladimír. Experimentální analýza vybraných systémů kolejnicových upevnění. Brno, 2016. Disertační práce. Fakulta stavební, VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
- [8] BERLIN, Eugen a Kristof Van LEARHOVEN. Sensor networks for Railway monitoring: Detecting trains from their distributed vibration footprints. In: 2013 IEEE International conference on distributed computing in sensor systems. Cambridge, Massachusetts, USA: IEEE, 2013, s. 80-87. ISBN 978-0-7695-5041-1/13.
- [9] ZAHRADNÍK, Zdeněk. Diagnostika závad jedoucích vozidel. In: Železniční dopravní cesta 2010. Praha: Správa železniční dopravní cesty, 2010, s. 87-93. ISBN 978-80-254-6802-2.
- [10] Salient Systems. L.B. Foster: Salient Systems [online]. Dublin (Ohio, USA): L.B. Foster, 2018 [cit. 2018-10-12]. Dostupné z: <http://www.lbfoster-salientsystems.com/index.asp#mstto=>
- [11] Evropská komise. Bílá kniha. Plán jednotného evropského dopravního prostoru – vytvoření konkurenceschopného dopravního systému účinně využívajícího zdroje. Brusel. 28. březen 2011. 17 stran textu. 14 stran příloh.

- [12] Nařízení Komise (EU) č. 1304/2014, o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému „kolejová vozidla - hluk“, kterou se mění rozhodnutí 2008/232/ES a zrušuje rozhodnutí 2011/229/EU. 26. listopad 2014. 4 strany textu. 13 stran příloh.
- [13] Zákon č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů. 24. leden 1997.
- [14] Zákon č. 266/1994 Sb. Zákon o drahách, ve znění pozdějších předpisů. 30. prosince 1994
- [15] Nařízení vlády č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky, ve znění pozdějších předpisů. 6. březen 2002.
- [16] Vyhláška Ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb., kterou se vydává stavební a technický řád drah, ve znění pozdějších předpisů. 30. června 1995
- [17] Česká technická norma ČSN 73 6360-1. Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 1: Projektování. Prosinec 2020.
- [18] Česká technická norma ČSN 73 6360-2 vč. změny Z1. Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba. Říjen 2009.
- [19] České technické normy řady ČSN EN 13481. Železniční aplikace – Kolej – Požadavky na vlastnosti systémů upevnění.
- [20] České technické normy řady ČSN EN 13146. Železniční aplikace - Kolej – Metody zkoušení systémů upevnění.
- [21] České technické normy řady ČSN 72 1006 Kontrola zhutnění zemin a sypanin. Červen 2015
- [22] Předpis SŽDC S 3. Železniční svršek. Ve znění změn č. 1 - 4. Správa železnic, státní organizace. Praha. 2021.
- [23] Předpis SŽDC S 3/2. Bezstyková kolej. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2013.
- [24] Předpis SŽ S 4. Železniční spodek. Správa železnic, státní organizace. Praha. Leden 2021.
- [25] Předpis SŽDC S67 Vady a lomy kolejnic. Praha: Správa železniční dopravní cesty, s.o. 2017
- [26] Směrnice SŽDC č. 67. Č. j. S 35410/11 – OTH. Systém péče o kvalitu v oblasti traťového hospodářství. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. Srpen 2011.
- [27] Předpis SŽDC Bp1. Předpis o bezpečnosti a ochraně zdraví při práci. Ve znění změny č. 1. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. Říjen 2017
- [28] Služební rukověť SŽDC SR 103/4. Využívání měřicích vozů pro železniční svršek s kontinuálním měřením tratě pod zatížením. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. 2010.

- [29] Směrnice GŘ č. 16/2005. Č. j. 3790/05-OP. Zásady modernizace a optimalizace vybrané železniční sítě České republiky. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. Leden 2006.
- [30] Směrnice GŘ č. 28/2005. Č. j. 6 037/05-OP. Koncepce používání jednotlivých tvarů kolejnic a typů upevnění v kolejích železničních drah ve vlastnictví České republiky. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace. Praha. Březen 2006.
- [31] TIMOŠENKO, S. P. Method of Analysis Statistical and Dynamical Stresses in Rails. Second International Congress of Applied Mechanics. Curych. 1927. 14 stran.
- [32] PLÁŠEK O., ZVĚŘINA P., SVOBODA R., MOCKOVČIAK M.: Železniční stavby – železniční svršek a spodek. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno. 2004. 291 stran. ISBN 80-214-2621-7.
- [33] IŽVOLT L.: Železničný spodok. Namáhanie, diagnostika, navrhovanie a realizácia konštrukčných vrstiev tělesa železničního spodku. Žilinská univerzita. Žilina. 2008. 324 stran. ISBN 978-80-8070-802-3.
- [34] SMUTNÝ J., PAZDERA L.: The experimental analysis of dynamic processes related to railway transport. Akademické nakladatelství CERM. Brno. 2012. ISBN 978-80-7204-827-4.
- [35] ARRAIGADA M., PARTL M.: Calculation of Displacements of Measured Accelerations, Analysis of Two Accelerometers and Application in Road Engineering. 6th Swiss Transport Research Conference. Monte Verità – Ascona. 15. – 17. března 2006. 31 stran.
- [36] PUZAVAC L., POPOVIĆ Z., LAZAREVIĆ L.: Influence of Track Stiffness on Track Behaviour Under Vertical Load. Promet – Traffic & Transportation. 2012. Roč. 24. Čís. 5. 8 stran.
- [37] AUTORSKÝ KOLEKTIV BRÜEL & KJÆR: Měření chvění. Nové vydání, 1984. <<http://www.spectris.cz/sv/literatura.html>>.
- [38] VUKUŠIČ I.: Analýza dynamických účinků ve výhybkách. Dizertační práce. VUT v Brně. 2015. 157 stran. 280 stran příloh.
- [39] PLÁŠEK O., SMUTNÝ J., SVOBODA R., HRUZÍKOVÁ M.: Analýza tuhosti kolejové jízdní dráhy při dynamickém zatížení. Nová železniční technika 6/2007. KPM CONSULT, a.s. Brno. 2007. 6 stran. ISSN 1210-3942.
- [40] ADAMEK R.: Podložky pod ložnou plochou pražce a jejich pozitivní vliv na geometrickou polohu koleje. Vědeckotechnický sborník ČD č. 21/2006. Praha: GŘ ČD, 2006. ISSN 1214-9047.
- [41] POHL J., MICHÁLEK T.: Provoz nákladních vlaků délky 740 m, díl I. Vědeckotechnický sborník ČD č. 46/2018. Praha: GŘ ČD, 2018. ISSN 1214-9047.
- [42] POHL J., MICHÁLEK T.: Provoz nákladních vlaků délky 740 m, díl II., Vědeckotechnický sborník Správy železnic č. 6/2022, Praha: Správa železnic, 2022. ISSN 2694-9172
- [43] ČSN EN 15313:2017. Železniční aplikace – Požadavky na dvojkolí v provozu – Údržba dvojkolí v provozu na vozidlech a po demontáži. Praha: ÚNMZ, 2017.

- [44] KOHOUT M., ZELENKA J., ŠIMRAL P.: Změny parametrů dvojkolí lokomotiv v provozu s ohledem na vazbu dvojkolí–kolej. In: Současné problémy v kolejových vozidlech 2017: XXIII. konference s mezinárodní účastí, Sborník příspěvků, s. 189–193. Pardubice: Univerzita Pardubice, Doprávní fakulta Jana Pernera, 2017. ISBN 978-80-7560-085-1.
- [45] NOVÝ R.: Hluk a chvění. Vydavatelství ČVUT. Praha. 2000. 389 stran. ISBN 80-01-02246-3.
- [46] Lin, Chih Jen, Chih-Wei Hsu, a Chih-Chung Chang. A practical guide to support vector classification [online]. 2003 [cit. 2015-03-29]. Dostupné z: <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/guide/guide.pdf>
- [47] BURGESS, Christopher J. C. A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [48] Masarykova univerzita: Studijní materiály předmětu FI:PA034 [online]. 2006, 14.11.2010 [cit. 2014-11-17]. Support vector machines. Dostupné z WWW: http://is.muni.cz/el/1433/podzim2006/PA034/09_SVM.pdf?fakulta=1433;obdobi=3523;kod=PA034
- [49] MARUNA Z.: Základy pohybu po koleji, Scientific papers of the University of Pardubice, 1996, str. 23 – 38.
- [50] JANOŠTÍK D., NOHÁL V., SMUTNÝ J.: Monitorování výhybek autonomním dataloggerem. Nová železniční technika 5/2020
- [51] HLAVÁČEK J.: Protihluková a protivibrační opatření používaná v evropské železniční síti. Vědeckotechnický sborník Českých drah: 6/1998. 5 stran. ISSN 1214-9047.
- [52] KOHOUT M.: Výzkum kontaktní geometrie dvojkolí-kolej při průjezdu vozidel oblouky malých poloměrů. Disertační práce. Univerzita Pardubice, 2009

13.2. Internetové zdroje

- [53] <http://www.spravazeleznice.cz>
- [54] <https://www.cd.cz/>
- [55] <https://cs.wikipedia.org>
- [56] <http://www.vagony.cz/>
- [57] <http://www.parostroj.net/>
- [58] <http://www.atlaslokomotiv.net>
- [59] <https://www.cdcargo.cz/>
- [60] <https://www.atlasvozu.cz/>
- [61] <https://www.zelpage.cz/>
- [62] <https://www.openstreetmap.org/>
- [63] <https://www.mapy.cz/>

13.3. Obrázky

Obrázek 1- SB datalogger, foto: prof. Ing. J. Smutný

Obrázek 2 - Mašíkův plíšek, zdroj: www.spravazeleznice.cz

Obrázek 3 - Tranzitní železniční koridory, zdroj: www.spravazeleznice.cz

Obrázek 4 - Upevnění W14, zdroj: [22]

Obrázek 5 - Upevnění Fastclip, zdroj: [22]

Obrázek 6 - Svěrky T6, T5, ŽS4 a R1, zdroj: [32]

Obrázek 7 - Pražec SB2, zdroj: [32]

Obrázek 8 - Pražec B 91 S, zdroj: [32]

Obrázek 9 - Šroubovka, zdroj: www.msvmetal.cz

Obrázek 10 - Automatické spřáhlo SA3, zdroj: cs.wikipedia.org

Obrázek 11 - Rámový pojezd UIC517, zdroj: www.vagony.cz

Obrázek 12 - Podvozek 26.2.8, zdroj: www.vagony.cz

Obrázek 13 – Lokomotiva E109, zdroj: www.zelpage.cz, Mgr. J. Charvát

Obrázek 14 – Lokomotiva Siemens 193 Vectron, zdroj: www.cdcargo.cz

Obrázek 15 – Lokomotiva 754 „Brejlovec“, zdroj: cs.wikipedia.org, Harold

Obrázek 16 - Automatické spřáhlo Scharfenberg, zdroj: www.zdopravy.cz

Obrázek 17 - Nákladní vagón typu Es, zdroj: www.cdcargo.cz

Obrázek 18 - Nákladní vagón typu Eanos, zdroj: www.cdcargo.cz

Obrázek 19 - Rozkolí, zdroj: [49]

Obrázek 20 - Grafické znázornění definic veličin konstrukčního a geometrického uspořádání koleje, zdroj: [17]

Obrázek 21 - Kontaktní a skluzový poměry nabíhajícího kola, zdroj: [52]

Obrázek 22 - Skluzová rychlost v podélném směru, zdroj: [52]

Obrázek 23 - Určení prvotní rychlosti, zdroj: autor

Obrázek 24 - Podvozkové skupiny reprezentované plovoucí sumou výchylek,

Obrázek 25 - Vzájemný vztah zrychlení, rychlosti a výchylky, zdroj: autor

Obrázek 26 – Optimální nadrovinna, zdroj: cs.wikipedia.org

Obrázek 27 - Měřicí stanoviště, zdroj: autor

Obrázek 28 - Snímač posunu, zdroj: autor

Obrázek 29 - Osazení snímačů zrychlení, zdroj: autor

Obrázek 30 - Schéma měření v lokalitách Hranice na Moravě a Napajedla, zdroj: [7]

13.4. Tabulky

Tabulka 1- Minimální požadované hodnoty modulu přetvárnosti, zdroj: [24]

Tabulka 2 - Mechanické impedance materiálů používaných v železničních konstrukcích, zdroj:[45]

Tabulka 3 - Zaznamenané vlaky, Doubravice n S., červen

Tabulka 4 - Zaznamenané vlaky, Doubravice n S., srpen

Tabulka 5 - Zaznamenané vlaky, Hranice n M.

Tabulka 6 - Zaznamenané vlaky, Napajedla

Tabulka 7 - Poměry měřené a vypočtené rychlosti, Doubravice n S., červen

Tabulka 8 - Poměry měřené a vypočtené rychlosti, Doubravice n S., srpen

Tabulka 9 - Polohy dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Doubravice n S., červen

Tabulka 10 - Polohy dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Doubravice n S., srpen

Tabulka 11 - Polohy dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Hranice n M.

Tabulka 12 - Polohy dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Napajedla

Tabulka 13 - Vyhodnocení stavu dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Doubravice n S., červen

Tabulka 14 - Vyhodnocení stavu dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Doubravice n S., srpen

Tabulka 15 - Vyhodnocení stavu dvojkolí vybrané vlakové soupravy, Hranice n M.

Tabulka 16 - Vyhodnocení stavu podbití, Doubravice n S., červen

Tabulka 17 - Vyhodnocení stavu podbití, Doubravice n S., srpen

Tabulka 18 - Vyhodnocení stavu podbití, Hranice n M.

Tabulka 19 - Vyhodnocení stavu podbití, Napajedla

Tabulka 20 - Parametry železničních vozů

Tabulka 21 - Určení shody parametrů železničních vozů, Doubravice n S., červen

Tabulka 22 - Určení skladby vlakové soupravy, Doubravice n S., červen

Tabulka 23 - Určení shody parametrů železničních vozů, Doubravice n S., srpen

Tabulka 24 - Určení skladby vlakové soupravy, Doubravice n S., srpen

Tabulka 25 - Určení shody parametrů železničních vozů, Hranice n M.

Tabulka 26 - Určení skladby vlakové soupravy, Hranice n M.

13.5. Zkratky a symboly

<i>zkratka</i>	<i>popis</i>
3D	trojrozměrný (three-dimensional)
CIM	vážení souprav za jízdy (Coupled in motion)
GPK	geometrické parametry koleje
IHL	indikátor horkoběžnosti ložisek
IHO	indikátor horkých brzd a obručí
IPK	indikátor plochých kol
LoRa	obchodní značka řešení pro bezdrátový přenos dat
SB-datalogger	název/označení zařízení (super bank - zápisník)
SQL	databázová struktura (Structured Query Language)
SVM	metoda pomocných vektorů (support machine vector)
VUT	Vysoké učení technické
WIM	vážení vozů za jízdy (weight in motion)
WMP-modul modulu	bezdrátový měřicí bod – modul (wireless measurement point), název modulu