

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2026

Šárka Moravcová



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VIBRODIAGNOSTIKA PODVOZKU LOKOMOTIVY

VIBRODIAGNOSIS OF THE LOCOMOTIVE BOGGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Šárka Moravcová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.

BRNO 2026

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Studentka: **Šárka Moravcová**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.**
Akademický rok: 2025/26

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vibrodiagnostika podvozku lokomotivy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Firma CZ LOKO a.s. je český výrobce diesel–elektrických lokomotiv a speciálních drážních vozidel. Lokomotivy vyrábí, modernizuje i opravuje. Firma disponuje zkušebním stendem pro testování podvozků lokomotiv, na kterém je podvozek doplněn o řadu teplotních senzorů a snímačů vibroakustické emise. Motivací bakalářské práce je snaha o doplnění současného diagnostického výstupu testu o hlubší analýzu naměřeného signálu vibroakustické emise. K dispozici jsou jednak naměřená data společně s diagnózou již ukončených testů, i možnost naměřit data nová.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je objasnit vztah mezi analýzou vibroakustické emise a skutečným technickým stavem podvozku. Výstupem bude soubor postupů, který analytickými metodami zvýší diagnostickou hloubku lokalizace závad podvozku.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popsat dynamickou strukturu testovaného podvozku,
- prezentovat měřicí řetězec používaný ve firmě CZ LOKO a jeho výstupy,
- navrhnout systém analýz vhodných pro vyhodnocení vibrační i akustické emise,
- stanovit a ověřit vztah mezi výsledkem provedeným analýz a technickým stavem.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD, 2006. Technická diagnostika. Praha: BEN. ISBN 80-7300-158-6.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed., 2010. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUT IUM. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

LATA, Michael, 2004. Konstrukce kolejových vozidel II. Pardubice: Univerzita Pardubice. ISBN 80-719-4696-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřená na návrh měřicího řetězce a metodiky pro analýzu průběhu vibrací na podvozcích lokomotiv CZ LOKO. Rešerše je zaměřená na vibrodiagnostiku, sběr dat a jejich analýzu, pro kterou je nutný popis konstrukce jednotlivých typů podvozků. Cílem práce je upřesnit lokalizaci závad podvozků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vibrodiagnostika, řádová analýza, doběhová zkouška, podvozek lokomotivy

ABSTRACT

The bachelor's thesis focuses on the design of a measurement chain and methodology for analyzing the vibration behavior of CZ LOKO locomotive bogies. The research is centered on vibration diagnostics, data acquisition, and data analysis, which requires a description of the construction of various bogie types. The aim of the thesis is to improve the localization of faults in the bogies.

KEYWORDS

Vibration diagnostics, order analysis, coast-down test, bogie

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MORAVCOVÁ, Šárka. *Vibrodiagnostika podvozku lokomotiv*. Brno, 2026, 99 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

V první řadě bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ivanu Mazůrkovi za ochotu, cenné rady a trpělivost. Velké poděkování patří také firmě CZ LOKO za možnost spolupráce na této práci, za poskytnutí prostorů pro zkušebny pro zaznamenávání dat, podkladů a podporu během zpracování tématu.

Velmi si vážím pomoci a podpory, které se mi dostalo také od kolegů a techniků ve firmě, jejichž zkušenosti výrazně přispěly k pochopení problematiky. Zvláštní poděkování si zaslouží Ing. Radek Holubář, bez jehož přístupu bych se k tématu technické diagnostiky pravděpodobně nikdy nedostala. Děkuji také Ing. Lukáši Hauptovi, který mi věnoval čas a ochotně zodpovídal mé dotazy. V neposlední řadě patří mé poděkování Adamu Bezdíčkovi, jenž se staral o spouštění měření v době mé nepřítomnosti.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Ivana Mazúrka. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	11
2.1	Vibrodiagnostika v průmyslu	11
2.1.1	Druhy snímačů	11
2.1.2	Způsoby uchycení snímačů	13
2.1.3	Měřicí zařízení	14
2.1.4	Vyhodnocení měření vibrací	14
2.1.5	Diagnostické postupy	18
2.2	Popis konstrukce podvozků CZ LOKO	21
2.2.1	Tlapové uložení trakčního motoru	21
2.2.2	Podvozek ČKD typu „H“	23
2.2.3	Podvozek řady 744.1	24
2.2.4	Třínápravový podvozek	25
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE	26
3.1	Záběh podvozku CZ LOKO	26
3.2	Vybavení zkušebny CZ LOKO	27
3.2.1	Snímače otáček	27
3.2.2	Snímače teploty	27
3.2.3	Snímače vibrací	28
3.2.4	Proudy odebírané trakčními motory	28
3.2.5	Mikrofon	28
3.2.6	Vyhodnocení technického stavu podvozku	28
3.3	Zhodnocení rešerše	30
3.3.1	Omezení a nevýhody stávajících postupů	30
3.4	Cíle práce	31
4	MATERIÁL A METODY	32
4.1	Výpočet základních kinematických frekvencí	32
4.2	Měřicí řetězec	33
4.2.1	Požadavky	33
4.2.2	Návrh měřicího systému	33
4.3	Průběh měření	37

4.4	Elektromagnetické rušení	37
4.5	Metodika vyhodnocení testů	40
4.5.1	Spektrum rezonančního pozadí	40
4.5.2	Doběhová zkouška	41
4.5.3	Řádová analýza	42
4.5.4	Řádová analýza doběhu	43
4.6	Shrnutí	43
5	VÝSLEDKY	45
5.1	Podvozky ČKD	50
5.1.1	Špatné uložení pastorku	50
5.1.2	Uložení dvojkolí	51
5.1.3	Porucha vnějšího kroužku ložisek trakčních motorů	51
5.1.4	Závady ozubených převodů	53
5.2	Pojezd lokomotivy řady 794.0	Chyba! Záložka není definována.
5.3	Podvozky řady 744.1	55
5.4	Třínápravový podvozek	58
6	DISKUZE	59
6.1	Shrnutí výsledků měření	59
6.2	Výzkumné otázky a hypotézy	59
6.3	Odhalení závady během záběhu	60
6.4	Diskuze se zaměstnanci CZ LOKO	62
7	ZÁVĚR	63
7.1	Doporučení pro CZ LOKO	64
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	66
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	68
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	69
11	SEZNAM TABULEK	72
12	SEZNAM PŘÍLOH	73

1 ÚVOD

Diagnostika technického stavu strojních součástí je klíčovým prvkem opravárenského průmyslu. V oblasti kolejových vozidel má včasná identifikace závady významnou roli, selhání komponent může mít zásadní vliv na bezpečnost.

Společnost CZ LOKO, zajišťující výrobu, modernizace a servisní služby diesel-elektrických lokomotiv. Dlouhodobě využívá zkušební stand pro záběh pohonů, včetně ozubených převodů. V rámci zkoušky jsou podvozky osazeny systémem snímačů teploty, otáček, vibrací a hluku. Současné vyhodnocení naměřených dat nezahrnuje hlubší analýzu, která by umožnila přesnou lokalizaci a predikci závad.

Cílem této práce je zhodnotit současný stav zkušebny podvozků firmy se zaměřením na stávající měřicí řetězec a jeho rozšíření o pokročilejší analytické přístupy. Dle zjištěného stavu navrhnout úpravy měřicího řetězce, který propojí výsledky analýzy s reálným technickým stavem.

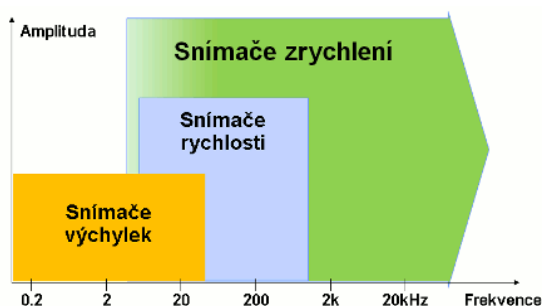
V rámci práce bude nejprve popsána konstrukce, dynamické vlastnosti testovaného podvozků a stávající měřicí systém včetně způsobu vyhodnocení. Následně budou navrženy a aplikovány vhodné analytické metody pro zpracování vibrací. Výsledkem bude ověření schopnosti těchto metod identifikovat technický stav součástí podvozků na základě měřeného signálu. Práce bude zakončena návrhem metodického postupu využitelného v rámci firemní diagnostiky. Součástí práce jsou protokoly z měření a výpočty základních kinematických frekvencí.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Tato kapitola se věnuje diagnostickým algoritmům využívaným pro analýzu technického stavu mechanických systémů, s primárním zaměřením na metody měření a vyhodnocení vibrací.

2.1 Vibrodiagnostika v průmyslu

Vibrodiagnostika kombinuje měření různými druhy snímačů (akcelerometrů, snímačů rychlosti nebo výchylky) s analytickými metodami, které umožňují přesnou detekci a klasifikaci poruch. Měření probíhá většinou ve třech osách (horizontální, vertikální, axiální) na kritických bodech, jako jsou ložiskové jednotky nebo zákryty ozubených převodů.



Obr. 1: Optimální rozsahy vibračních veličin [1]

2.1.1 Druhy snímačů

Snímače vibrací lze rozdělit do několika kategorií nejen podle měřené veličiny (zrychlení, rychlost, výchylka), ale také podle typu výstupní hodnoty – efektivní (RMS) nebo absolutní (peak, DC).

Snímače efektivní hodnoty (RMS) mají zabudovaný obvod pro výpočet RMS. Poskytují údaje o celkové energii vibrací, proto jsou vhodné pro dlouhodobé monitorování strojů s plynulým provozem. Při použití těchto snímačů ztrácíme informace o okamžitých špičkách, z tohoto důvodu nejsou vhodné pro diagnostiku.

Snímače absolutní hodnoty měří okamžité maximální hodnoty (peak) nebo statické zrychlení (DC). Detekují náhlé nárazy nebo přetížení. Jsou citlivé na elektromagnetický šum a krátkodobé interference. Využívají se pro diagnostiku technického stavu a testy nárazové odolnosti.

Akcelerometry

Používají se pro frekvenční analýzu vibrací. Vibrace zaznamenávají jako zrychlení v mm/s^2 a následně ho převádí na elektrický signál. Zaznamenaná data je možné dále integrovat na rychlost nebo výchylku. Frekvenční rozsah závisí na konkrétním modelu, obecně se pohybuje od jednotek Hz po desítky kHz. Snímače zrychlení jsou citlivé na teplotní výkyvy, ale za stálých neměnných podmínek jsou velmi přesné.

- Piezoelektrické akcelerometry: Převádí mechanickou energii, která vzniká deformací krystalu, na elektrický signál. Jejich frekvenční rozsah typicky pokrývá hodnoty od 0,5 Hz po 10 kHz. Mezi jejich přednosti patří vysoká přesnost a stabilita i při teplotních změnách, ale neumožňují měřit konstantní (DC) zrychlení. Uplatnění nachází např. ve vysokofrekvenční analýze ložisek.
- Kapacitní akcelerometry: Obsahují pohyblivou elektrodu, jejíž posuv vůči pevné elektrodě mění kapacitu. Tato změna se převádí na signál pomocí můstkových obvodů. Frekvenční rozsah se pohybuje od 0 Hz po 2 kHz. Mohou měřit i statické zrychlení. Jsou citlivé na elektromagnetické rušení. Využití nachází převážně v nízkofrekvenčních aplikacích a diagnostice pomalu rotujících strojů.
- MEMS akcelerometry: Vyrábějí se fotolitografickými procesy na křemíkových waferech. Mikrostruktury detekují zrychlení změnou kapacity nebo odporu. Frekvenční rozsah se pohybuje od 0 Hz po 5 kHz. Výhodou těchto snímačů je nízké cena. Mají nižší odolnost vůči nárazům.

Snímače rychlosti

Měření rychlosti vibrací je založeno na základě elektromagnetické indukce nebo Dopplerova jevu. Jsou vhodné pro měření ve středním frekvenčním pásmu do 1000 Hz. Funkci zachovávají při teplotách od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ po $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Používají se pro diagnostiku velkých přístrojů (generátorů, turbín, čerpadel či kompresorů). Jsou vhodné pro „monitoring“ opotřebení. Výstupní hodnotou je rychlost v jednotkách mm/s . Naměřené hodnoty je možné dále integrovat.

- Indukční snímače: Skládají se ze dvou základních komponent, permanentního magnetu a cívky. Pokud se magnet vůči cívice pohybuje, indukuje se v cívice napětí úměrné rychlosti. Frekvenční rozsah je v rozmezí 0-1000 Hz. Využívají se pro monitoring středně rychlých strojů, např. čerpadel a ventilátorů.
- Laserové snímače: Využívají bezkontaktní metody založené na Dopplerově jevu. Při změně frekvence odraženého laserového paprsku se kalkuluje rychlost signálu. Jsou bezkontaktní a velmi přesné. Mezi nevýhody patří vysoká cena a náročná kalibrace.

Snímače výchylky

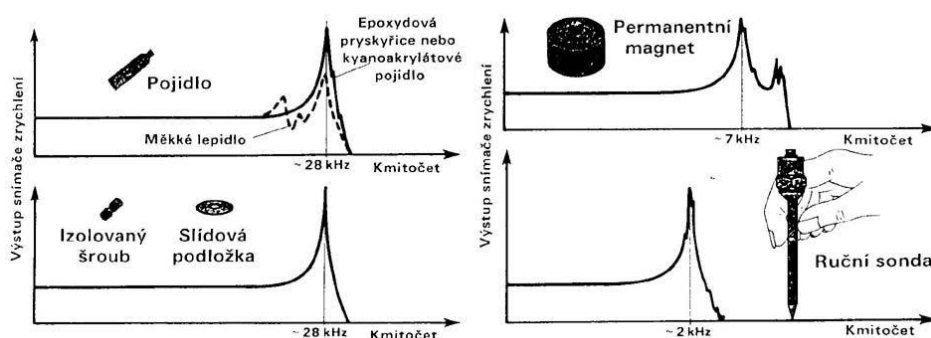
Detekují posuv nebo deformaci komponent pomocí kapacitního principu nebo vířivých proudů. Využití nachází v nízkofrekvenční diagnostice a analýze posunů (do 10 mm). Využívají se případech, kdy je nutné sledovat pomalé změny v dynamickém chování součástí. Jsou ideální pro sledování stavebních konstrukcí, či základů strojů. Mají omezené frekvenční spektrum (hodnoty do 500 Hz).

- Odporové snímače: Funguje na principu změny elektrického odporu, která je způsobena pohybem jezdce po odporové dráze. [2]
- Kapacitní snímače: Skládají se ze dvou paralelních desek, pokud se desky k sobě přiblíží, tak se změní kapacita. Tato změna je úměrná velikosti výchylky kmitů. Frekvenční rozsah je v rozmezí 0-500 Hz. Jsou velmi přesné, citlivé na čistotu prostředí (vlhkost, prašnost).
- Vířivoproudé snímače: Detekují změny vzdálenosti díky změnám ve vysokofrekvenčním poli generovaném cívkou. Pro každý materiál na stroji je nutná kalibrace.

2.1.2 Způsoby uchycení snímačů

Správná montáž snímačů má zásadní vliv na přesnost měření. Nejlepší přenos signálu poskytuje pevné šroubové uchycení. Lepení snímačů je méně invazivní metodou, avšak nemusí být vhodné pro všechny aplikace. Magnetické uchycení sice umožňuje flexibilní použití, ale snižuje maximální měřitelný frekvenční rozsah (obvykle do 7 kHz).

Dalším faktorem ovlivňujícím kvalitu měření je povrchová úprava měřených komponent. Pro minimalizaci zkreslení by měl být snímač připevněn na rovný, čistý a nelakovaný povrch.



Obr. 2: Závislost měřené veličiny na způsobu uchycení snímače [3]

2.1.3 Měřicí zařízení

Pro analýzu vibrací v průmyslových aplikacích, jako je diagnostika podvozků lokomotiv, je klíčové vybrat vhodné měřicí systémy. Následující přehled zahrnuje komerčně dostupné řešení:

Multifunkční měřicí karty

Multifunkční měřicí karty DAQ (Data Acquisition Cards) jsou kompaktní zařízení pro sběr analogových a digitálních signálů. Slouží jako rozhraní mezi senzory a počítačem, který data vizualizuje a zpracovává pomocí různých softwarů.

Pro výběr karty jsou důležitými parametry počty analogových vstupů (AI) a výstupů (AQ), počet digitálních vstupů I/O, rozlišení daných kanálů, vzorkovací frekvence a rozhraní.

Výhodou je univerzálnost, nahrazuje více zařízení, např. oscilátor, multimetr, generátor signálů. Jsou kompatibilní s širokou škálou softwarů, jako je LabVIEW, MATLAB, Python, starší verze DeweSoft atd. Vyžadují nižší náklady než samostatné měřicí zařízení.

Mají omezený výkon, využívají se pro nižší a střední frekvenční aplikace (do 1 MHz). Musí být připojeny k PC. Analogové výstupy vyžadují stínění kabeláže.

Mezi nejvyžívanější měřicí karty patří přístroje od LabJack a National Instrument.

Samostatná měřicí zařízení

Samostatná měřicí zařízení jsou specializované pro konkrétní typy měření (např. vibrodiagnostika, termografie, elektrické testování). Na rozdíl od multifunkčních karet nevyžadují připojení k počítači. Mají vlastní display, ovládací prvky a vestavěné analytické funkce. Jsou ideální pro aplikace, kde je kladen důraz na přesnost, nezávislost a odolnost. Ideální pro mobilní jednorázová měření.

Mají vysokou přesnost. Průmyslové provedení s vysokou odolností, IP67. Vysoká pořizovací cena.

2.1.4 Vyhodnocení měření vibrací

Pro analýzu vibračních signálů se používají následující metody, z nichž každá má specifické algoritmy, výhody a omezení.

Statistická analýza dat

Jedná se o metodu, která kvantifikuje vibrace pomocí statických parametrů, jako je RMS (Root Mean Square), peak nebo špičatost signálu.

Výpočet RMS:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

Je nutné dlouhodobé sledování trendů, měření a ukládání RMS hodnot. Dlouhodobým měřením je možné zachytit změny v chování stroje (zhoršení jeho stavu).

Frekvenční analýza (FFT)

Pro zpracování vibračních signálů se standardně používá Fourierova transformace (FFT). Tato metoda převádí časový průběh signálu na frekvenční spektrum, což usnadňuje identifikaci dominantních kmitočtů a jejich příčin.

Tato metoda umožňuje identifikaci mnoha závad, např. nevyváženost, nesouosost, rezonance. Má široké využití, je univerzální. Spektra FFT jsou vizuálně přehledná. Nevýhodou je nízké rozlišení u krátkých signálů, neschopnost analyzovat nestacionární jevy.

Řádová analýza

Řádová analýza (Order Analysis) je metoda zpracování vibračních signálů používaná pro diagnostiku rotačních strojů, u nichž se otáčky mění (např. během rozjezdu, zastavení nebo provozu s proměnnou rychlostí). Cílem je transformovat frekvenční spektrum vibrací do tzv. řádové domény, kde jednotlivé složky odpovídají harmonickým násobkům otáček (řádům), nikoli absolutním frekvencím. Tím se eliminuje vliv změny rychlosti na interpretaci dat.

Výpočet řádu, který udává poměr mezi frekvencí vibrací a základní otáčkovou frekvencí (RPM). Pro výpočet řádu se používá otáčková frekvence komponenty s nejnižším otáčením.

$$\text{Řád} = \frac{\text{Frekvence vibrací [Hz]}}{\text{Základní otáčková frekvence [Hz]}}$$

Řádová analýza je klíčová pro stroje s proměnnými otáčkami. Kombinuje se často s analýzou obálek nebo waveletovou transformací pro komplexní diagnostiku. V porovnání s FFT řádová analýza eliminuje šum spektra (smearing) při proměnných otáčkách.

Analýza obálek

Princip této metody spočívá v demodulaci vysokofrekvenčního signálu za účelem extrakce nízkofrekvenčních obálkových komponent, které odpovídají periodickým defektům. Pásmovou filtrací signálu izolujeme frekvence, které nesou informaci o závadě. Signál se usměrní a vyfiltruje dolní propustí pro získání obálky. Poté se obálka spektrálně zanalyzuje (identifikují se charakteristické frekvence). Využívá se pro detekci periodických defektů (mikrotrhliny ložisek, opotřebení ozubených převodů).

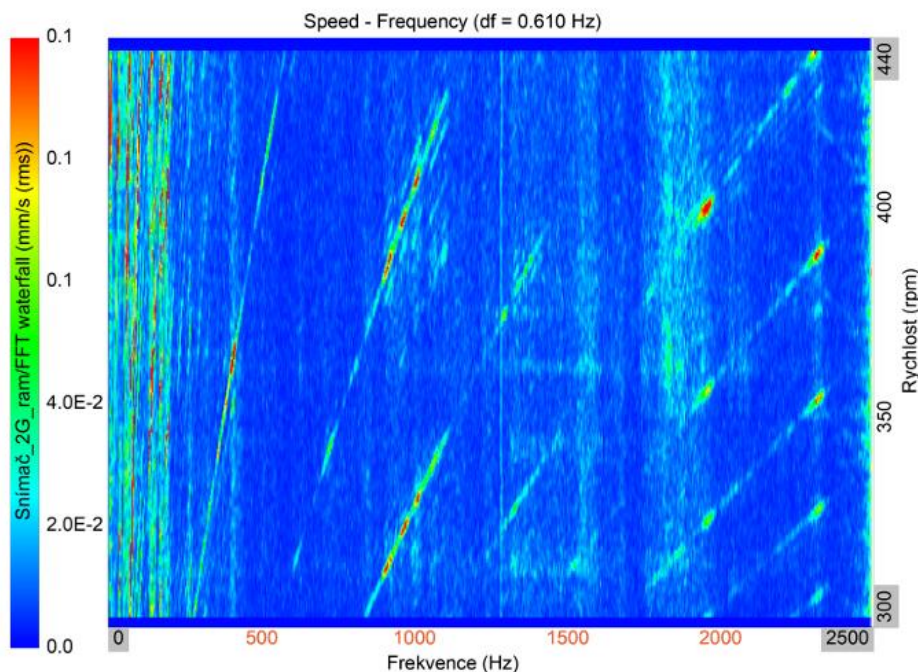
Diagnostika doběhové – rozběhové zkoušky

Doběhová zkouška patří mezi efektivní metody detekce vlastních frekvencí a poruch rotačních strojů. Princip spočívá v analýze vibrací během volného zrychlování nebo zpomalování. Tento přístup umožňuje oddělit mechanické rezonance od kinetických složek. Metoda se využívá v průmyslové praxi i akademickém výzkumu.

Při poklesu otáček dochází k oddělení kinematických složek (mění se s rychlostí) a mechanických rezonancí (nemění se). V okamžiku vypnutí motoru dochází k eliminaci elektromagnetického rušení, čímž se získávají nezkreslená diagnostická data.

Multispektrální analýza

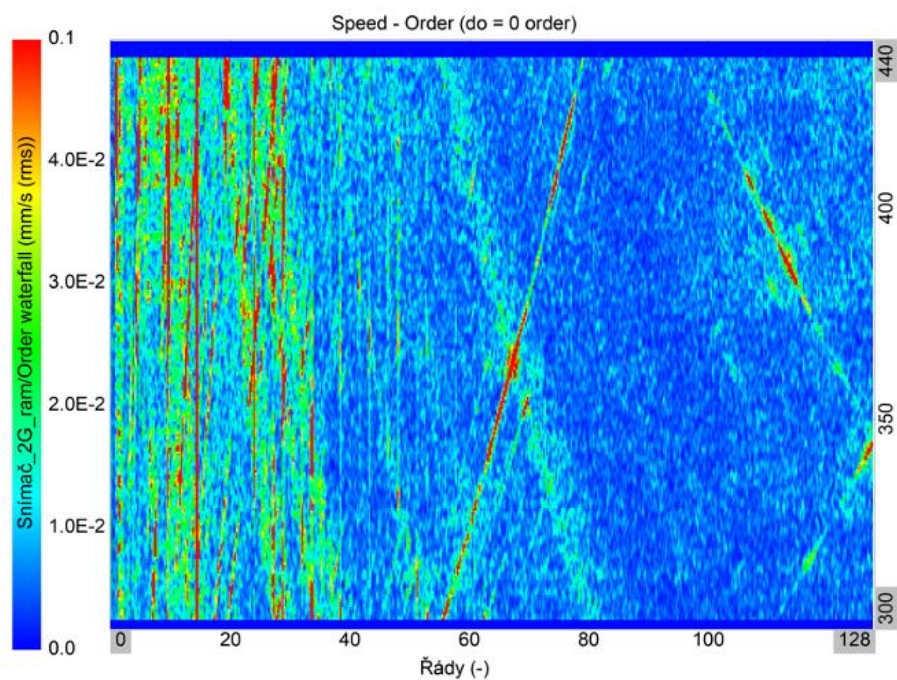
Multispektrum je graf, na kterém je zobrazeno časově proměnlivé frekvenční spektrum. Používá se pro přechodové jevy nebo nelineární soustavy. Na základě multispektra je možné rozlišit kinetické frekvence (v grafu rovnoběžně s osou otáček) od rezonancí (šikmé pásy).



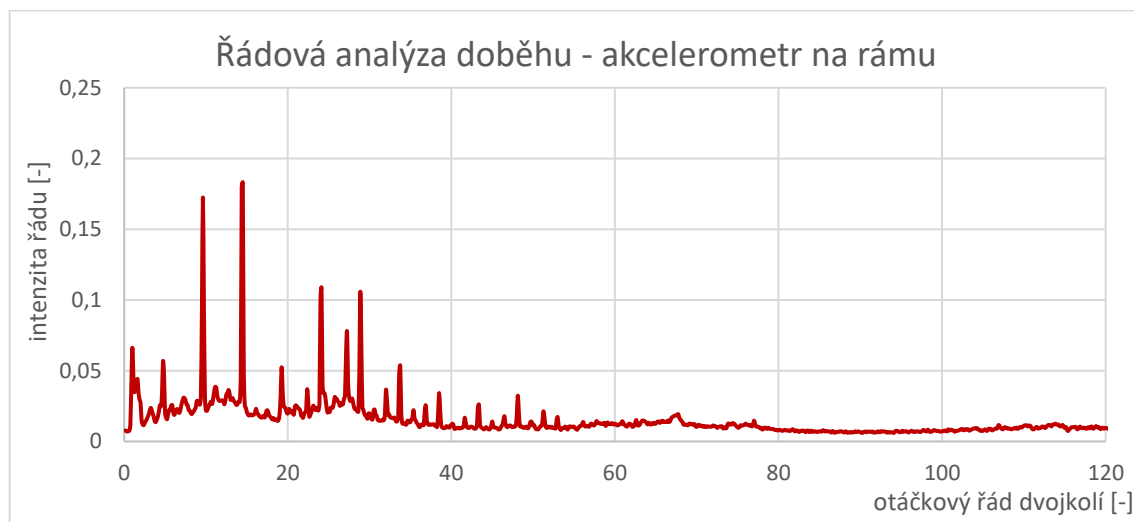
Obr. 3: Frekvenční multispektrum doběhové zkoušky podvozku H1

Řádová analýza

Převádí spektrum na škálu řádů (násobky základní otáčkové frekvence). Eliminuje vliv závad na frekvenční složky. Kinematické frekvence jsou zobrazeny jako vodorovné přímky. Rezonance se jeví jako šikmé křivky.



Obr. 4: Řádové multispektrum doběhové zkoušky podvozku H1



Obr. 5: Graf řádové analýzy doběhové zkoušky podvozku H1, součást přílohy č. 2

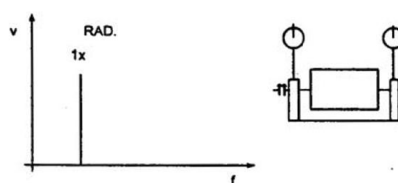
2.1.5 Diagnostické postupy

Vibrační analýza patří mezi nejefektivnější metody pro diagnostiku technického stavu rotačních strojů. Tato kapitola se zaměřuje na závady komponent pojezdu lokomotiv, primárně motorů, ložisek a ozubených převodů. Každá z těchto závad má specifické projevy ve vibračním spektru, které lze identifikovat pomocí vibrodiagnostických metod.

Nevývaha rotujících součástí

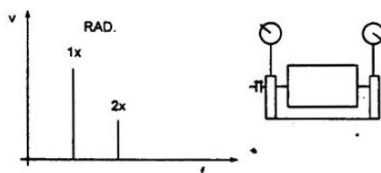
Vzniká, pokud se osa těžiště liší od osy otáčení. Rozlišují se tři druhy nevyváženosti: statická, dynamická a momentová.

- Statická: Vzniká při rovnoběžném posunu osy těžiště vzhledem k ose rotace. Ve frekvenčním spektru dominuje $1x$ frekvence otáčení. Projevuje se v radiálním směru.



Obr. 6: Vibrodiagnostické tabulky, projev statické nevývahy ve frekvenčním spektru [4]

- Dynamická: ve frekvenčním spektru se projeví na $1x$ a $2x$ otáčková frekvenci. První otáčková frekvence dosahuje vyšší amplitudy. Závada se projevuje v radiálním i axiálním směru.

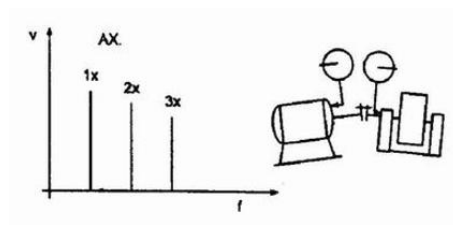


Obr. 7: Vibrodiagnostické tabulky, projev dynamické nevývahy ve frekvenčním spektru [4]

- Momentová: osa těžiště je různoběžná s osou rotace.

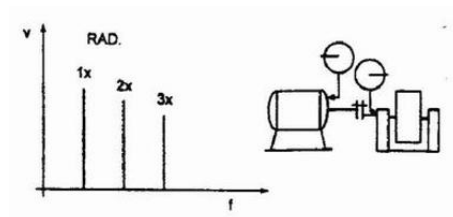
Nesouosost

- Úhlová: vibrace v axiálním směru. Složky shodné s otáčkovou frekvencí a její harmonické složky (druhá a třetí).



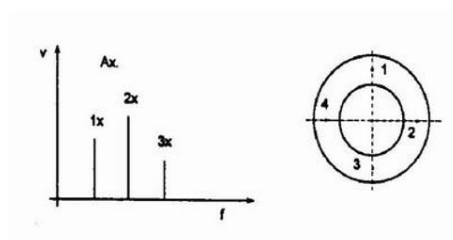
Obr. 8: Vibrodiagnostické tabulky, projev úhlové nesouosoti ve frekvenčním spektru [4]

- Rovnoběžná: vibrace v radiálním směru. Typická složka je dvojnásobek otáčkové frekvence, amplituda vyšší než u základní složky.



Obr. 9: Vibrodiagnostické tabulky, projev rovnoběžné nesouososti ve frekvenčním spektru [4]

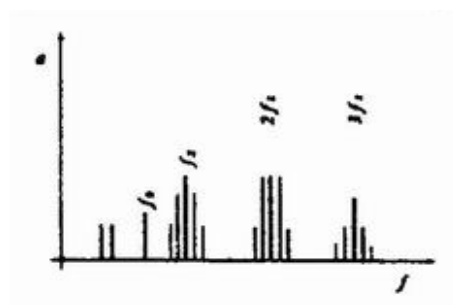
- Nesouosost ložiska: typické jsou axiální vibrace způsobené deformací uložení.



Obr. 10: Vibrodiagnostické tabulky, projev nesouososti ložiska ve frekvenčním spektru [4]

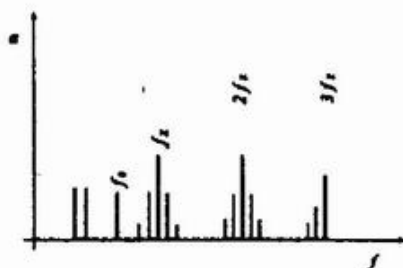
Ozubené převody

- Opatření: projevuje se rozšířením postranních pásem, vznikem rezonancí při f_n a nárůstem druhé a třetí harmonické frekvence.



Obr. 11: Vibrodiagnostické tabulky, projev opotřebení ozubeného převodu ve frekvenčním spektru [4]

- Nesouosost hřídelů: nárůst dvojnásobku zubové frekvence. Spektrum může obsahovat nesymetrická postranní pásma.
- Chybná montáž: amplituda na základní otáčkové frekvenci f_0 . Diagnostika této závady nemůže být provedena při běhu naprázdno, vyžaduje zátěž.



Obr. 12: Vibrodiagnostické tabulky, projev chybné montáže ozubeného převodu ve frekvenčním spektru [4]

Valivá ložiska

Závady se projevují v oblasti vysokých kmitočtů. Povrchová únava materiálu (pitting). Předpoklad čistě valivého pohybu. V první fázi poškození se závady projevují v akustických emisích. V další fázi poškození se projeví ve vibračním spektru, frekvence odpovídají nízkým kinematickým frekvencím. Ve třetí fázi mohou zaznamenat klasické akcelerometry.

Pro analýzu je nutný výpočet frekvencí vnějšího a vnitřního kroužku, frekvenci valivého elementu a frekvenci klece.

- Frekvence indikující závadu vnitřního kroužku:

$$f_{BPFO} = \frac{n}{2} * f_r * \left(1 - \frac{BD}{PD} * \cos \beta\right)$$

- Frekvence indikující závadu vnějšího kroužku:

$$f_{BPFI} = \frac{n}{2} * f_r * \left(1 + \frac{BD}{PD} * \cos \beta\right)$$

- Frekvence indikující závadu valivých elementů:

$$f_{BSF} = \frac{n}{2} * f_r * \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} * \cos \beta\right)^2\right)$$

- Frekvence indikující závadu klece:

$$f_{FTF} = \frac{1}{2} * f_r * \left(1 + \frac{BD}{PD} * \cos \beta\right)$$

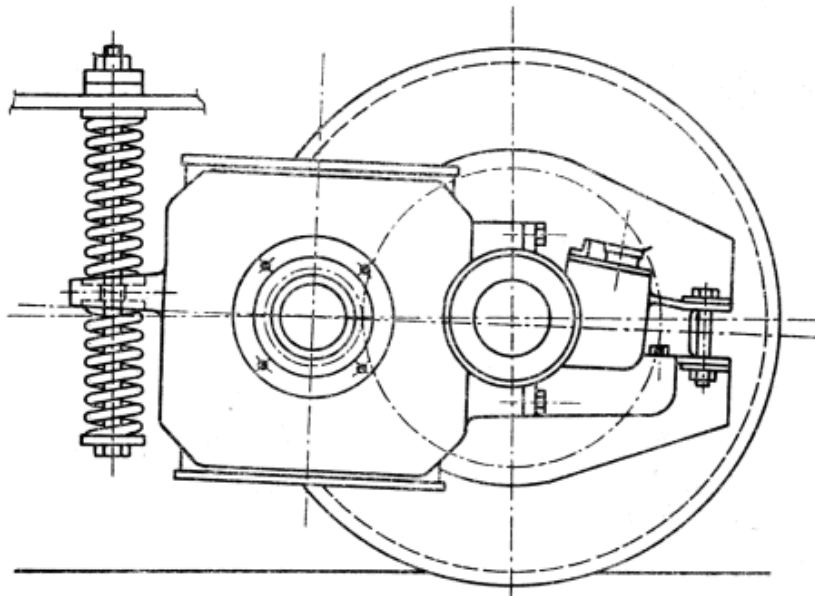
2.2 Popis konstrukce podvozků CZ LOKO

Kapitola je zaměřena na popis vlastností a konstrukce jednotlivých typů podvozků, které firma CZ LOKO vyrábí, modernizuje či opravuje.

2.2.1 Tlapové uložení trakčního motoru

Firma CZ LOKO používá v pojezdové části lokomotiv výhradně tlapové uložení trakčního motoru. S tímto typem uložení motoru je nejrozšířenější u lokomotiv s určených pro nákladní dopravu a lokomotiv s nižší maximální rychlostí, na které se firma specializuje.

Jedná se o relativně triviální a konstrukčně méně náročné řešení s nízkými nároky. Za jednu z hlavních nevýhod lze považovat velkou neodpruženou hmotnost plynoucí z uložení trakčního motoru přímo na nápravě prostřednictvím tzv. tlap. Na protilehlé straně je potom motor pružně uchycen k rámu podvozku pomocí pružinových celků nebo silentbloků. Množství neodpružené hmoty se negativně projevuje především ve vyšších rychlostech, proto se nepoužívá pro osobní dopravu.

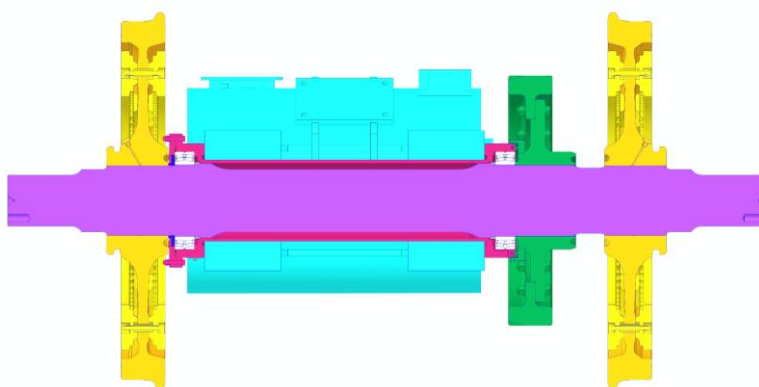


Obr. 13: Uložení tlapového motoru, pohled ve směru osy nápravy [5]

Při montáži je nutné dbát na správné uložení, dodržení výkresových tolerancí. Jakákoliv nepřesnost (nesouosost motoru a dvojkolí, nesprávné uložení ložisek, vůle tlap) nebo znečištění může negativně ovlivnit životnost.

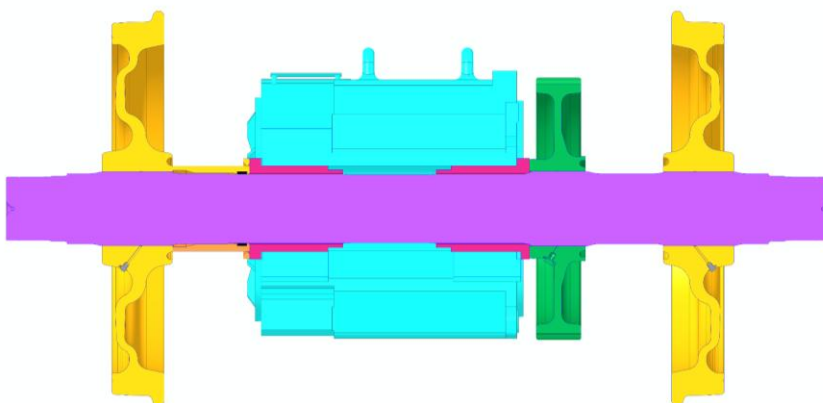
Rozlišujeme dva typy tohoto uložení:

- Valivé uložení, kde je použito speciální pouzdro (dutý hřídel), uložený na nápravě prostřednictvím valivých ložisek. Trakční motor je tzv. tlapou uchycen (lícované uložení) na tomto pouzdře. Při montáži je nutné dodržet předepsané tolerance, nežádoucí je axiální vůle u sestavy dvojkolí a vůle v tlapovém uložení. Konstrukční uzel se při opravě v rozsahu L3, která se provádí po 6 letech provozu nebo 400 000 ujetých km, zkontroluje a proměří se, zda jsou díly v předepsaných tolerancích. K rozebrání dochází při opravě v rozsahu L4, která se provádí po 12 letech provozu nebo 1 200 000 ujetých km. Používá se např. u lokomotiv řady 744.1 nebo 753.6. [6]



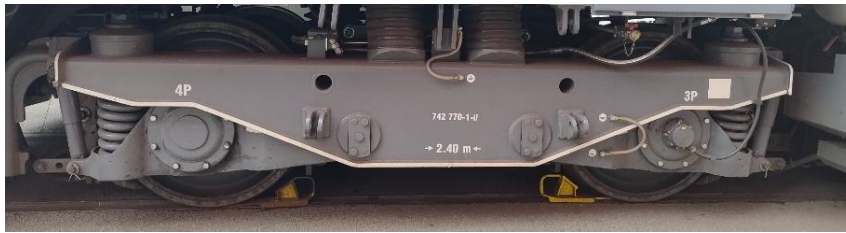
Obr. 14: Řez valivým tlapovým uložením motoru na dvojkolí

- Kluzné uložení, které využívá půlených kluzných ložisek vložených do „tlap“, které přímo spočívají na nápravě. Ložiska jsou mazána knotově. Při montáži musí být dodrženy výkresové tolerance. K opravě kluzných ložisek a rozebrání uložení dochází při opravě v rozsahu L3, která se provádí po 6 letech provozu nebo 300 000 ujetých km. [7]



Obr. 15: Řez kluzným tlapovým uložením motoru na dvojkolí

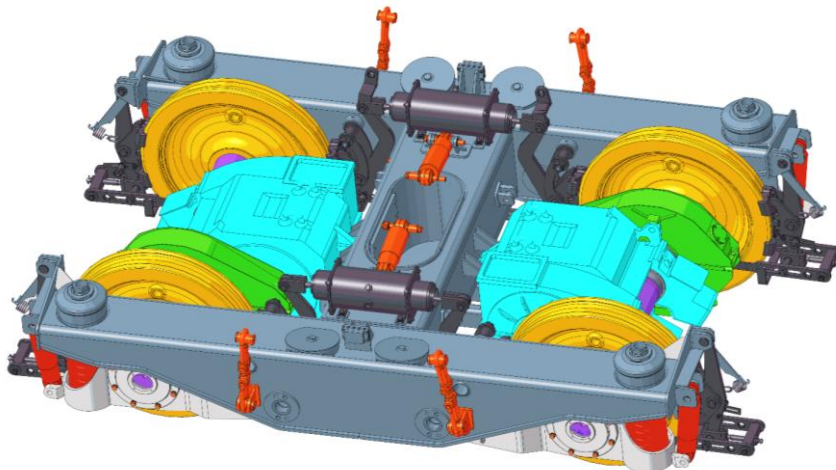
2.2.2 Podvozek ČKD typu „H“



Obr. 16: Podvozek lokomotivy 742.770

Konstrukční koncept ČKD podvozků je využíván od poloviny 19. století. Jedná se o dvounápravový podvozek s rámovou konstrukcí ve tvaru písmene „H“. Rám je charakteristický svou robustní konstrukcí. Vyznačuje se vysokou torzní tuhostí a odolností vůči křížovým propadům. Nevýhodou jsou horší dynamické vlastnosti ve vyšších rychlostech.

Konstrukce



Obr. 17: Podvozek ČKD s kluzným uložením trakčního motoru

Rám podvozku tvoří svařenec ve tvaru písmene „H“. Skládá se ze dvou podélníků a jednoho příčnicku. Ve středu příčnicku je otvor určený pro vedení tažného (královského) čepu, který spojuje rám podvozku s hlavním rámem. Na příčnicku každého z podvozků se nachází dva tlumiče, které tlumí příčné kmity mezi podvozkem a hlavním rámem. Dvojkolí je tvořeno dvěma obručovými koly o průměru 1000 mm. Na dvojkolí je tlapově uložen motor TE 005, TE 015 nebo TDM 5003. O přenos výkonu mezi motorem a koly se stará ozubený převod s převodovým poměrem 77:16 (vyjma lokomotivy 723, která má převodový poměr 78:15). Na čepch nápravy jsou nasazena nápravová ložiska, na nich jsou nasazena kyvná ramena. Primární vypružení je realizováno párem pružin, vnitřní a vnější. Jejich zdvih je omezen pryžokovovým dorazem. Součástí primárního vypružení jsou čtyři hydraulické tlumiče. [8]

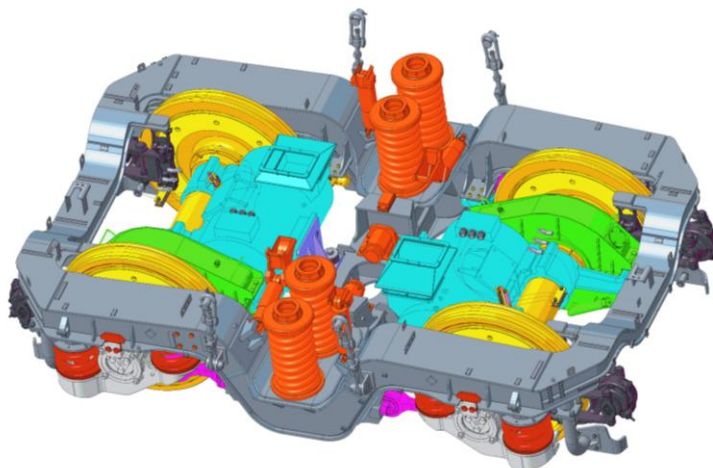
2.2.3 Podvozek řady 744.1



Obr. 18: Podvozek lokomotivy 744.169

Jedná se o moderní konstrukční řešení vyvinuté firmou CZ LOKO ve spolupráci s Univerzitou Pardubice pro lokomotivy určené pro posunovací a lehkou traťovou službu. Novým řešením sekundárního vypružení se zlepšili akustické vlastnosti a snížili se vibrace přenášené na hlavní rám. Součástí sekundárního vypružení jsou pryžokovové opěry a příčné zarážky, které tlumí příčné kmity v oblasti tažného čepu.

Konstrukce



Obr. 19: Podvozek lokomotivy řady 744.1

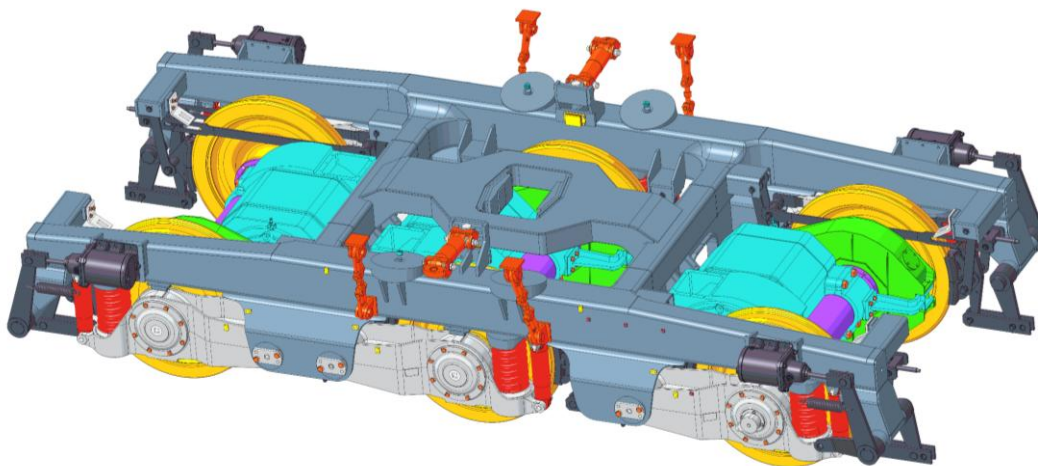
Rám podvozku vznikl svařením dvou podélníků, příčnicku a dvou čelníků. Podélníky jsou ve středu poníženy, aby vzniklo více prostoru pro sekundární vypružení. Dvojkolí je tvořeno celistvými koly, tzv. monobloky, o průměru 1100 mm, nalisovaných na plné nápravě. Do kol jsou uchyceny brzdové kotouče. Na nápravě jsou dále nalisována valivá ložiska. Ložiska jsou uschována v dutém hřídeli obepínajícím nápravu. Pohon dvojkolí realizují asynchronní trakční motory TAM 1084. Výkon přenáší ozubený převod s převodovým poměrem 84:17. Zuby ozubených kol jsou šikmé, se sklonem 20°. V každé ložiskové skříni je jedna kompaktní ložisková jednotka SKF CTBU class K. Primární vypružení se složeno ze čtyř párů pružin uložených na ložiskových skříních. [9]

2.2.4 Třínápravový podvozek



Obr. 20: Třínápravový podvozek lokomotivy 774.7 (Š, 07.02.2025)

Využívají se u těžkých nákladních lokomotiv s vysokým výkonem. Jsou vhodné i pro tratě nižší kvality. Mají lepší rozložení hmotnosti nežli „H“ podvozky a vyšší adhezní sílu. Uspořádání dvojkolí na lokomotivě odpovídá C' o C' o. Tři nápravy umožňují lépe rozložit tažnou sílu v rámci podvozku, což umožňuje vyšší trakční výkon.



Obr. 21 Třínápravový podvozek lokomotivy řady 774.7

Rám podvozku byl ponechán původní z lokomotiv řady 770. Rámy jsou svařované z dutých ocelových částí. Skládá se ze dvou podélníků, dvou příčníků a jednoho středového dílu, který má v sobě otvor pro tažný čep. Jeho pohyb je vymezen gumovými vložkami a dorazy. Původně bylo odpružení hlavního rámu realizováno pomocí závěsek, dnes je nahrazováno pryžokovovými sloupky. Dvojkolí je tvořeno dvěma obručovými koly o celkovém průměru 1050 mm. Na každém dvojkolí je pár valivých ložisek, na kterých je uložen stejnosměrný trakční motor TE 006. O přenos výkonu mezi motorem a koly se stará ozubený převod s čelním ozubením, převodový poměr odpovídá 76:15. Na čepech nápravy jsou nalisovaná nápravová ložiska, která jsou uložena v kyvných ramenech. Ta jsou pomocí pryžokovových pouzder a čepů uložena v rámu podvozku. Každé kyvné rameno je odpruženo párem pružin. [10]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE

3.1 Záběh podvozku CZ LOKO

Zkušebna podvozků CZ LOKO je koncipovaná pro záběh ozubených převodů v souladu s předpisem ČD V48 a ČD V25-1. „Záběh se musí provádět v obou směrech otáčení, a to po 20 minutách v každém směru otáčení při 175 otáčkách/min, 355 otáčkách/min a 480 otáčkách/min. [11]“. Oba předpisy stanovují délku záběhu, frekvenci otáčení dvojkolí a maximální oteplení ložisek po montáži. Na návrhu se podílela firma Škoda Transportation, která zabíhá ozubené převody podobně jako CZ LOKO.

Konstrukce zkušebny umožňuje testovat samostatné dvojkolí s trakčním motorem (např. lokomotivy řady 794), nebo dvounápravové podvozky (např. lokomotivy řady 742.7), ale i třínápravové podvozky (např. lokomotivy řady 744.7). Pro každý z uvedených případů se lehce liší způsob uchycení do zkušebního standu.

- Dvojkolí s trakčním motorem: trakční motor je podložen podstavcem a zajištěn proti pohybu v horizontálním směru. Nápravová ložiska jsou uchycena v přípravech, které nahrazují kyvná ramena.
- Dvounápravový podvozek: kyvná ramena nebo ložiskové skříně jsou položena na podstavce. Na podvozků jsou umístěny příčníky, do kterých se zasunou závitové tyče. Závitové tyče jsou uchyceny v T-drážkách v podlaze a nahoře staženy maticí.
- Třínápravový podvozek: stejný způsob uchycení jako dvounápravový podvozek, pouze je použito šest podstavců a šest závitových tyčí.



Obr. 22: Zkušebna CZ LOKO s ČKD podvozkem

Střecha zkušebny je sklopná, což umožňuje usazení zkoušených celků pomocí jeřábu. V podlaze jsou zabudované ocelové bloky s T-drážkami, kam se montují přípravky pro uchycení. Ve středu se nachází kanál, který usnadňuje opravy a zajišťuje přístup ke spodní části podvozku.

Celý záběh trvá 2,5 hodiny. Během zkoušky podvozek 5 minut najíždí na konstantní rychlost, poté ji 20 minut udržuje. Během záběhu se vystřídají tři konstantní rychlosti pro oba směry otáčení kol. Pro většinu podvozků se jedná o konstantní rychlosti přibližně 40, 70 a 100 km/h. U lokomotiv se sníženou maximální rychlostí se jedná o konstantní rychlosti kolem 30, 50 a 70 km/h.

Součástí záběhu je měření klíčových parametrů pro posouzení technického stavu podvozku. Konkrétně jsou monitorovány teploty nápravových a tlapových ložisek. Dále se vyhodnocují hodnoty vibrací, hluku a velikost proudu, které odebírají trakční motory. Motory jsou zkoušeny bez zátěže, tzv. naprázdno. Jednotlivé kroky zkoušky včetně vyhodnocení technického stavu jsou řízeny softwarem Scada Reliance 4.

3.2 Vybavení zkušebny CZ LOKO

3.2.1 Snímače otáček

Obvodová rychlost dvojkolí je měřena reflexní fotoelektrický senzor otáček LRK - 120-304. Každé dvojkolí má vlastní snímač, rychlost se může lišit. Rozdíl závisí na stavu ozubeného převodu, správném nastavení brzdových špalíků, výkonové charakteristice jednotlivých trakčních motorů. Laser je namířen na kolo, kde je nalepena odrazová lepicí páska.

3.2.2 Snímače teploty

Monitorování teploty zajišťuje osm odporových snímačů TR 158 s magnety pro uchycení. Teplotní rozsah čidel je od -50°C do 150°C. Měří teplotu vík nápravových ložisek a ložisek trakčního motoru, která dle předpisu ČD V25, kde je uvedeno „*Oteplení ložisek převodové skříně nesmí překročit teplotu prostředí o více než 30 °C (měří se na víku ložiska)* [12]“. V technických podmínkách jednotlivých motorů se uvádí, že by teplota ložisek neměla překročit 45°C.

Čtyři snímače jsou na kyvných ramenech nebo na ložiskových skříních/kyvných ramenech. Zbylé čtyři snímače jsou na víkách tlapového uložení.

Teplotu na zkušebně monitoruje odporové čidlo teploty NS 101 Ni 1000/6180 s teplotním rozsah -30°C až 150°C.

3.2.3 Snímače vibrací

Průběh vibrací je zaznamenávám ve třech směrech: horizontálním, vertikálním a axiálním. Používají se tři piezoelektrické akcelerometry SVE 756 s citlivostí 100 mV/g. Akcelerometry jsou umístěny ve třech na sebe kolmých směrech. Frekvenční rozsah snímačů umožňuje měřit vibrace od 0,4 Hz po 20 kHz. Pro snadnou manipulaci bylo zvoleno uchycení akcelerometrů pomocí magnetu. Umisťují se do středu rámu podvozku, povrch rámu je lakovaný u starších typů může mít drsnost až Re 22.

Signál z akcelerometrů putuje do vibračního převodníku VKS-02, který měří efektivní rychlost (RMS) vibrací 0–20 mm/s. Frekvenční rozsah je možné nastavit od 10 Hz po 1, 2, 5 nebo 10 kHz. Analogový výstup z převodníku je proud o velikosti 4–20 mA, v závislosti na velikosti měřené veličiny.

3.2.4 Proudý odebírané trakčními motory

Rozdíl proudů, které odebírají jednotlivé trakční motory, může být známkou mechanické závady jako je opotřebený ozubený převod, nebo nevhodně napárovaných zánovních ozubených kol a převodů. Drobný rozdíl v odebíraných proudech (do 1 %) lze vyrovnat shuntovacím obvodem (třístupňové buzení trakčních motorů).

3.2.5 Mikrofon

Akustické emise zaznamenává mikrofon Sound Level Transmitter PCE-SLT. Jeho frekvenční rozsah záleží na nastavení. Je možné měřit v rozsahu 30-80 dB, 50-100 dB nebo 80-130 dB. Frekvenční vážení odpovídá třídě A.

3.2.6 Vyhodnocení technického stavu podvozku

Výsledkem zkoušky je protokol, který je následně vyhodnocen oddělením kvality jako vyhovující nebo nevyhovující. V případě, kdy je stav podvozku nevyhovující, proběhne oprava zjištěných závad a zkouška se zopakuje. Kritéria rozhodující o stavu podvozku jsou následující:

1. **Teplota:** Povrchová teplota ložisek (jejich krytů) nesmí vzrůst o více než 30°C nad okolní teplotu. Pokud tato hodnota překročí stanovenou mez, může dojít k poškození maziva a následnému zadření ložisek.

Tab. 1: Tabulka naměřených teplot, která je součástí protokolu CZ LOKO [13]

Popis ložiska	t_dílu	t_okolí	t_rozdíl	t_dílu	t_okolí	t_rozdíl
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Nápravové ložisko pravé	28,9	22,4	6,4	30,4	22,4	8,0
Nápravové ložisko levé	28,9	22,4	6,5	29,1	22,4	6,7
Tlapové ložisko pravé	38,9	22,4	16,5	39,3	22,4	16,9
Tlapové ložisko levé	39,9	22,4	17,5	41,2	22,4	18,7

2. **Vibrace:** Limitní hodnoty vibrací byly stanoveny statisticky z dříve naměřených dat. Pokud vibrace překročí rychlost 5 mm/s u ČKD podvozků, 3 mm/s u podvozků lokomotivy řady 744.1 (190.0), technický stav je vyhodnocen jako nevyhovující.

Tab. 2 Tabulka naměřených vibrací a hluku, která je součástí protokolu CZ LOKO [13]

Směr otáčení dvojkolí		od sebe			k sobě			
rychlost	radiální	horizontální	axiální	hluk	radiální	horizontální	axiální	hluk
40 [km/h]	1,2	1,2	2,2	92	1,1	1,2	1,3	92,5
70 [km/h]	1,6	1,3	2,6	92,7	1,9	1,1	2,5	96,8
100 [km/h]	2,1	1,4	2,9	99,9	2	1,5	2,7	96,5

3. **Hluk:** Pokud hodnota naměřeného hluku během některého z úseků konstantní rychlosti přesáhne hladinu 95 dB pro ČKD podvozky nebo 90 dB pro podvozky řady 744.1, podvozek je nevyhovující.

3.3 Zhodnocení řešerše

Technická diagnostika prošla v posledních letech výrazným vývojem, zejména díky zlepšení metod vibrační a akustické analýzy. Tradiční metody diagnostiky strojů, jako je analýza vibrační prostřednictvím efektivní hodnoty nebo periodické měření teploty, zůstávají funkční pro základní hodnocení stavu zařízení. Jejich výhodou je nízká náročnost na implementaci a provozní náklady.

Je třeba zdůraznit, že tradiční metody zůstávají funkční pro řadu základních aplikací a jejich výhodou je relativní jednoduchost. Cílem této práce je však demonstrovat, že rozšíření těchto metod o pokročilejší senzorické techniky a frekvenční analýzu může výrazně zvýšit přesnost a prediktivní potenciál diagnostiky.

Před zhodnocením stavu zkušebny by bylo vhodné uvést dvě klíčové výzkumné otázky:

1. Může rozšíření diagnostické metody o oblast FFT přispět k upřesnění diagnózy technického stavu podvozků během jejich záběhu?
2. Bude možné použít FFT analýzu s využitím stávajícího měřicího řetězce, bez jeho změn nebo zásadních úprav?

Na základě těchto otázek byly formulovány dvě pracovní hypotézy:

1. H1: Aplikace FFT analýzy v rámci doběhové zkoušky umožní přesnější detekci a identifikaci vibračních závad podvozku.
2. H2: Stávající měřicí řetězec může být zachován, přičemž FFT analýza může být realizována jako paralelní diagnostická metoda bez nutnosti zásahu do stávající konfigurace.

3.3.1 Omezení a nevýhody stávajících postupů

Omezený frekvenční rozsah a vzorkovací frekvence

Současný měřicí systém byl inspirován tím, co používala firma Škoda Transportation. Měření vibrační bylo spíše orientační a využívalo akcelerometry měřící efektivní hodnotu. Primárním účelem záběhu bylo splnit podmínky předpisu V25. Nebylo počítáno s využitím měření pro hlubší diagnostiku technického stavu.

Stávající měřicí systém pracuje s omezeným frekvenčním pásmem. Uchycení akcelerometru magnetem snižuje rozsah na přibližných 7 kHz. Magnet je přichycen na lakovaném povrchu, což snižuje rozsah na hodnotu v rozmezí 1-2 kHz. Povrch rámu podvozku má vysokou drsnost, čímž se frekvenční rozsah sniží na hodnotu okolo 1 kHz. Pokud vezmeme v potaz všechny tyto faktory a akcelerometr SVE 756, který momentálně firma používá, frekvenční spektrum bude omezeno na přibližných 800 Hz.

Elektromagnetické rušení

Zemnicí místo podvozku se neshoduje se zemnicím místem senzoriky, což způsobuje zemnicí smyčku, která generuje šum. Ten negativně ovlivňuje celé frekvenční spektrum a není možné ho odfiltrovat. Nejvíce se šum projevuje u podvozků s asynchronními motory, které se v době realizace zkušebny, v CZ LOKO nevyráběli.

Omezení zkušebního standu

Uložení podvozku ve standu eliminuje kmity spojené se závadami primárního vypružení. Podvozek leží na ložiskových skříních neměla by se projevovat nevývaha dvojkolí. Výrobní proces minimalizuje možnost závady: dvojkolí se vyvažuje samostatně před montáží do podvozku, pružiny musí projít zkouškou tlakem a všechny tlumiče jsou při opravě repasovány nebo použity nové.

3.4 Cíle práce

Základním cílem práce je návrh doplnění stávajícího měřicího systému druhým odděleným měřicím řetězcem, který bude ve dvou měřicích bodech snímat okamžitou hodnotu zrychlení v radiálním směru k ose rotace. Metodika zkoušky bude využívat časové sekvence po vypnutí pohonu při ukončení standardního testu CZ LOKO. V průběhu doběhu soustrojí bude snímáno zrychlení pro vytvoření řádové analýzy doběhu.

Primární umístění přidaných akcelerometrů bude následující: ve středu podvozku a na trakčním motoru. Umístění snímače na středu podvozku vychází ze stávajícího zapojení. Pro přesnější lokalizaci závad bude přidán akcelerometr na trakční motor, konkrétně na jeho kostře. Budou snímány otáčky dvojkolí, které pohání motor, na kterém je umístěn snímač.

Dalším cílem této bakalářské práce je podrobná analýza vibračních parametrů podvozků lokomotiv vybraných řad z portfolia společnosti CZ LOKO. V rámci této analýzy je kladen důraz na identifikaci hlavních zdrojů vibrací a hluku. Hlavním cílem této práce je vytvořit podklady pro firmu CZ LOKO pro zlepšení jejich diagnostiky. Pro dosažení cíle je nutné splnit tyto dílčí cíle:

1. Navrhnout měřicí řetězec umožňující zachytit vibrace od 3 Hz po 1000 Hz. Vzorkovací frekvence měřicího zařízení by měla být minimálně 5000 kHz. Musí být jednoduchý pro obsluhu a finančně nenáročný.
2. Minimalizovat vliv elektromagnetického rušení zkušebny.
3. Výpočet základních kinematických frekvencí pro všechny testované podvozky.
4. Navrhnout metodiku pro diagnostikování nejčastějších závad.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Výpočet základních kinematických frekvencí

Základem pro analýzu vibrací je výpočet kinematických frekvencí, které souvisejí s otáčením dvojkolí, ložisek, trakčních motorů a ozubených převodů. Tyto frekvence umožňují identifikovat konkrétní zdroje vibrací při spektrální analýze (FFT) nebo po přepočtu na řády (v tomto případě na řády dvojkolí) pro analýzu řádového multispektra.

Rychlosti při záběhu pro podvozky ČKD nebo řady 744.1 jsou následující 40 km/h, 70 km/h a 100 km/h. Rychlosti při záběhu pro lokomotivy se sníženou rychlostí jako je 723.7, 794 nebo 774.7 jsou následující 30 km/h, 50 km/h a 70 km/h.

Bližší specifikace podvozků, včetně výpočtů základních kinematických frekvencí a jejich převodu na řády, je uvedena v příloze číslo 1.

Řádová analýza

Pro vyhodnocení doběhových zkoušek byl proveden přepočet základních frekvencí na řády dvojkolí.

Tab. 3: Řády klíčových komponent pro jednotlivé typy podvozků

Typ podvozku	ČKD	744.1	Třinápravový
Komponenta	Řád	Řád	Řád
Dvojkolí	1	1	1
Motor	4,81	4,94	5,07
Nápravová ložiska – vnější	7,75	35,56	7,75
Ložisko motoru 8 - vnější	14,88	15,28	26,41
Ložiska motoru 13 – vnější	27,17	25,76	22,03
Ložiska motoru 13 – vnitřní	40,19	38,47	33,69
Ložiska motoru 13 – vnitřní	23,97	23,98	23,13
Ložiska tlakového uložení – vnější	-	16,69	-

4.2 Měřicí řetězec

Navzdory výše uvedeným limitům je třeba zdůraznit, že stávající systém plní požadavky na základní monitorování stavu podvozků, jak dokládá jeho dlouhodobé využití ve firmě CZ LOKO.

Na základě provedeného zhodnocení bylo zjištěno, že stávající měřicí řetězec není vhodný pro identifikaci poruch pojezdu pomocí FFT analýzy. Pro účely této práce musí být navržen nový měřicí systém, fungující paralelně s tím stávajícím. Součástí návrhu musí být uzemnění všech komponent systému, aby se snížily projevy elektromagnetického rušení.

4.2.1 Požadavky

Nový systém nesmí nijak narušit stávající způsoby měření firmy. Protokoly z měření jsou součástí dokumentace dodávané zákazníkovi ke konkrétnímu vozidlu.

Snímače musí umožnit zachytit frekvence od 3 Hz po minimálně 700 Hz. To splňují snímače se základním frekvenčním rozsahem 0-1 kHz.

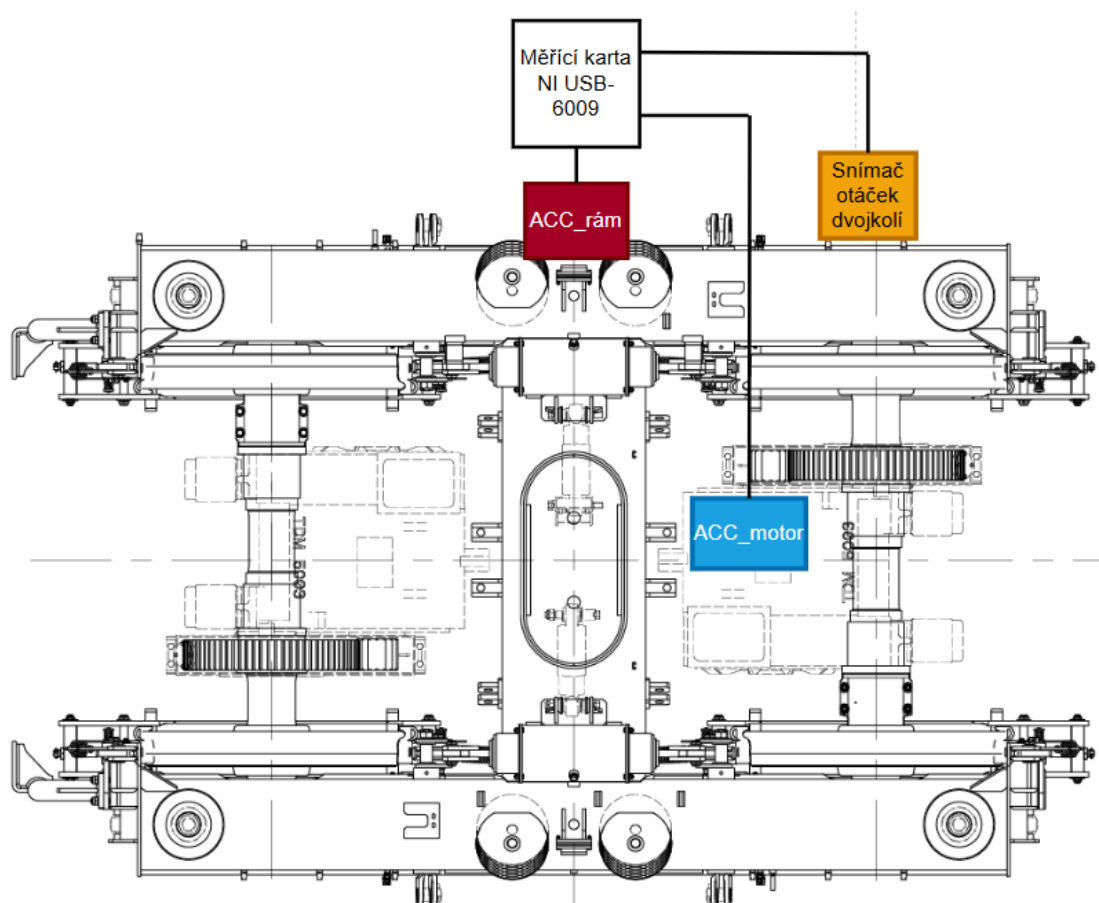
Minimální vzorkovací frekvence by měla být 5 kHz, tato frekvence by měla pokrýt všechny základní projevy napříč podvozků. Po provedení několika měření bylo vzorkování zvýšeno na 10 kHz, u podvozků ČKD se objevuje rezonance na frekvenci kolem 2,5 kHz.

Měření musí být offline, v prostorech zkušebny není přiveden internet. Zároveň by systém měl být jednoduchý na obsluhu. Měření budou v mé nepřítomnosti spouštět zaměstnanci CZ LOKO.

4.2.2 Návrh měřicího systému

Měřicí řetězec popsáný v této kapitole je navržen za účelem monitorování a analýzy vibrací podvozku lokomotiv. Primárním cílem systému je sběr dat, jejich zpracování a vyhodnocení. Měřicí řetězec tvoří následujících prvků:

- Dva jednoosé akcelerometry – zaznamenávají vibrace ve vertikální ose.
- Měřicí karta NI USB-6009 – umožňuje sběr analogového signálu ze senzorů, převádí jej na digitální data.
- Software Dewesoft – vizualizace, zpracování a archivace dat.
- Snímač otáček – monitorování otáček dvojkolí bude využit stávající.



Obr. 23: Schéma měřicího řetězce

Akcelerometry

V systému jsou použity dva typy jednoosých akcelerometrů, každý s odlišným rozsahem.

Akcelerometr ADXL 105

- rozsah měření: ± 5 g
- frekvenční rozsah: 0,5 Hz až 10 kHz

Snímač vibrací ADXL 105 je vhodný pro měření středního frekvenčního pásma. Pro tento akcelerometr bylo vybráno umístění na rámu podvozku, tato pozice byla vytypována zaměstnanci CZ LOKO. Při měření z jednoho bodu ve třech směrech je to logický krok, rám nerotuje a shlukují se zde informace o všech komponentách podvozku. Bohužel na tomto místě není možné přesně detekovat místo závady. Z tohoto důvodu bylo zavedeno doplňkové měření druhým akcelerometrem, které napomáhá upřesnit místo závady.

Akcelerometr ADLX 193

- rozsah měření: ± 150 g
- frekvenční rozsah: 0,5 Hz až 10 kHz

Snímač vibrací ADXL 193 je určen pro měření středního frekvenčního pásma. Bylo pro něj zvoleno umístění na kostře trakčního motoru. Kostru motoru tvoří odlitek s lakovaným povrchem, povrch má vyšší drsnost než na rámu. V případě, že se závada projeví pouze na motoru, daná závada souvisí s komponenty měřeného motoru nebo není dostatečně závažná na to, aby se projevila na rámu.

Kalibrace akcelerometrů

Kalibrace byla provedena za konstantní teploty v prostředí bez výrazného vnějšího rušení. Použit byl dvoubodový postup:

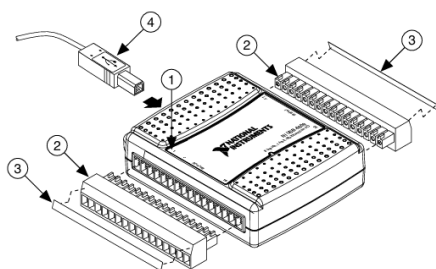
- Referenční klidová poloha (0 g).
- Statická poloha (1 g).

Snímač otáček

Snímač otáček LRK - 120-304 je součástí vybavení CZ LOKO. Jedná se o reflexní fotoelektrický senzor (reflexní optická závora s polarizačním filtrem), který snímá otáčky dvojkolí, na kterém je umístěna jedna odrazka. Snímač se aktivuje při přerušení paprsku. Snímač disponuje PNP a NO výstupy.

Měřicí karta NI USB-6009

Multifunkční DAQ karta NI 6009 od společnosti National Instruments je kompaktní zařízení určené pro sběr dat z napěťových senzorů. Karta disponuje osmi analogovými vstupy, s rozlišením 14 bitů a maximální vzorkovací frekvencí 48 kS/s. Je kompatibilní se softwarem Dewesoft.



1. Overlay Label with Pin Orientation Guides
2. Screw Terminal Connector Plug
3. Signal Label
4. USB Cable

Obr. 24: Měřicí karta NI USB-6009 (NI USB-6009 features) [14]

Klíčové parametry NI 6009:

- počet analogových vstupů: 8
- rozlišení: 14 bitů
- maximální vzorkovací frekvence: 48 kS/s
- rozsah vstupního napětí: ± 10 V
- přesnost: $\pm 0,1$ % rozsahu
- komunikace: USB 2.0
- napájení: přes USB (5 V)

Výhody v praxi:

- Nízká cena a jednoduchost použití – ideální pro prototypování nebo studentské projekty.
- Kompaktní provedení – snadná integrace do malých měřicích systémů.
- Kompatibilita s Dewesoft – bezproblémová integrace a řízení přes grafické rozhraní.
- Velkou výhodou je napájení přes USB, malý rozměr, kompatibilita s Windows.

Nevýhody:

- Karta není galvanicky izolovaná – země karty je propojená se zemí USB portu PC.
- Nemá hardwarové antialiasingové filtry. Nejsou omezeny vysokofrekvenční složky, karta digitalizuje všechny naměřené signály. Je nutné dbát na volbu vhodné vzorkovací frekvence.

Software Dewesoft

Dewesoft je výkonný software pro sběr a analýzu dat, který podporuje širokou škálu měřicích zařízení, včetně NI USB-6009. Tento software nabízí pokročilé funkce pro zpracování signálů, vizualizaci dat a vytváření reportů.

Pro měření dat byla využívána starší verze softwaru, Dewesoft 7.7.1, která plně podporuje karty National Instrument. Umožňuje zaznamenávat hodnoty, nastavovat různé vzorkovací frekvence, snadné nastavení.

Pro vyhodnocení řádové analýzy byla využita zkušební verze Dewesoft X, která umožňuje využití moderních diagnostických metod a názorné grafické interpretace výsledků.

Dewesoft 7.7.1

- Starší, ale stabilní verze dostupná zdarma pro základní měření.
- Multi-kanálové měření – možnost současného sběru z více snímačů.
- FFT analýza – rychlá Fourierova transformace umožňuje spektrální rozbor vibrací.
- Formáty výstupu – podpora CSV, HDF5 a binárních souborů.

Dewesoft X (zkušební verze)

- Moderní prostředí s interaktivní grafikou a pokročilými filtry.
- Diagnostické moduly – automatická detekce poruch.
- Export a reportování – možnost generování přehledných PDF zpráv.

4.3 Průběh měření

Měření probíhalo za stálé teploty. Vnější vlivy jsou eliminovány, protože je zkušebna oddělena od zbytku dílny. Záběh je korigován pomocí dvou snímačů otáček (rychlost dvojkolí se může lehce lišit). Pro analýzu jsem snímaly průběh otáček z jednoho snímače.

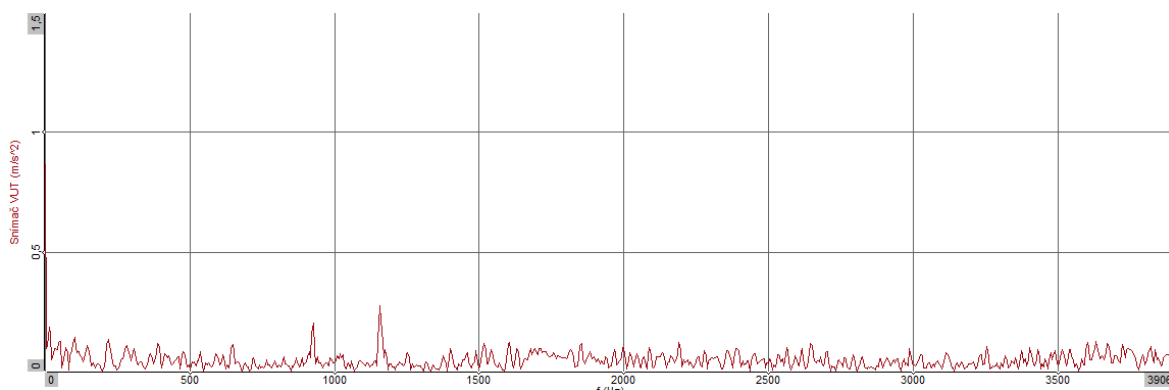
Měření dat probíhá souběžně se stávajícím měřením CZ LOKO. Zaznamenávají se data z přechodu mezi rychlostmi, které trvá 5 minut, následně minuta záznamu konstantní rychlosti a následný doběh. Zaznamenávali se data pouze v pro jeden směr otáčení dvojkolí, měření druhého směru by mělo stejnou vypovídající hodnotu o technickém stavu jako první.

Rozběh a následné přechody mezi rychlostmi mají nižší rozsah otáček než doběh. Během rozběhu a simulované jízdy při konstantní rychlosti jsou měřené hodnoty ovlivněny elektromagnetickým šumem. K zastavení podvozku dochází po vypnutí motoru, díky čemuž se eliminují projevy rušení.

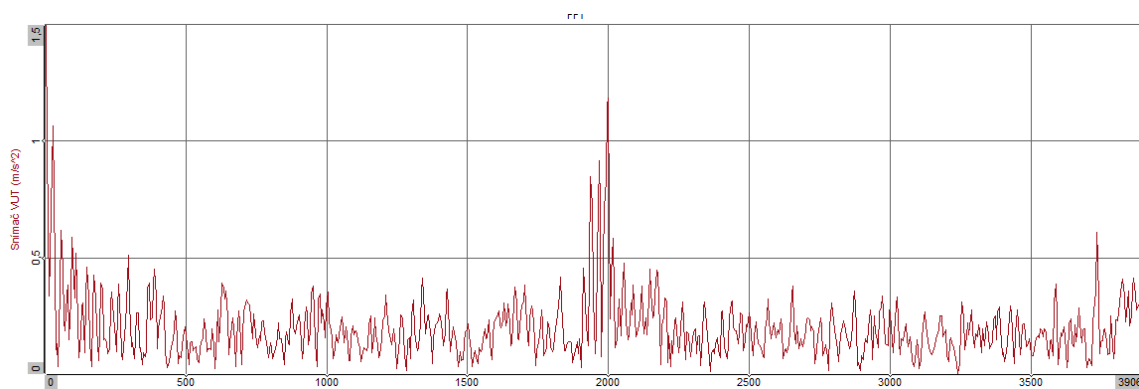
4.4 Elektromagnetické rušení

Při počátečních měření se výrazně projevovalo elektromagnetické rušení, které dosahovalo amplitud vyšších než frekvence závad. Z takových záznamů nebylo možné diagnostikovat stav podvozku. Nebylo možné rušení odfiltrovat.

Prvním pokusem o zlepšení bylo lepší uzemnění podvozku. Po uzemnění se zvýšili měřené hodnoty a signál byl více poškozen. Po bližším prozkoumání výkresové dokumentace zkušebny bylo zjištěno, že zemnicí místa podvozku a senzoriky se liší. Když je podvozek plně uzemněn vytvoří se zemnicí smyčka a dojde ke zkreslení měření.



Obr. 25: Spektrální FFT analýza před uzemněním podvozku, na ose x je frekvence [Hz], na ose y amplituda [mm/s²]



Obr. 26: Spektrální FFT analýza po uzemnění podvozku, na ose x je frekvence [Hz], na ose y amplituda [mm/s²]

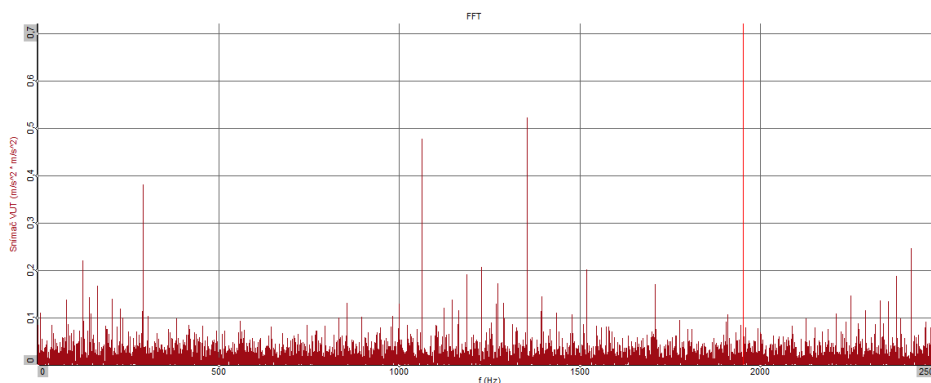
Po zhodnocení naměřených dat bylo podezření, že se v kabeláži indukuje proud (hlavně u podvozků s asynchronními motory). Při dobřhové zkoušce byla pozorována prudká změna amplitudy vibrací v moment, kdy dojde k odpojení motoru od zdroje, což není v souladu s běžným mechanickým chováním systému – tento jev potvrdil vliv elektromagnetické interference. Byl proveden experiment s odstíněním kabelů pomocí alobalu, který byl uzemněn na zemnicím bodu rozvaděče. Toto opatření zmenšilo negativní vlivy.



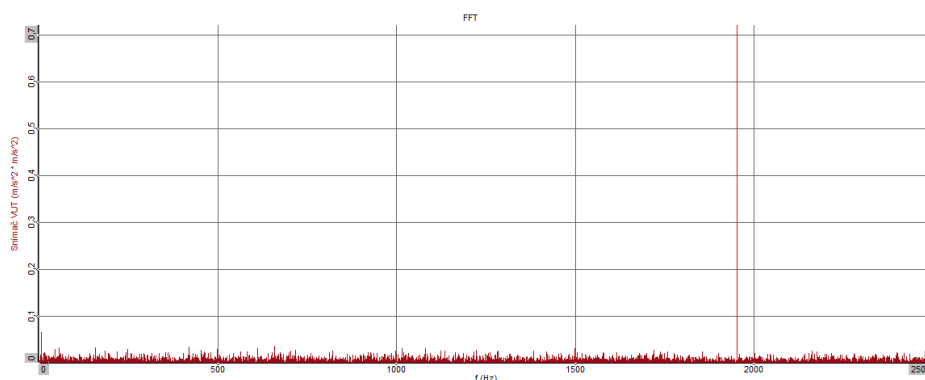
Obr. 27: Odstínění alobalem

Následně byl alobal nahrazen stíněnou hadicí. Tím se eliminovala většina rušivých jevů. Stále zůstával velký rozdíl velikosti vibrací před a po vypnutí motoru.

Nejvíce se rušení projevovalo u podvozků řady 744.1, které mají asynchronní motory. Po vypnutí přetrvávala dominantní složka o frekvenci 150 Hz. Tento jev je možné vysvětlit přítomností rušení ze sítě, neboť po vypnutí motoru nedochází ke galvanickému odpojení meziobvodu, a tedy i k úplnému odstranění zdroje elektromagnetického rušení.

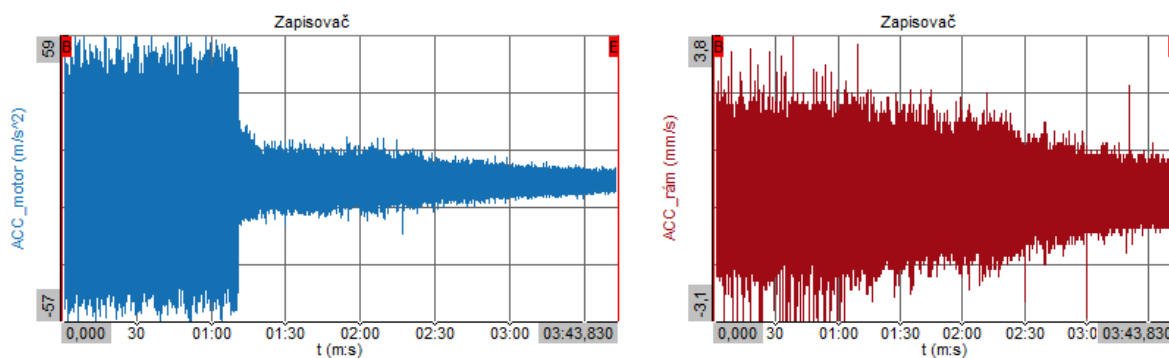


Obr. 28: Spektrální FFT analýza před instalací stínění, na ose x je frekvence [Hz], na ose y amplituda [mm/s^2]

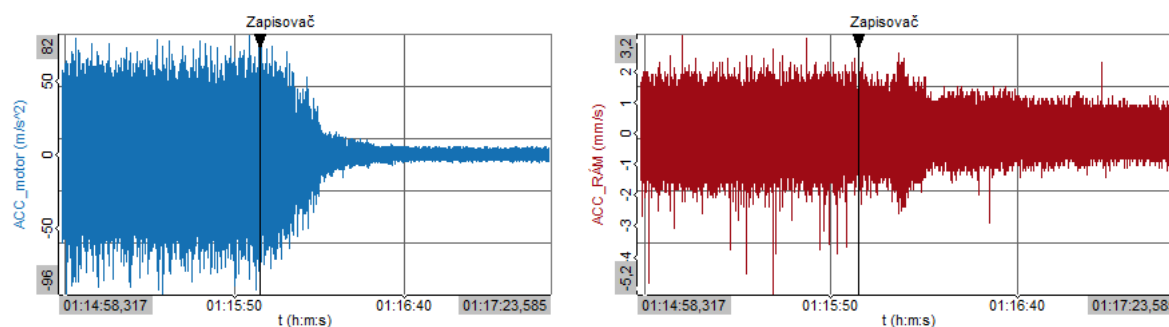


Obr. 29: Spektrální FFT analýza po instalaci stínění, na ose x je frekvence [Hz], na ose y amplituda [mm/s^2]

Poslední inovací bylo uzemnění kostry snímače. Z grafu je patrné výrazné snížení amplitudy vibrací po provedení uzemnění snímačů i měřicího zařízení. Před uzemněním se amplitudy během doběhu motoru snižovaly nelineárně, což naznačuje přítomnost elektromagnetického rušení. Po správném uzemnění je průběh výrazně plynulejší a odpovídá očekávanému mechanickému chování.



Obr. 30: Průběh vibrací během doběhové zkoušky před uzemněním kostry snímače, vpravo záznam z motoru, vlevo záznam z rámu



Obr. 31: Průběh vibrací během doběhové zkoušky po uzemněním kostry snímače, vpravo záznam z motoru, vlevo záznam z rámu

4.5 Metodika vyhodnocení testů

4.5.1 Spektrum rezonančního pozadí

Spektrum rezonančního pozadí je průměrovaná frekvenční analýza celého časového úseku při snímání doběhové zkoušky. Mnohonásobným průměrováním jsou eliminovány vibrační projevy, které se při poklesu otáček mění frekvenci, a naopak zdůrazněny ty, které mají stále stejnou frekvenci při různých otáčkách. Jde tedy o odhalení struktury vlastních frekvencí celého kmitajícího mechanického systému. Výrazné vlastní frekvence mohou výrazně ovlivnit průběh doběhové zkoušky. Pokud se kinetická frekvence protne s některou z rezonancí zvýší se její amplituda, tento jev komplikuje případnou diagnostiku závady.

Grafické znázornění rezonančního pozadí se liší i pro stejné typy podvozků. To může být způsobeno uchycením ve zkušebním standu.



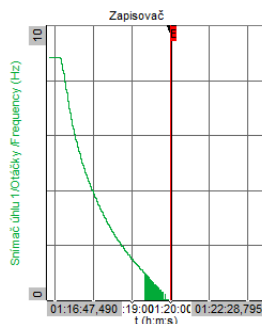
Obr. 32: Frekvenční spektrum rezonančního pozadí podvozek H18, součást přílohy č. 19



Obr. 33: Frekvenční spektrum rezonančního pozadí podvozek H10, součást přílohy č. 11

4.5.2 Doběhová zkouška

Při zkouškách bylo zjištěno, že frekvenční průběh při doběhové zkoušce není lineární, jak by se teoreticky očekávalo u ideálně fungujícího systému.



Obr. 34: Klesající frekvence otáčení dvojkolí během doběhové zkoušky podvozku H21

4.5.3 Řádová analýza

Řádová analýza umožňuje převést frekvenční spektrum vibrací na spektrum harmonických řádů vůči otáčkám dvojkolí. Tato metoda je obzvláště při analýze dat z rozběhových a doběhových zkoušek, kdy se otáčky plynule mění a umožňují identifikaci závislosti vibrací na otáčkách v celém provozním rozsahu.

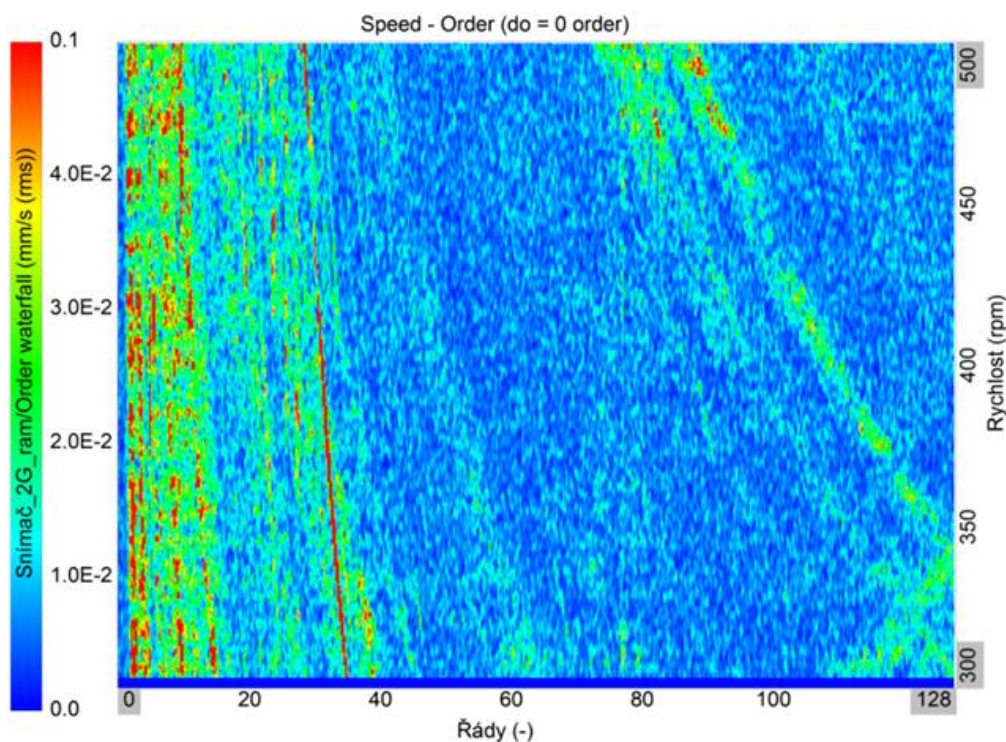
Výstupy řádové analýzy lze interpretovat ve formě:

- Řádového spektra – výhodou tohoto spektra je, že silně potlačeny rezonance, zůstávají pouze informace o stavu rotujících částech měřeného objektu. Je nutno si uvědomit, že hodnota řádu 1 je odvozena od otáček dvojkolí, otáčky trakčního motoru jsou odvozeny od konkrétního převodového poměru. Intenzita řádu byla získána dělením amplitudy řádu celkovou hodnotou vibrací. Celková hodnota vibrací z frekvenčního spektra rezonančního pozadí.



Obr. 35: Řádové spektrum podvozku H10, součást přílohy č. 11

- Řádové multispektrum



Obr. 36: Řádové multispektrum podvozku H10

4.5.4 Řádová analýza doběhu

Stejně jako spektrum rezonančního pozadí průměrem všech frekvenčních spekter nasnímaných při doběhu soustrojí, je řádová analýza doběhu průměrem řádových spekter na všech hodnocených otáčkových hladinách. Lze tedy jediným grafem vyjádřit vibrační chování rotačního soustrojí v širokém rozsahu provozních otáček. Pojem bezrozměrné intenzity řádu jsme zavedli sami do této BP. Jde o hodnoty amplitud řádů (m/s^2) dělené celkovou intenzitou vibrací celého doběhu (m/s^2).

4.6 Shrnutí

Byla úspěšně realizována implementace měřicího řetězce, který umožňuje detailní diagnostiku technického stavu komponent pojezdu. Systém je schopen spolehlivě zaznamenávat a vyhodnocovat vibrace i v náročných provozních podmínkách, což umožňuje přesnější detekci potenciálních mechanických závad. V rámci návrhu i praktického nasazení se podařilo efektivně minimalizovat vlivy elektromagnetického rušení.

Pro zajištění univerzálnosti systému napříč různými typy podvozků a hnacích jednotek se jako nejefektivnější osvědčila metoda tzv. rozběhové a doběhové zkoušky doplněná o následnou řádovou analýzu získaných dat. Tato kombinace umožňuje identifikaci frekvenčně závislých jevů a harmonických složek vibrací v závislosti na otáčkách dvojkolí, což je zvláště užitečné pro diagnostiku poruch mechanických převodových ústrojí, nerovnováhy či nesouososti.

5 VÝSLEDKY

Kapitola prezentuje výsledky měření vibrací provedených na různých typech podvozků. Měření probíhala na pracovišti CZ LOKO a zahrnovala měření vibrací v horizontálním směru na dvou místech, na rámu podvozku a na kostře trakčního motoru. Během zkoušky byly snímány otáčky a teploty ložisek vybavením firmy.

Celkem bylo provedeno 21 měření: dva podvozky řady 774.7, dva podvozky řady 744.1, jedna lokomotiva 794 a šestnáct podvozků ČKD různých typů lokomotiv. Součástí příloh jsou protokoly ke všem měřením, které obsahují informace o podvozku, datum měření, grafy s řádovou analýzou doběhové zkoušky rámu a motoru a v poslední řadě schéma frekvenčního pozadí. Soustředili jsme se primárně na vyhodnocení dat z akcelerometru na rámu podvozku, který vychází ze současných postupů CZ LOKO.

Výsledky všech měření jsou shrnuta ve dvou tabulkách, kde jsou uvedeny průměrné hodnoty vibrací a hluku naměřené vybavením a postupy CZ LOKO, celkové vibrace a přepočítaná amplituda jednotlivých závad. Pokud se daná závada ve spektru neprojeví, buňka je proškrtnuta. V první tabulce jsou data z akcelerometru na rámu podvozku, v druhé jsou výsledky měření z akcelerometru na rámu. Je nutné dodat, že pro hodnocení je důležitá míra amplitudy konkrétní závady.

Označení měření zahrnuje označení podvozku a pořadí provedeného měření.

- H – podvozek ČKD, označení vychází z tvaru rámu podvozku.
- K – podvozek řady 744.1.
- D – pojezd 794, záběh trakčního motoru po montáži na dvojkolí.
- Č – třínápravový podvozek řady 774.7, označení vychází z přezdívky lokomotivy „čmelák“.

Barvy v tabulce symbolizují míru závady (platí pro podvozky ČKD):

- Žlutá – hodnota je vyšší než průměrná amplituda dané závady.
- Modrá – hodnota je vyšší než 1,25krát průměrná amplituda dané závady
- Červená – hodnota je vyšší než 1,5krát průměrná amplituda dané závady

Pro podvozky lokomotiv řady 744.1, 774.7 a 794.0 nebylo možné použít stejnou metodiku, protože nebylo naměřeno dostatečné množství dat, aby bylo možné podvozky mezi sebou porovnávat.

Tab. 4: Tabulka shrnutí všech provedených měření na rámu podvozku

Číslo testu VUT	Průměrné vibrace LOKO	Průměrný hluk LOKO	Celkové vibrace na rámu	Zubová frekvence	Postranní pásma zubové frekvence		Problém uložení dvojkolí	Problém na ložisku motoru	Problém uložení pastorku	Nejvýraznější problém
	mm/s	dB	m/s ²	Intenzita	Intenzita	Příčina	Intenzita	Intenzita	Intenzita	
H1	1,867	96,23	0,598	0,007	-	-	0,040	0,046	0,107	Uložení dvojkolí a pastorku, přední ložisko TM (vnitřní i vnější kroužek)
H2	1,156	91,73	0,594	0,068	0,011	pastorek	0,017	0,057	0,062	Závada na pastorku, přední ložisko TM, uložení pastorku
H3	0,889	89,37	0,440	0,017	0,008	pastorek	0,027	0,026	0,025	Uložení dvojkolí, přední ložisko TM
K4	0,600	83,37	0,402	0,005	-	-	0,017	-	0,020	Uložení dvojkolí a pastorku
K5	0,583	84,38	0,928	0,004	-	-	0,013	0,928	0,047	Uložení dvojkolí a pastorku
Č6	1,567	106,80	0,600	0,054	0,016	pastorek	0,015	0,025	0,007	Přední ložisko TM, uložení pastorku
Č7	1,122	101,87	0,790	0,024	-	-	0,057	0,029	0,053	Přední ložisko TM, uložení dvojkolí
H8	1,244	88,82	0,879	0,085	0,007	pastorek	0,031	0,027	0,124	Uložení pastorku
H9	1,544	91,92	0,841	0,068	0,012	pastorek	0,052	0,037	0,057	Uložení dvojkolí a pastorku
H10	2,478	95,83	0,604	0,017	-	-	0,035	0,017	0,043	Uložení pastorku
H11	1,833	94,86	1,547	0,024	0,071	pastorek	0,071	0,094	0,207	Uložení pastorku, závada na pastorku
H12	1,410	92,76	0,757	0,011	0,036	pastorek	0,037	0,054	0,224	Závada na pastorku, závada na ozubeném kole

D13	1,756	90,63	0,613	0,024	-	-	0,033	0,030	0,091	Uložení pastorku, řád 58,5
H14	1,633	94,00	1,093	0,032	-	harmonická ložiska	0,013	0,360	-	Závada na vnějším ložisku TM
H15	1,867	93,40	0,561	0,012	-	-	0,045	0,039	-	Uložení dvojkolí, přední ložisko TM
H16	1,389	93,00	0,640	0,007	-	harmonická ložiska	0,030	0,155	0,064	Závada na vnějším ložisku TM, uložení pastorku
H17	1,578	92,73	0,578	0,004	-	-	-	0,268	0,061	Závada na vnějším ložisku TM, uložení pastorku
H18	1,689	93,87	0,577	0,014	0,006	pastorek	0,069	0,035	0,077	Uložení dvojkolí, závada pravého ložiska TM
H19	1,389	94,17	0,546	0,058	0,047	kolo	0,025	0,040	0,053	Uložení pastorku, přední ložisko TM
H20	1,978	91,97	0,736	0,033	0,013	pastorek	0,054	0,014	0,060	Závady na ozubeném kole a vnějším ložisku TM, uložení pastorku
H21	1,211	90,03	0,555	0,032	0,013	pastorek	0,018	0,061	0,045	Uložení dvojkolí a pastorku, závada na pastorku
H22	0,917	90,07	0,455	0,477	0,100	pastorek	-	1,377	0,173	Nesouosost TM a dvojkolí
H23	1,028	89,77	0,447	0,228	0,080	pastorek	-	0,150	0,084	Opotřebení ozubených kol
H24	3,944	90,77	0,771	0,016	0,009	kolo	0,092	0,101	0,098	Závada na předním ložisku TM, nesouosost
H25	0,978	90,15	0,952	0,072	0,054	pastorek	0,039	0,557	0,212	Závada na předním ložisku TM
H26	1,578	84,23	0,544	0,076	-	-	-	0,244	0,188	Nesouosost TM a dvojkolí
H27	0,700	85,10	1,496	0,087	0,097	kolo	0,028	0,133	0,179	Nesouosost TM a dvojkolí, nevývaha TM
H28	1,172	96,50	0,506	0,068	0,043	pastorek	-	0,702	0,527	Závada na předním ložisku TM, nesouosost

Tab. 5: Tabulka shrnutí všech provedených měření na kostře trakčního motoru

Číslo testu VUT	Celkové vibrace na motoru	Zubová frekvence	Postranní pásma					Problém na ložisku motoru	Problém uložení pastorku	Hodnocení vibrací motor	Bylo měření na motoru užitečné
	m/s2	Intenzita	Řád	Intenzita	Příčina	Intenzita	Příčina	Intenzita	Intenzita		
H1	3,791	0,300	81,75	0,146	pastorek	-	-	0,413	0,654	Uložení pastorku, přední ložisko TM	ano
H2	8,137	1,028	72,25	0,265	pastorek	-	-	0,547	0,845	Závada pastorku, přední ložisko TM	ne
H3	3,335	0,183	81,75	0,063	pastorek	-	-	0,125	0,090	Přední ložisko TM, uložení pastorku	ne
K4	2,276	0,026	-	-	-	-	-	0,077	0,113	Uložení pastorku	ne
K5	11,790	0,085	-	-	-	0,070	kolo	0,053	0,047	Uložení pastorku, závada na oz. Kole	ano
Č6	12,731	3,406	81,125	0,299	pastorek	0,277	kolo	-	0,201	Závada pastorku a oz. kola	ano
Č7	10,567	2,162	81,125	0,202	pastorek	0,188	kolo	-	0,098	Závada pastorku a oz. kola	ano
H8	9,694	0,243	82	0,255	pastorek	0,150	kolo	0,088	0,346	Závada pastorku, přední ložisko TM	ano
H9	21,381	0,881	81,75	0,164	pastorek	0,173	kolo	0,099	0,245	Závada pastorku a oz. kola	ano
H10	11,459	0,181	81,875	0,301	pastorek	-	-	0,164	0,553	Závada pastorku (může být navýšena ložiskem), přední ložisko TM	ne
H11	6,365	0,551	81,875	0,210	pastorek	0,060	kolo	0,615	0,195	Závada pastorku, přední ložisko TM	ne
H12	4,725	0,299	81,875	0,137	pastorek	0,059	kolo	0,511	0,016	-	ano

D13	2,519	0,042	-	-	-	-	-	0,759	0,128	-	ne
H14	2,955	0,026	81,625	-	harmonická ložisko TM	-	-	0,496	0,024	Přední ložisko TM 1-3 harmonická	ne
H15	3,739	0,063	-	-	-	-	-	0,163	0,063	Uložení pastorku, přední ložisko TM	ano
H16	4,245	0,125	81,875	0,050	pastorek	-	-	0,854	-	Přední ložisko TM	ne
H17	4,376	0,398	81,875	-	harmonická ložisko TM	-	-	1,441	0,119	-	ne
H18	4,228	0,076	81,875	0,223	pastorek	-	-	0,142	0,221	Závada na pastorku, uložení pastorku	ano
H19	3,829	1,003	81,875	0,232	pastorek	0,858	kolo	0,384	0,241	Závada na oz. kole i pastorku, přední ložisko TM	ne
H20	3,386	0,403	81,875	0,050	pastorek	0,031	kolo	0,313	0,082	Závada pastorku, uložení pastorku	ne
H21	13,205	0,405	81,75	0,480	pastorek	-	-	0,193	0,335	Závada pastorku, přední ložisko TM	ne
H22	3,555	0,013	-	-	-	-	-	0,070	0,098	Nesouosost TM a dvojkolí	ne
H23	3,021	0,008	-	-	-	-	-	0,021	0,053	-	ne
H24	4,187	0,205	72,25	0,118	pastorek	-	-	0,705	0,105	Opotřeбенé přední ložisko TM	ne
H25	4,024	0,008	-	-	-	-	-	0,063	0,028	-	ne
K26	5,376	0,004	-	-	-	-	-	0,008	0,032	-	ne
K27	12,225	0,003	-	-	-	0,005	kolo	0,007	0,080	Nesouosost TM a dvojkolí	ne
H28	4,855	0,006	-	-	-	-	-	0,075	0,053	Nesouosost TM a dvojkolí	ne

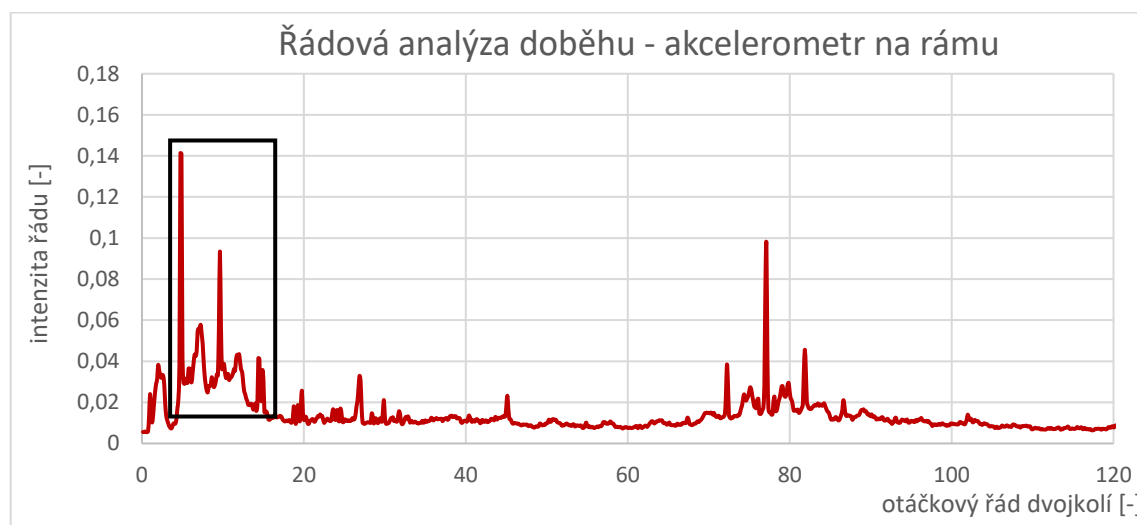
5.1 Podvozky ČKD

Podvozky typu ČKD měli ve většině případů nové ozubené převody se zubovou vůlí 0,25 mm. Původní ozubené převody byly u měření H8, H9 a H19. Převod mezi motorem a dvojkolím má přímé ozubení a převodový poměr 77:16. Průměrná axiální vůle ozubeného kola byla 1,401 mm. Radiální vůle v tlapových ložiskách se pohybovala v rozmezí od 0,55 mm do 0,6 mm.

V dalších kapitolách jsou popsány typické závady, se kterými jsme se během měření setkali.

5.1.1 Špatné uložení pastorku

U podvozků ČKD se špatné uložení pastorku projevuje na řádu 4,8 a jeho násobcích. Závada může vzniknout špatnou montáží pastorku na hřídel motoru nebo nesouosostí tlap. Nemůžeme přesně určit, zda se závada vyskytla u jednoho nebo obou pastorků. Průběh řádové analýzy záznamu z akcelerometru na rámu mohl potvrdit nebo vyvrátit závadu minimálně u jednoho z pastorků. Pokud se závada vyskytla na záznamu z motoru, potvrdilo se špatné uložení minimálně na jednom z pastorků. Pokud ne závada byla na nápravě neosazené snímačem vibrací (tento jev nastal u zkoušky H12).



Obr. 37: Graf doběhové zkoušky z rámu H11, součást přílohy č. 12

5.1.2 Uložení dvojkolí

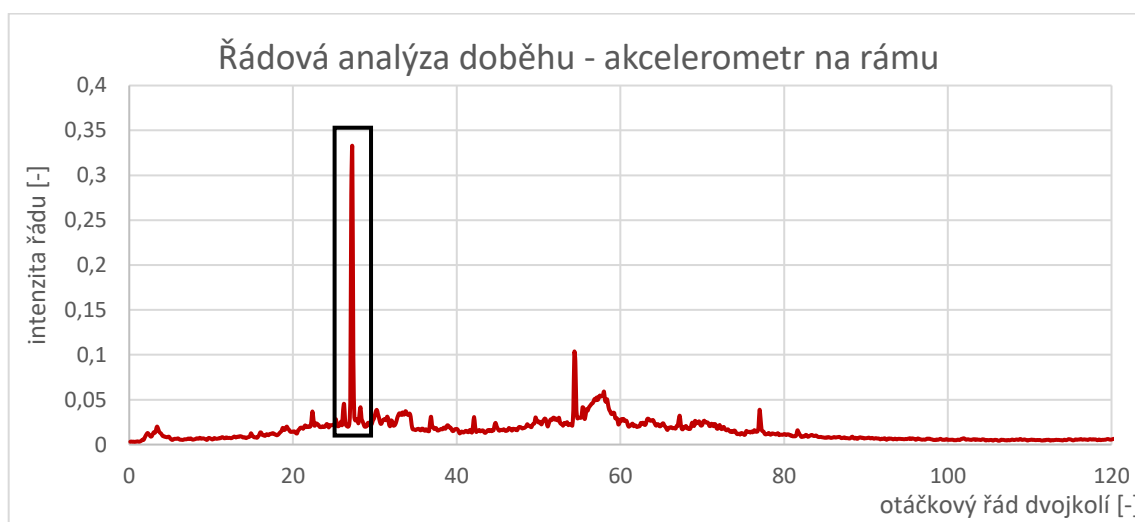
Problém s uložením dvojkolí se projevuje na nízkých řádek (1, 2, 3). Závada může být způsobena nevývahou nebo špatným uložením na trakčním motoru.



Obr. 38: Graf doběhové zkoušky z rámu H15, součást přílohy č. 16

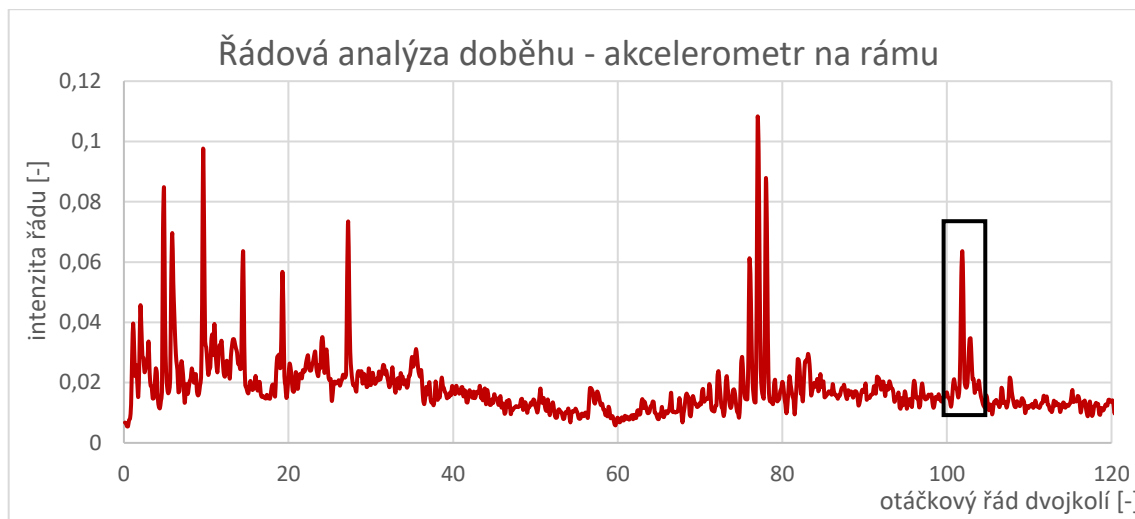
5.1.3 Porucha vnějšího kroužku ložisek trakčních motorů

Poškození vnějšího kroužku ložisek trakčních motorů se projevuje u vnitřního ložiska na řádu 15, u vnějšího na řádu 27. Závadu bylo možné pozorovat na záznamu z rámu i motoru. Měření akcelerometrem na motoru pouze potvrdilo poruchu minimálně na jednom z motorů.

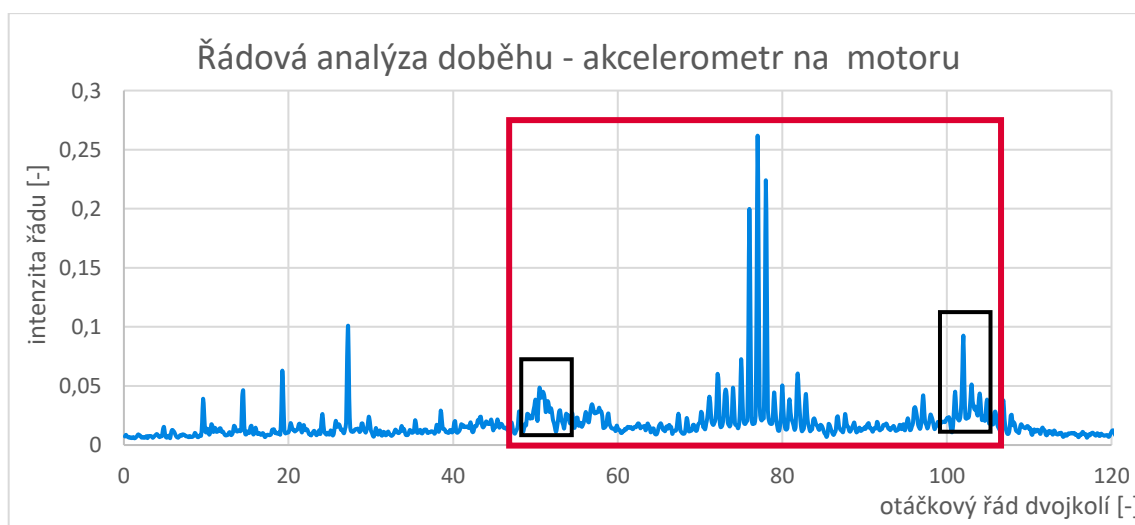


Obr. 39: Graf doběhové zkoušky z rámu H14, součást přílohy č. 15

U doběhové zkoušky H19, příloha xy, můžeme pozorovat zvýšenou hodnotu na řádu 102, kterou je možné pozorovat i na motoru. Na záznamu z rámu není zřejmá příčina, ale ze záznamu na motoru je viditelná zvýšená amplituda na řádu 50,875, tento řád neodpovídá žádné známé závadě. Obě hodnoty jsou však v podobné vzdálenosti od zubové frekvence (25-27 řádů), jsou součástí postranního pásma, které způsobilo poškození ložiska.



Obr. 40: Graf doběhové zkoušky z rámu H19, součást přílohy č. 20



Obr. 41: Graf doběhové zkoušky z motoru H19, součást přílohy č. 20

5.1.4 Závady ozubených převodů

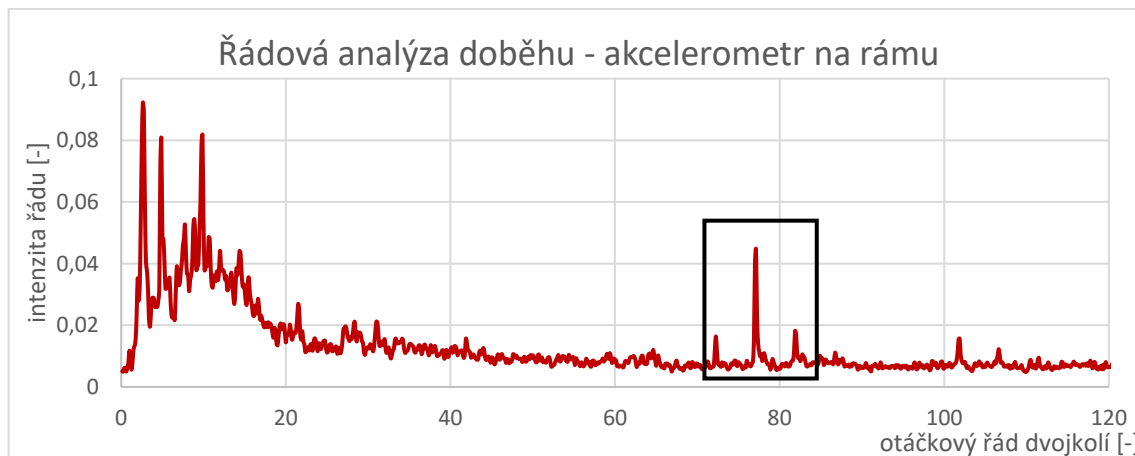
Zubová frekvence odpovídá řádu 77, zvýšená amplituda na tomto řádu značí opotřebení. Postranní pásma vznikají modulací signálu.

Závady ozubeného kola se projevují v postranním pásmu v na řádu jedna, který odpovídá otáčkové frekvenci.



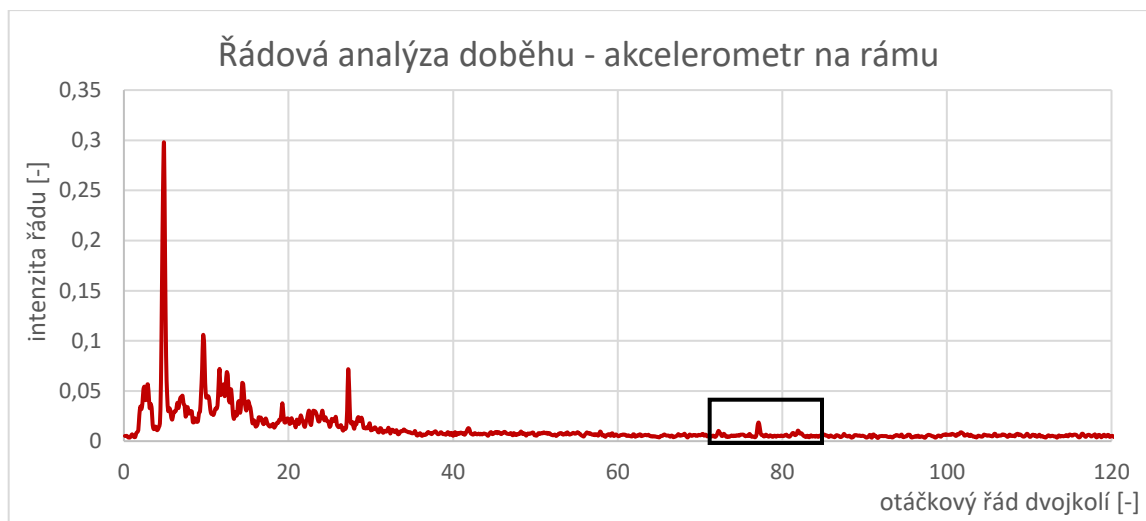
Obr. 42: Graf doběhové zkoušky z rámu H19, součást přílohy č. 20

Závady na pastorku se projevují ve vzdálenosti 4,8 od řádu 77.

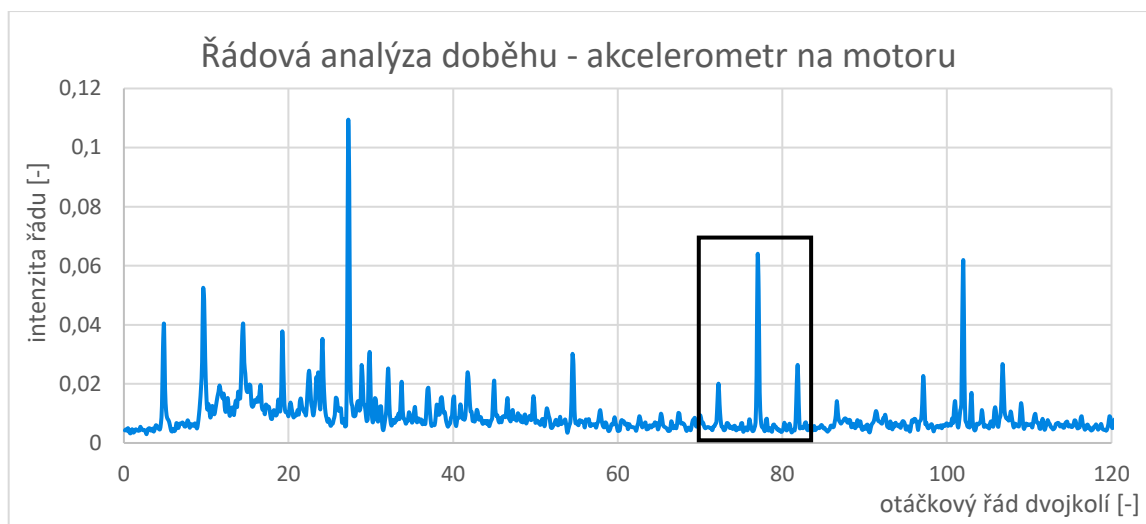


Obr. 43: Graf doběhové zkoušky z rámu H20, součást přílohy č. 21

Pokud je závada na ozubeném spektru nepatrná, záznam na motoru je schopen ji upřesnit. Z měření na rámu vychází H10 jako podvozek se špatně uloženým pastorkem a poruchou na vnějším kroužku pravého ložiska motoru. Tyto závady se projeví i na motoru s vyššími amplitudami. Jako velký problém se zde ukazuje vysoká amplituda ozubeného převodu s postranním pásmem indikujícím závadu na pastorku.



Obr. 44: Graf doběhové zkoušky z rámu H10, součást přílohy č. 11

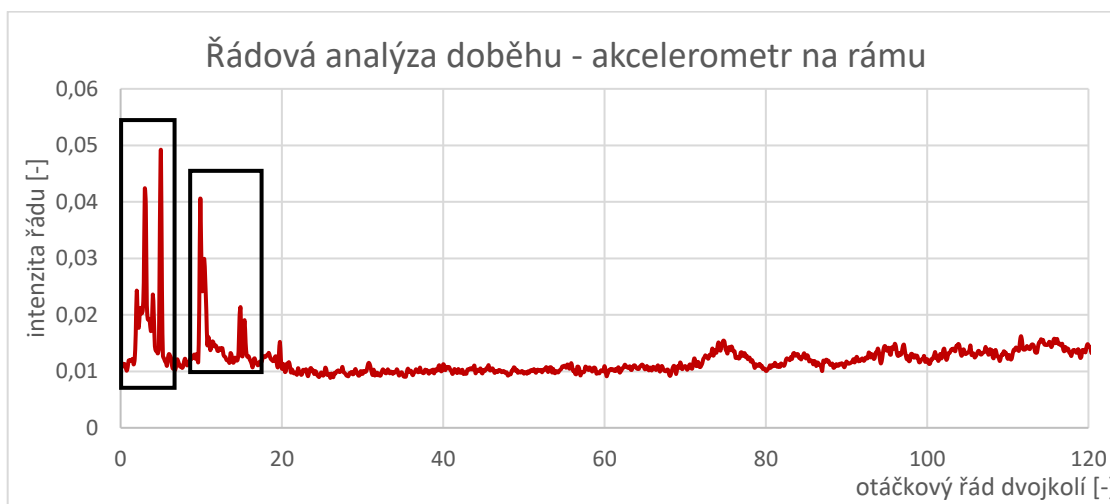


Obr. 45: Graf doběhové zkoušky z motoru H10, součást přílohy č. 11

5.2 Podvozky řady 744.1

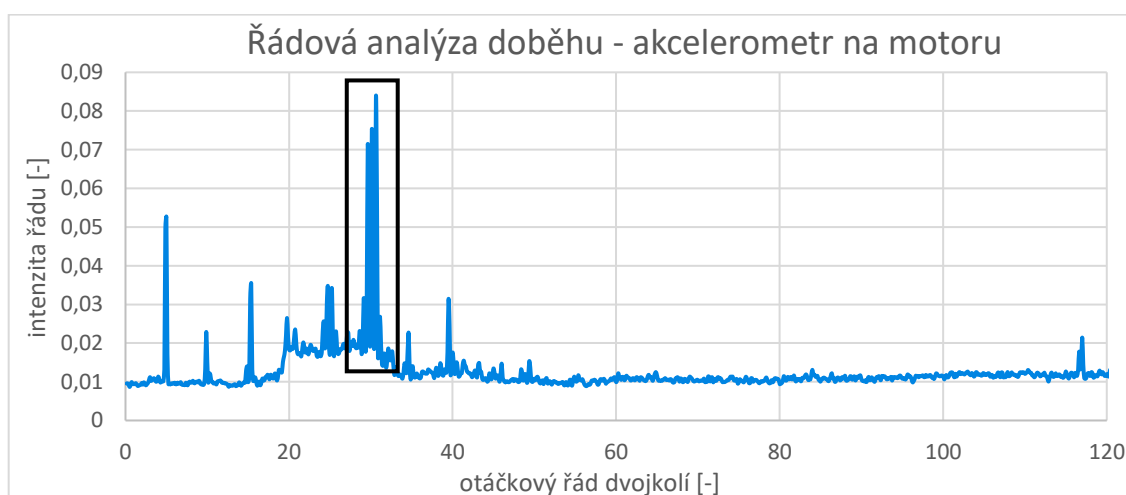
Podvozky řady 744.1 jsou novější než podvozky ČKD, pokud se nejedná o nehodu, začíná v CZ LOKO jejich údržba po 6 letech provozu. Dvojkolí a trakční motor se demontují až po 12 letech provozu.

Z analýzy doběhové zkoušky je vidět, že amplituda vibrací je nižší než u ČKD podvozků. Na řádu 2 a 3 je závada spojená s nevývahou dvojkolí. Na grafu se neprojevuje ozubený převod, během záběhu je bez zátěže, není poškozen. Na řádu 5, 10 a 15 je vidět problém s uložením pastorku.

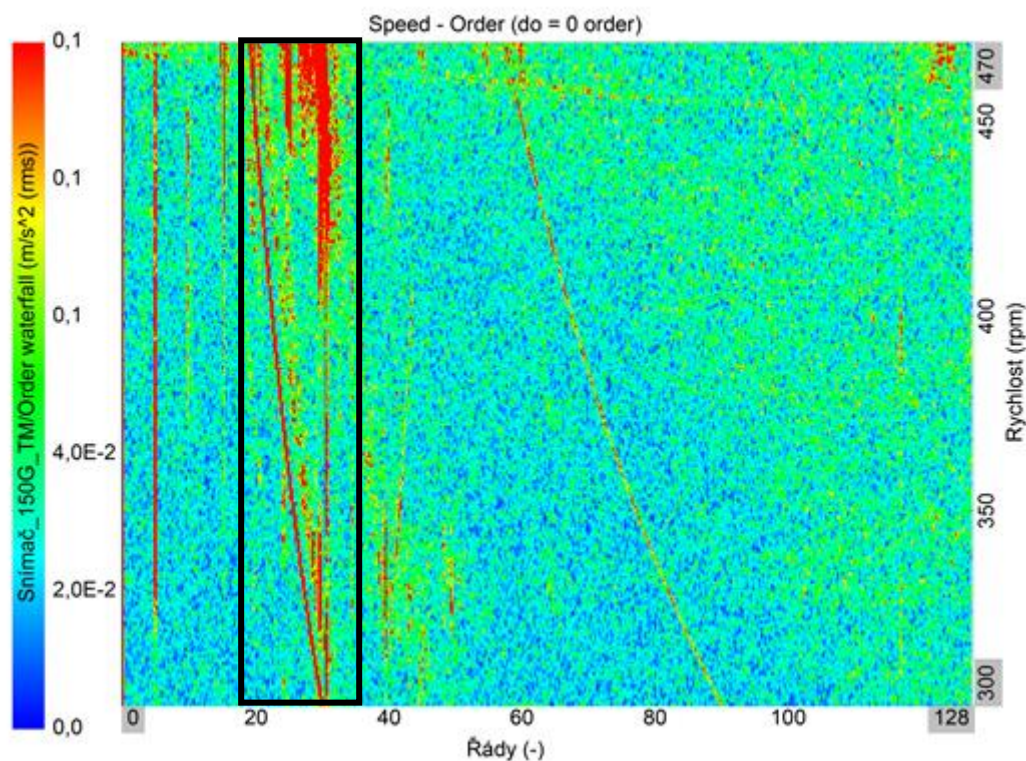


Obr. 46: Graf doběhové zkoušky z rámu K4, součást přílohy č. 5

Na záznamu z motoru dochází k viditelnému rušení signálu, způsobeném rezonancí. Protnutí kinematické frekvence ložiska s rezonancí systému, což způsobilo navýšení amplitudy a zkreslení. Zkreslení hodnot mezi řády 20 až 40 komplikuje diagnostiku závady ložisek.

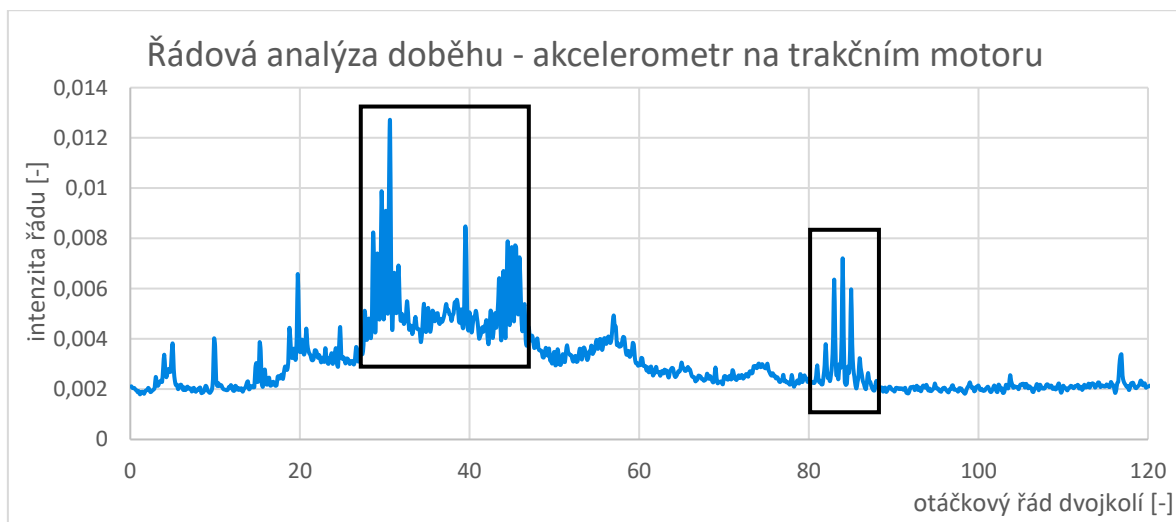


Obr. 47: Graf doběhové zkoušky z motoru K4, součást přílohy č. 5

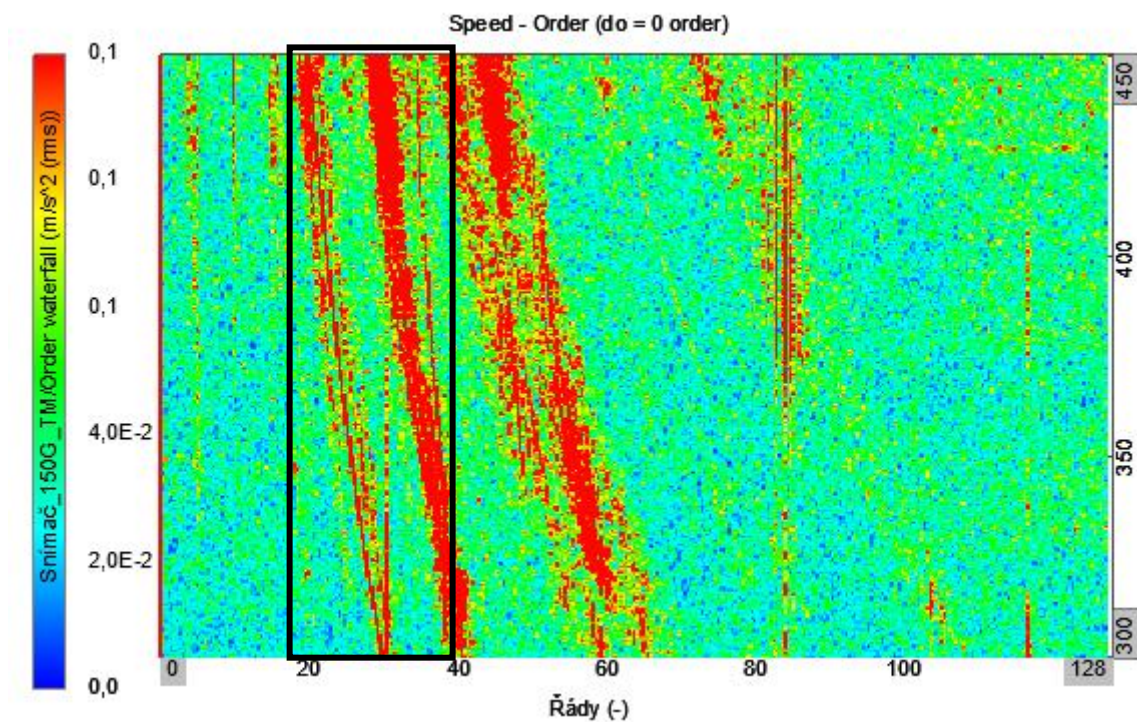


Obr. 48: Řádová analýza K4 zobrazená v multispektru

U měřeného podvozku byla rezonance vyšší. V tomto případě mohl být podvozek ve zkušebním standu méně dotažen. Na tomto podvozku se ve spektru akcelerometru umístěném na rámu ozubený převod vůbec neprojevil, zatímco v záznamu z motoru je možné pozorovat postranní pásmo zubové frekvence způsobené závadou na ozubeném kole.

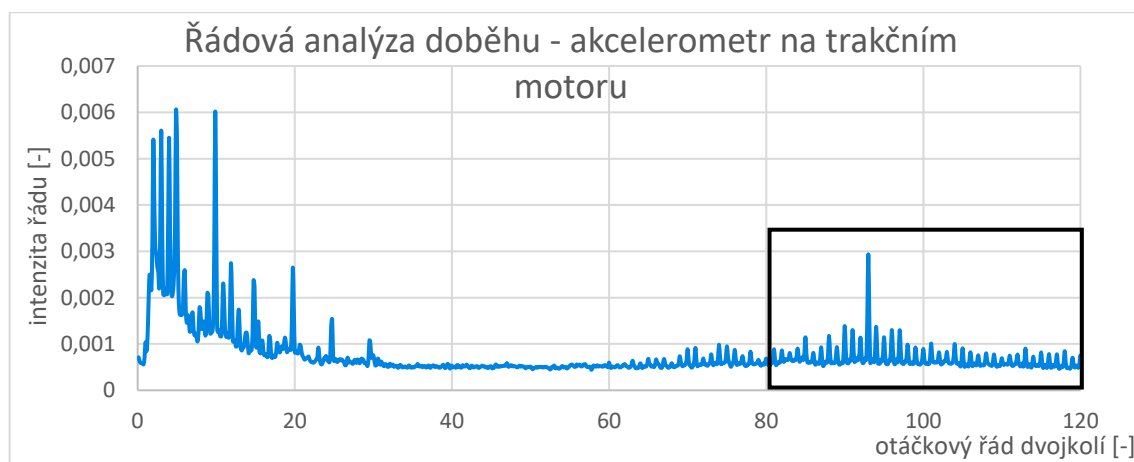


Obr. 49: Graf doběhové zkoušky z motoru K5, součást přílohy č. 6



Obr. 50: Řádová analýza K5 zobrazená v multispektru

U některých u podvozků 744.1 docházelo k výraznému nárůstu amplitud ve vyšších frekvencích. Tyto jevy se projevovali jako ostré lokální extrémy, které poukazují na rezonance samotného systému. Může to být způsobeno špatným dotažením podvozku ve zkušebním standu.

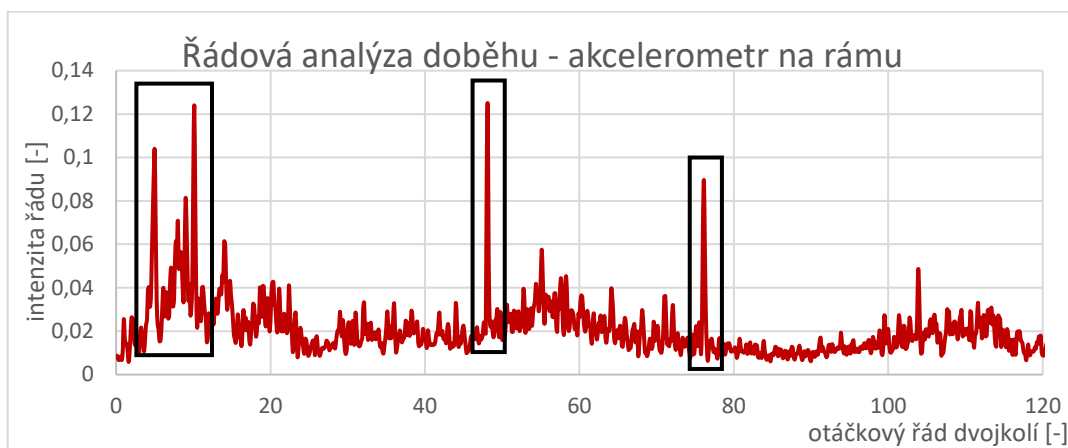


Obr. 51: Graf doběhové zkoušky z motoru K26, součást přílohy č. 27

5.3 Třínápravový podvozek

U měřených podvozků byly ponechány původní ozubené převody. Axiální vůle ozubeného kola byla 1 mm, radiální vůle v obou tlapových ložiskách byla v průměru 0,55 mm. Podvozky dosahovali vyššího hluku než ostatní podvozky.

Během záběhu se projevilo špatné uložení dvojkolí a pastorku, dále se projevovala závada ložiska a opotřebení ozubených převodů na řádu 76.



Obr. 52: Graf doběhové zkoušky z rámu Č6, součást přílohy č. 7

6 DISKUZE

Ke každému měření byl vypracován protokol, jehož součástí jsou základní informace o podvozku, datum měření, řádové analýzy dobehové zkoušky z rámu i motoru a spektrum rezonančního pozadí. Protokoly jsou součástí příloh.

6.1 Shrnutí výsledků měření

Největším problémem se ukázalo být uložení trakčního motoru na dvojkolí, které následně může zapříčinit nadměrné opotřebení ozubeného převodu. Množství podvozků vykazovalo počínající závadu na vnějším kroužku pravého ložiska v trakčních motorech.

Měření na motoru bylo pouze v několika případech. Ve všech těchto případech byl ponechán původní ozubení, které bylo silně opotřebeno. Trakčním motorům nebylo v této práci věnováno moc času, protože motory prochází samostatnou vibrodiagnostickou zkouškou. Závady motorů jako nevývaha, souosost i poškození ložiska, by mělo být vyhodnoceno a opraveno dříve, než je motor namontován do podvozku.

6.2 Výzkumné otázky a hypotézy

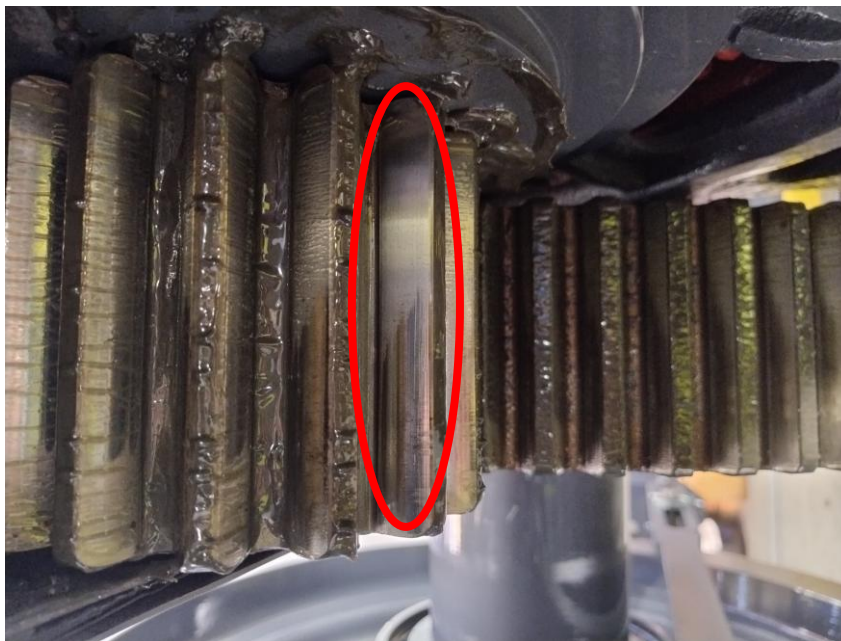
Odpověď na první výzkumnou otázku „Může rozšíření diagnostické metody o oblast FFT přispět k upřesnění diagnózy technického stavu podvozků během jejich záběhu?“ je ano. Rozšíření o FFT diagnostické metody umožňuje určit technický stav podvozku, diagnostikovat závadu, odhadnout místo závady (pro zlepšení by bylo nutné více akcelerometrů). Hypotéza číslo 1 byla potvrzena.

Odpověď na druhou výzkumnou otázku „Bude možné použít FFT analýzu s využitím stávajícího měřicího řetězce, bez jeho změn nebo zásadních úprav?“ je ne. Stávající měřicí systém by musel projít sérií úprav: vytypovat snímače absolutní hodnoty vibrací, vyšší vzorkovací frekvence, vyšší frekvenční rozsah, odstínění kabeláže, sjednocení zemních bodů. Hypotéza číslo 2 byla též potvrzena.

6.3 Odhalení závady během záběhu

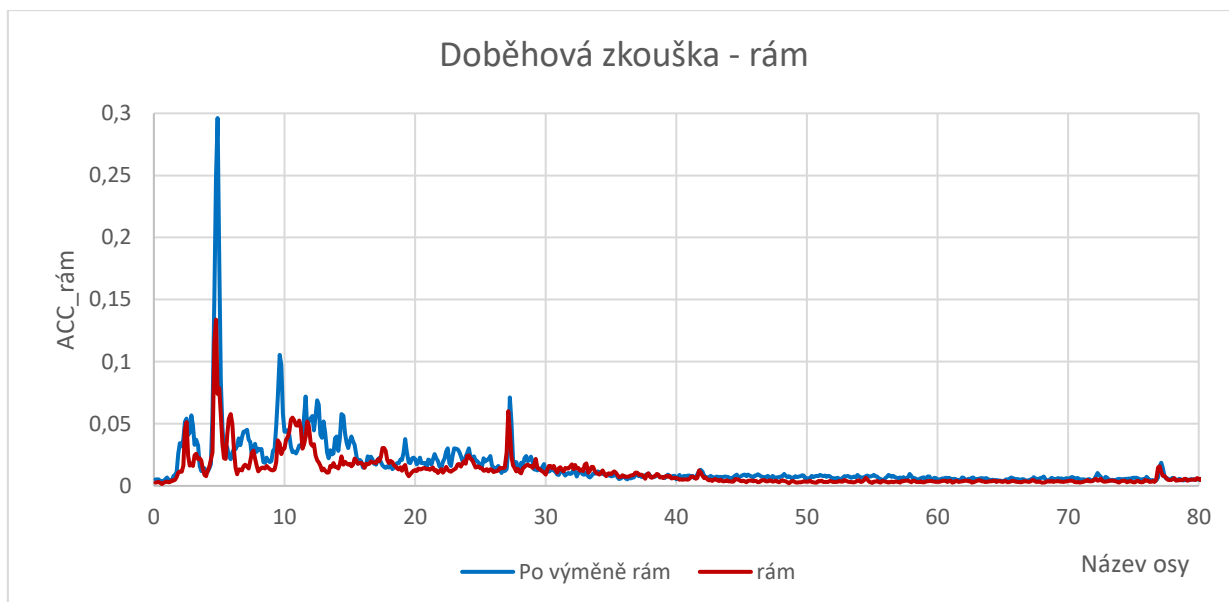
V současnosti je přesné určení závad poměrně náročný proces. Pokud se během záběhu projeví vysoká hlučnost, přehřívání komponent nebo zvýšené vibrace, obsluha zkušebny kontaktuje kolegy z oddělení kvality a technologie. Společně zhodnotí stav podle svých zkušeností a společně rozhodnou o dalším postupu. Oprava závady pak spočívá v demontáži dvojkolí a trakčního motoru, následných měření a případné výměně dílů. V některých případech se nepodaří závadu správně lokalizovat ihned při prvním pokusu a je nutné demontáž a diagnostiku závady opakovat.

Tento problém nastal u jednoho z měření, při prvním záběhu podvozku s označením H11 byly zvýšené teploty na tlakových ložiscích, způsobeny přehříváním zákrytu ozubeného převodu. Po demontáži zákrytu bylo odhaleno poškození boků zubů a nerovnoměrný záběh převodu. Ozubené kolo i pastorek byly v rámci opravy vyměněny za nové.

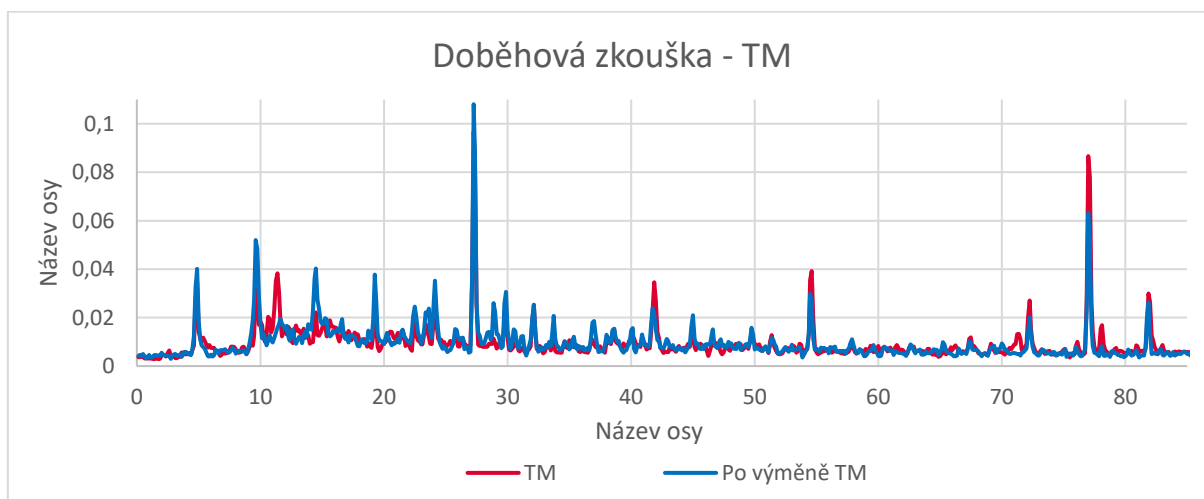


Obr. 53: Nerovnoměrně zaběhnuté ozubené kolo na podvozku H11

Po konzultaci zaměstnanců kvality a technologie byl stanoven následující postup opravy, výměna pastorku a zopakování záběhu. Oba záběhy jsou zaznamenány včetně doběhové zkoušky a je z nich vytvořena řádová analýza. Data jsou pro porovnání vložena v jednom grafu Obr. 54 a Obr. 55.



Obr. 54: Doběhová zkouška H11 a H12 standartní záběh a opakovaný záběh po výměně pastorku, záznam na rámu



Obr. 55: Doběhová zkouška H11 a H12 standartní záběh a opakovaný záběh po výměně pastorku, záznam na motoru

Před výměnou pastorku se nejvíce projevila porucha předního ložiska trakčního motoru umístěného na straně pastorku. Projev této závady je patrný i ve druhé a třetí harmonické frekvenci. Třetí harmonická frekvence je součástí postranního pásma zubové frekvence. Postranní pásmo není zcela symetrické což odpovídá nesouososti hřídelů. Nesouosost se potvrdila v první, druhé a třetí harmonické frekvenci trakčního motoru.

Po výměně pastorku se zlepšily akustické projevy, nedocházelo k tak výraznému zvýšení teploty. Z analýzy je vidět, že amplituda zubové frekvence a její postranní pásma se snížila. Výrazně se zvýšily amplitudy první, druhé a třetí harmonické frekvence motoru na snímači umístěném na rámu podvozku.

Tato situace je příkladem toho, že diagnostika na základě individuálních zkušeností, nemusí vést ke správné opravě. Dochází k opravě problému, který nebyl příčinou zvýšeného hluku nebo vibrací. Odhalením závady v průběhu záběhové zkoušky je možné výrazně ušetřit a finanční prostředky a zároveň je jednodušší navrhnout a zaplánovat postup opravy. Za předpokladu použití vhodného a odladěného diagnostického procesu lze spatřovat další přínos v nižších nárocích kladených na zkušenosti pracovníků provádějících diagnostiku. Naměřená a vyhodnocená data pak mohou sloužit jako podklad pro zákazníka za účelem prokázání kvality zpracování podvozků.

6.4 Diskuse se zaměstnanci CZ LOKO

Zaměstnanci z oddělení engeneeringu vidí největší potenciál vibrodiagnostického systému v rychlém zjištění závad pojezdu u lokomotiv po nehodách. Podvozek je možné umístit do zkušebny na krátký čas, během kterého se podvozek roztočí na maximální otáčky a poté zpomalí. Následně se provede analýza naměřených dat a vyhodnotí se technický stav podvozku.

Oddělení kvality oceňuje snadné a přesné vyhodnocení technického stavu, které se nespolehá pouze na zkušenosti zaměstnanců. Nastavení limit pro vibrace a hluk vedlo k navýšení kontrol během záběhu a pomohlo ke snížení nákladů na reklamace.

Zaměstnanci CZ LOKO provádějící opravy znají díky prováděné diagnostice přesnou příčinu závady. Díky tomu nemusejí po této závadě pátrat a mohou pracovat přímo na jejím odstranění. To vede k úspoře času odstavení vozidel a samotných oprav a v končeném důsledku k finančním úsporám.

7 ZÁVĚR

V rešeršní části práce byly systematicky představeny základy vibrodiagnostiky. Popsány byly jednotlivé typy snímačů, pozornost byla věnována vlivu způsobu uchycení kvalitu signálu. Dále byly popsány běžné metody zpracování signálů a stručný popis závad, které můžeme u podvozků očekávat. Nedílnou součástí bylo podrobné seznámení s konstrukcí podvozků používaných společnostmi CZ LOKO. Na základě dostupné dokumentace byly pro jednotlivé podvozky vytvořeny specifikace obsahující výpočty základních kinematických frekvencí komponent pro různé rychlosti. Později byly frekvence přepočteny na řady dvojkolí.

V praktické části práce byla popsána zkušebna firmy CZ LOKO, včetně postupů měření a způsobu vyhodnocení. Na základě analýzy současných postupů byly formulovány výzkumné otázky a pracovní hypotézy. Bylo zjištěno, že i když aktuálně používané metody splňují předpisy pro opravy kolejových vozidel, pro diagnostiku technického stavu jsou nevhodné. Z tohoto důvodu byl stanoven hlavní cíl práce – návrh a realizace diagnostického měřicího řetězce, který nijak nezasahuje do stávajících postupů firmy.

Navržený a experimentálně ověřený měřicí řetězec byl sestaven z komponent zapůjčených Ústavem konstruování, konkrétně měřicí karty a dvou akcelerometrů. V rámci návrhu byly implementovány prvky minimalizující negativní vliv elektromagnetického rušení, které výrazně ovlivňovalo kvalitu záznamu. Systém byl ověřen při měření kompletního záběhu trvajícím více než dvě hodiny, přičemž se ukázalo, že záznam takového rozsahu má vysoké nároky nejen na hardware, ale i na následné vyhodnocení dat. Bylo otestováno ještě několik metod analýzy, například identifikace jednotlivých špiček ve frekvenčním spektru při konstantní rychlosti. Všechny návrhy na analýzu se soustředily na konstantní rychlost, během této části záběhu dochází k rušení způsobené pravděpodobně galvanickým meziobvodem. Řešení poskytla doběhová zkouška, měření začalo ve chvíli, kdy byl odpojen motor a skončilo zastavením dvojkolí. Pro názornou interpretaci dat byla zvolena řádová analýza zobrazena v XY grafu, nejsou zde zobrazeny rezonance. Pro vizualizaci průběhu rezonancí bylo zvoleno spektrum rezonančního pozadí.

Celkem se podařilo realizovat 21 měření tří typů podvozků (podvozků ČKD, řady 744.1 a řady 774.7). Záznamy byly analyzovány pomocí řádové analýzy z doběhové zkoušky. Po odstranění rušení, odstínění veškeré senzoriky a sjednocení zemnicích bodů by navíc bylo možné využít i doběhovou část cyklu (záznamy podvozků H8 a H9). Primární soustředění bylo na záznamy z akcelerometru umístěném na rámu (stávající umístění snímače CZ LOKO), měření na jednom z motorů bylo doplňkové pro upřesnění místa závady. Nakonec toto měření mělo přínos pro novější typy podvozků a šikmé ozubení, kde amplitudy poruch nedosahovaly vysokých hodnot.

Nejvíce se projevíly závady na vnějším kroužku pravého ložiska v trakčním motoru (nachází se na straně ozubeného převodu). Tato závada se projevovala na rámu i na motoru. Další častou závadou bylo špatné uložení pastorku, což se v některých případech projevovalo i v postranním pásnu zubové frekvence.

7.1 Doporučení pro CZ LOKO

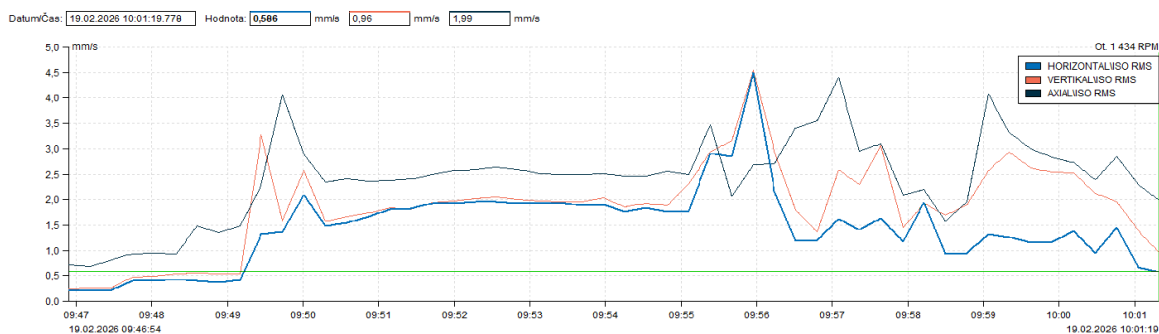
Po vyhodnocení záznamů vyplývá, že úprava měřicího řetězce, by pro firmu měla velký přínos. Stávající zkušební stand je dobrým základem, ale v diagnostické části je prostor pro inovace.

CZ LOKO má propracovaný diagnostický systém pro diagnostiku technického stavu trakčních motorů, který je sestaven z komponent od firmy ADASH. Vibrodiagnostika trakčních motorů využívá šesnáctikanálová měřicí ústředna A3716 2U s otáčkovými sondami a akcelerometry. Konkrétně akcelerometry ..., umístěných na ložiskách motoru ve 3 směrech (horizontálním, vertikálním a axiálním). Vyhodnocení záznamů probíhá v softwaru DDS také od firmy ADASH.

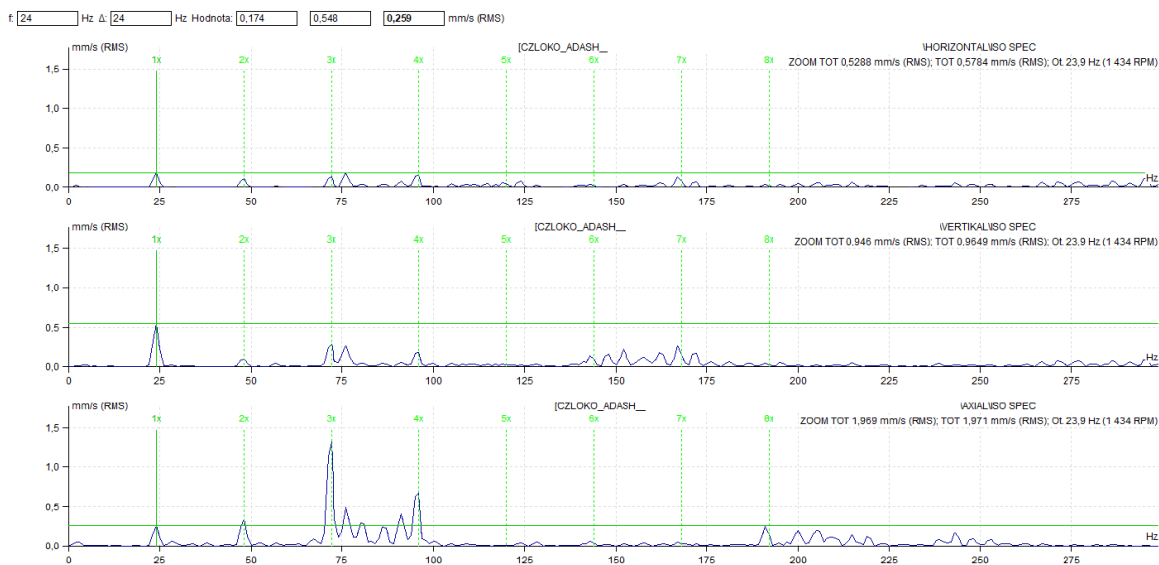
Pro zkušebnu podvozků by byl využit stejný měřicí ústředna A3716 2U, dále zobrazovací jednotky, dvou otáčkových sond, osmi teplotních čidel (DC) a 12 snímačů zrychlení s citlivostí 100 mV/g (AC). Snímače zrychlení by byly umístěny ve vertikálním směru pomocí prizmatických magnetů na tlapových ložiskách (4), na trakčním motoru (2) a ve třech směrech na rámu podvozku (3). V budoucnu by mohla diagnostika být rozšířena o další akcelerometry na ložiskách na trakčních motorech. Pro začátek by stačilo devět akcelerometrů a závady na ložiskách motorů odhalit při diagnostice motorů. Záznamy by se vyhodnocovali v softwaru DDS pomocí analýzy širokopásmových RMS a Peak-Peak hodnot, časové a spektrální analýzy a závady na ložiskách pomocí analýzy obálky.



Obr. 56: Měřicí ústředna ADASH A3716 2U [20]



Obr. 57: Ukázka průběhu RMS hodnot na kuličkovém ložisku TM



Obr. 58: Ukázka ISO Specifikace pro rychlost

Po realizaci měřícího řetězce bych doporučila provést několik referenčních měření pro nastavení tzv. semaforu, a po nějakém čase, kdy bude měření aktivně využíváno aktualizovat. Díky tomu bude možné dlouhodobě sledovat technický stav a také více se zaměřit na podvozky, které překročí stanovené hranice. Například nevývaha se bude u motoru nacházet vždy, negativní vliv na chod motoru má až po překročení určité amplitudy.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Optimální rozsahy vibračních veličin*. Online. In: Ekosoftware.cz. Červen 2016. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/vibrace-merene-veliciny>. [cit. 2025-05-18].
2. *Vliv způsobu uchycení snímače na jeho amplitudovou frekvenční charakteristiku*. Online. In: AUTOMA. 2010. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>. [cit. 2025-05-22].
3. TŮMA, Zdeněk. *Senzory a měřicí technika*. 2. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2013. ISBN 978-80-7300-320-3. [cit. 2025-05-18].
4. KREIDL, Marcel a ŠMÍDL, Radislav. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 2006. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 978-80-7300-158-2.
5. HELEBRANT, František a ZIEGLER, Jiří. *Technická diagnostika a spolehlivost II*. Online. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0650-9. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/.content/galerie-souboru/vyuka/Technicka-diagnostika-II-Vibrodiagnostika-skripta.pdf>. [cit. 2025-05-18].
6. *Motorová lokomotiva řady 742.7: Návod na údržbu*. Česká Třebová, 2011. [cit. 2025-05-20].
7. *Motorová lokomotiva řady 744.1: Návod na údržbu*. Česká Třebová, 2018. [cit. 2025-05-20].
8. *Motorové lokomotivy řad 741.7 a 742.7: Technická specifikace*. 2014. Česká Třebová, 2014. [cit. 2025-05-20].
9. *Motorová lokomotiva řady 744.1: Technické podmínky*. 2018. Česká Třebová, 2018. [cit. 2025-05-20].
10. *Motorová lokomotiva řady 774.7: Technický popis*. 2008. 2008. [cit. 2025-05-20].
11. *Předpis pro opravy střídavých elektrických lokomotiv*. 1977. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1979. [cit. 2025-05-20].
12. *Předpis pro periodické opravy elektrických lokomotiv stejnosměrných*. 1981. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1983. [cit. 2025-05-20].
13. . *Záběhu podvozku CZ LOKO: Protokol*. 2025. Česká Třebová, 2025. Dostupné z: Interní dokument CZ LOKO. [cit. 2025-05-18].
14. *NI USB-6008/6009 User Guide and Specifications*. Online. 2008. 2008. Dostupné také z: <https://www.ni.com/pdf/manuals/371303l.pdf>.
15. *Getting started with DewesoftX®*. 22.7.2024. 2024. Dostupné také z: <https://dewesoft.com/download/manuals>.

16. HAUPT, Lukáš a MICHÁLEK, Tomáš. Třínápravový podvozek CZ LOKO. Online. *Nová železniční technika věda a výzkum*. 2018, roč. 26, č. 5, s. 21-27. ISSN 1210-3942. [cit. 2025-05-18].
17. BENICKÝ, Michal; HAUPT, Lukáš a KOPAL, Jan. *Locomotive bogies from CZ LOKO prудuction*. 9.9.2019. Budapest: Department of Rolling Stock of the SSME, 2020. ISBN 978-963-9058-42-2.
18. ZUTH, Daniel a VDOLEČEK, František. Snímače a měřicí technika. Online. *AUTOMA*. 2005, roč. 2005, č. 11, s. 32-36. Dostupné z: https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/40375.pdf. [cit. 2025-05-18].
19. ORTTMEYER, Cliff. Snižování nákladů znamená také to, že podniky by měly co nejdříve zavést analýzu vibrací. Online. 2023. Dostupné z: [Automatizace.hw.cz](https://automatizace.hw.cz), <https://automatizace.hw.cz/snizovani-nakladu-znamena-take-to-ze-podniky-by-mely-co-nejdrive-zavest-analyzu-vibraci.html>. [cit. 2025-05-18].
20. *Měřicí ústředna ADASH A3716 2U*. Online. In: [Www.adash.com](http://www.adash.com). 2025. Dostupné z: <https://adash.com/documents/A3716/Adash-A3716-informacni-list.pdf>. [cit. 2026-05-21].

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

f_{BPFO}	frekvence vnitřního kroužku ložiska
f_{BPFI}	frekvence vnějšího kroužku ložiska
f_{BSF}	frekvence valivých elementů
f_{FTF}	frekvence klece
n	počet valivých elementů
BP	průměr valivého elementu
PD	průměr ložiska
f_r	frekvence daná relativními otáčkami vnitřního kroužku

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1: Optimální rozsahy vibračních veličin [1]	11
Obr. 2: Závislost měřené veličiny na způsobu uchycení snímače [3]	13
Obr. 3: Frekvenční multispektrum doběhové zkoušky podvozku H1	16
Obr. 4: Řádové multispektrum doběhové zkoušky podvozku H1	17
Obr. 5: Graf řádové analýzy doběhové zkoušky podvozku H1, součást přílohy č. 2	17
Obr. 6: Vibrodiagnostické tabulky, projev statické nevývahy ve frekvenčním spektru [4]	18
Obr. 7: Vibrodiagnostické tabulky, projev dynamické nevývahy ve frekvenčním spektru [4]	18
Obr. 8: Vibrodiagnostické tabulky, projev úhlové nesouososti ve frekvenčním spektru [4]	19
Obr. 9: Vibrodiagnostické tabulky, projev rovnoběžné nesouososti ve frekvenčním spektru [4]	19
Obr. 10: Vibrodiagnostické tabulky, projev nesouososti ložiska ve frekvenčním spektru [4]	19
Obr. 11: Vibrodiagnostické tabulky, projev opotřebení ozubeného převodu ve frekvenčním spektru [4]	19
Obr. 12: Vibrodiagnostické tabulky, projev chybné montáže ozubeného převodu ve frekvenčním spektru [4]	20
Obr. 13: Uložení tlapového motoru, pohled ve směru osy nápravy [5]	21
Obr. 14: Řez valivým tlapovým uložením motoru na dvojkolí	22
Obr. 15: Řez kluzným tlapovým uložením motoru na dvojkolí	22
Obr. 16: Podvozek lokomotivy 742.770	23
Obr. 17: Podvozek ČKD s kluzným uložením trakčního motoru	23
Obr. 18: Podvozek lokomotivy 744.169	24
Obr. 19: Podvozek lokomotivy řady 744.1	24
Obr. 20: Třínápravový podvozek lokomotivy 774.7 (Š, 07.02.2025)	25
Obr. 21: Třínápravový podvozek lokomotivy řady 774.7	25
Obr. 22: Zkušebna CZ LOKO s ČKD podvozkem	26

Obr. 23: Schéma měřicího řetězce.....	34
Obr. 24: Měřicí karta NI USB-6009 (NI USB-6009 features) [14]	35
Obr. 25: Spektrální FFT analýza před uzemněním podvozku, na ose x je frekvence [Hz], na ose y amplituda [mm/s^2]	38
Obr. 26: Spektrální FFT analýza po uzemnění podvozku, na ose x je frekvence [Hz], na ose y amplituda [mm/s^2].....	38
Obr. 27: Odstínění alobalem.....	38
Obr. 28: Spektrální FFT analýza před instalací stínění, na ose x je frekvence [Hz], na ose y amplituda [mm/s^2].....	39
Obr. 29: Spektrální FFT analýza po instalaci stínění, na ose x je frekvence [Hz], na ose y amplituda [mm/s^2].....	39
Obr. 30: Průběh vibrací během doběhové zkoušky před uzemněním kostry snímače, vpravo záznam z motoru, vlevo záznam z rámu	40
Obr. 31: Průběh vibrací během doběhové zkoušky po uzemněním kostry snímače, vpravo záznam z motoru, vlevo záznam z rámu	40
Obr. 32: Frekvenční spektrum rezonančního pozadí podvozek H18, součást přílohy č. 19	41
Obr. 33: Frekvenční spektrum rezonančního pozadí podvozek H10, součást přílohy č. 11	41
Obr. 34: Klesající frekvence otáčení dvojkolí během doběhové zkoušky podvozku H21	42
Obr. 35: Řádové spektrum podvozku H10, součást přílohy č. 11	42
Obr. 36: Řádové multispektrum podvozku H10	43
Obr. 37: Graf doběhové zkoušky z rámu H11, součást přílohy č. 12	50
Obr. 38: Graf doběhové zkoušky z rámu H15, součást přílohy č. 16	51
Obr. 39: Graf doběhové zkoušky z rámu H14, součást přílohy č. 15	51
Obr. 40: Graf doběhové zkoušky z rámu H19, součást přílohy č. 20	52
Obr. 41: Graf doběhové zkoušky z motoru H19, součást přílohy č. 20	52
Obr. 42: Graf doběhové zkoušky z rámu H19, součást přílohy č. 20	53
Obr. 43: Graf doběhové zkoušky z rámu H20, součást přílohy č. 21	53
Obr. 44: Graf doběhové zkoušky z rámu H10, součást přílohy č. 11	54
Obr. 45: Graf doběhové zkoušky z motoru H10, součást přílohy č. 11	54

Obr. 46: Graf doběhové zkoušky z rámu K4, součást přílohy č. 5	55
Obr. 47: Graf doběhové zkoušky z motoru K4, součást přílohy č. 5	55
Obr. 48: Řádová analýza K4 zobrazená v multispektru.....	56
Obr. 49: Graf doběhové zkoušky z motoru K5, součást přílohy č. 6	56
Obr. 50: Řádová analýza K5 zobrazená v multispektru.....	57
Obr. 51: Graf doběhové zkoušky z motoru K26, součást přílohy č. 27	57
Obr. 52: Graf doběhové zkoušky z rámu Č6, součást přílohy č. 7	58
Obr. 53: Nerovnoměrně zaběhnuté ozubené kolo na podvozku H11	60
Obr. 54: Doběhová zkouška H11 a H12 standartní záběh a opakovaný záběh po výměně pastorku, záznam na rámu.....	61
Obr. 55: Doběhová zkouška H11 a H12 standartní záběh a opakovaný záběh po výměně pastorku, záznam na motoru.....	61
Obr. 56: Měřicí ústředna ADASH A3716 2U [20]	64
Obr. 57: Ukázka průběhu RMS hodnot na kuličkovém ložisku TM	65
Obr. 58: Ukázka ISO Specifikace pro rychlost	65

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Tabulka naměřených teplot, která je součástí protokolu CZ LOKO [12].....	29
Tab. 3 Tabulka naměřených vibrací a hluku, která je součástí protokolu CZ LOKO [12]	29
Tab. 4: Řády klíčových komponent pro jednotlivé typy podvozků.....	32
Tab. 5: Tabulka shrnutí všech provedených měření na rámu podvozku	46
Tab. 6: Tabulka shrnutí všech provedených měření na kostře trakčního motoru	48

12 SEZNAM PŘÍLOH

1. Specifikace podvozků CZ LOKO
2. Protokol z doběhové zkoušky H1
3. Protokol z doběhové zkoušky H2
4. Protokol z doběhové zkoušky H3
5. Protokol z doběhové zkoušky K4
6. Protokol z doběhové zkoušky K5
7. Protokol z doběhové zkoušky Č6
8. Protokol z doběhové zkoušky Č7
9. Protokol z doběhové zkoušky H8
10. Protokol z doběhové zkoušky H9
11. Protokol z doběhové zkoušky H10
12. Protokol z doběhové zkoušky H11
13. Protokol z doběhové zkoušky H12
14. Protokol z doběhové zkoušky H13
15. Protokol z doběhové zkoušky H14
16. Protokol z doběhové zkoušky H15
17. Protokol z doběhové zkoušky H16
18. Protokol z doběhové zkoušky H17
19. Protokol z doběhové zkoušky H18
20. Protokol z doběhové zkoušky H19
21. Protokol z doběhové zkoušky H20
22. Protokol z doběhové zkoušky H21
23. Protokol z doběhové zkoušky H22
24. Protokol z doběhové zkoušky H23
25. Protokol z doběhové zkoušky H24
26. Protokol z doběhové zkoušky H25
27. Protokol z doběhové zkoušky K26
28. Protokol z doběhové zkoušky K27
29. Protokol z doběhové zkoušky H28