



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

MODERNÍ PŘÍSTUPY K DETEKCI DEFEKTŮ KOLEJNIC A KOL

MODERN APPROACHES TO THE DETECTION OF RAIL AND WHEEL DEFECTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Šindelář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radovan Galas, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Daniel Šindelář**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radovan Galas, Ph.D.**
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:

Moderní přístupy k detekci defektů kolejnic a kol

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kolejnice a kola představují nejvíce namáhané prvky železniční dopravy, jejichž stav zásadně ovlivňuje bezpečnost, spolehlivost i hospodárnost provozu. V průběhu provozu dochází k jejich opotřebením a vzniku defektů, které mohou vést k závažným poruchám. Tradiční kontrolní metody jsou pevně zakotveny v technických normách, avšak v posledních letech se prosazují moderní přístupy, například laserová měření, akustické a ultrazvukové metody či systémy využívající umělou inteligenci. Tyto technologie přispívají k rychlejší a přesnější detekci vad a zavádění principů prediktivní údržby.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je zpracovat přehled moderních metod detekce defektů kolejnic a železničních kol a zhodnotit jejich přínos pro bezpečnost, efektivitu a prediktivní údržbu v železniční dopravě.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- prostudovat dostupné zdroje popisující metody kontroly kolejnic a kol,
- popsat principy tradičních metod,
- popsat moderní technologie využívané pro detekci defektů,
- porovnat jejich výhody a omezení z hlediska přesnosti, rychlosti, nákladů a praktického nasazení,
- zhodnotit perspektivu těchto metod v kontextu prediktivní údržby železniční dopravy.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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:

ZHAO, Yuliang, Zhiqiang LIU, Dong YI, et al. 2022. A Review on Rail Defect Detection Systems Based on Wireless Sensors. Sensors. MDPI, 22(17), 6409.

WANG, Yu, Bingrong MIAO, Ying ZHANG, Zhong HUANG and Songyuan XU. 2025. Review on Rail Damage Detection Technologies for High-Speed Trains. Applied Sciences. MDPI, 15(14), 7725.

KUMAR, Ankit and S.P. HARSHA. 2025. A systematic literature review of defect detection in railways using machine vision-based inspection methods. International Journal of Transportation Science and Technology. Elsevier BV, 18, 207-226.

YE, Yunguang, Haoqian LI, Qunsheng WANG, Fansong LI, Cai YI, Xinyu PENG, Caihong HUANG and Jing ZENG. 2025. Fault diagnosis of railway wheelsets: A review. Measurement. Elsevier BV, 242, 116169.

MIĆIĆ, Milica, Ljiljana BRAJOVIĆ, Luka LAZAREVIĆ and Zdenka POPOVIĆ. 2023. Inspection of RCF rail defects – Review of NDT methods. Mechanical Systems and Signal Processing [online]. Elsevier BV, 182, 109568.

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

Tato práce se zabývá problematikou detekce defektů kolejnic a kol. Včasná diagnostika vad je zásadní pro zajištění bezpečnosti. Hlavním cílem práce bylo zpracovat kritické zhodnocení tradičních a moderních metod. Bylo vybráno a analyzováno celkem 14 přístupů, které vhodně reprezentují široké spektrum dostupných technologií. Výsledky ukazují, že žádná z uvedených metod není univerzální a každá má určité limity. Zásadním zjištěním je nutnost jednotlivé technologie vhodně kombinovat, čímž se eliminují jejich individuální nedostatky a je tak dosaženo spolehlivé a kompletní kontroly prověřovaného materiálu. Součástí textu je také popis nejzávažnějších vad a pojednání o prediktivní údržbě, která se stále více prosazuje. Práce nabízí systematické shrnutí celé problematiky, přičemž její výsledky mohou pomoci studentům, vědeckým pracovníkům a odborníkům z praxe, kteří se obecně zabývají nedestruktivními metodami testování (NDT).

VYUŽITÍ GENERATIVNÍ AI

Při zpracování této závěrečné práce jsem použil nástroje generativní umělé inteligence Gemini a ChatGPT v období 22. 9. 2025 – 9. 5. 2026 za účelem prvotního zorientování v problematice, návrhu osnovy, stylistické a gramatické korektury mnou napsaného textu, překladu zahraničního textu pro jeho lepší pochopení a vylepšení kvality obrázků se špatným rozlišením, které byly pro práci klíčové a nebylo možné dohledat kvalitnější náhradu. Výstupy generativní AI jsem kriticky ověřoval a nesu plnou odpovědnost za obsah práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Detekce defektů, nedestruktivní testování (NDT), železniční kolejnice, železniční kola, prediktivní údržba

ABSTRACT

This thesis addresses the issue of detecting defects in rails and wheels. Early diagnosis of defects is essential for ensuring safety. The main objective of this thesis was to conduct a critical evaluation of traditional and modern methods. A total of 14 approaches were selected and analyzed, which adequately represent the broad spectrum of available technologies. The results show that none of the methods mentioned is universal, and each has certain limitations. A key finding is the need to appropriately combine individual technologies, thereby eliminating their individual shortcomings and achieving a reliable and comprehensive inspection of the material under examination. The text also includes a description of the most serious defects and a discussion of predictive maintenance, which is becoming increasingly prevalent. The thesis offers a systematic summary of the entire subject, and its results can assist students, researchers, and practitioners who generally deal with non-destructive testing (NDT) methods.

KEYWORDS

Defect detection, non-destructive testing (NDT), railway rails, railway wheels, predictive maintenance

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠINDELÁŘ, Daniel. *Moderní přístupy k detekci defektů kolejnic a kol.* Brno, 2026, 55 s.
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí
bakalářské práce doc. Ing. Radovan Galas, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Radovanu Galasovi, Ph.D., za poskytnutí zpětné vazby, cenných rad a zejména za vypsání velmi zajímavého tématu, jehož zpracování mě mnoho naučilo a bavilo. Další poděkování patří rodině, bez které by moje studium nebylo možné.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Radovana Galase, Ph.D. 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	13
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE.....	14
2.1 Analýza problému.....	14
2.2 Cíl práce.....	14
3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	15
3.1 Přenos zatížení	15
3.2 Rozdělení vad kolejnic a kol	16
3.2.1 Vady kolejnic	17
3.2.2 Vady kol.....	20
3.3 Klasifikace metod pro detekci vad kolejnic a kol.....	23
3.4 Ultrazvukové testování (UT)	24
3.4.1 Zkoušení pomocí konvenčních ultrazvukových sond	24
3.4.2 Testování pomocí měniče se vzduchovou vazbou (ACT)	25
3.4.3 Piezoelektrická ultrazvuková metoda (PEU).....	26
3.5 Testování na základě měření hluku a vibrací (N&V)	27
3.5.1 Měření metodou akustické emise (AE)	27
3.5.2 Metoda založená na akcelerometrech (ABA).....	27
3.6 Vizuální kontrola (VT)	30
3.6.1 Pochůzka u trati	30
3.6.2 Magnetická prášková metoda (MT)	30
3.6.3 Kapilární zkouška	31
3.6.4 Automatizovaná vizuální kontrola s využitím 3D laseru (AVT)	31
3.6.5 Vizuální kontrola pomocí bezpilotního letounu (UAV).....	32
3.7 Elektromagnetické testování (ET)	33
3.7.1 Testování pomocí konvenčních sond vířivých proudů (ECT).....	33
3.7.2 Termografie využívající pulzní vířivé proudy (PEC)	34
3.7.3 Metoda využívající paralelogramový mechanismus	35
3.8 Testování pomocí optovláknových senzorů (FOS)	36
3.8.1 Testování pomocí vláknové Braggovy mřížky (FBG).....	36

3.9	Praktické nasazení metod a systém prediktivní údržby	38
3.9.1	DJ NDT	38
3.9.2	Prediktivní údržba	40
4	DISKUZE	41
4.1	Analýza tradičních metod	43
4.2	Analýza moderních metod	44
4.3	Kombinace metod	44
4.4	Budoucnost	45
5	ZÁVĚR	46
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A	52
	VELIČIN	52
7.1	Použité zkratky	52
7.2	Použité symboly	53
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	54
9	SEZNAM TABULEK	55

1 ÚVOD

Technologický rozvoj společnosti společně s požadavkem na environmentální udržitelnost vede k nevyhnutelnému nárůstu intenzity železniční dopravy. Výhodou nákladní přepravy je schopnost pojmout velký objem nákladu, zatímco osobní doprava si získala oblibu díky rychlosti, cenové dostupnosti a pohodlí. Tento rostoucí trend vede k častějšímu cyklickému namáhání v místě kontaktu kola a kolejnice, což urychluje proces únavy materiálu. Napětí na tomto rozhraní může vést ke vzniku podpovrchových trhlin, které není možné identifikovat běžnou vizuální prohlídkou trati. Pokud nejsou vady včas odhaleny, jejich šíření se zhoršuje, dokud nedojde k samotnému lomu kolejnice. Jedním z příkladů únavového selhání kolejnice je nehoda v Hatfieldu, ke které došlo v roce 2000 ve Velké Británii [1]. Závažnost problematiky a následky této havárie názorně ilustruje (Obr. 1-1).

Detekce vad se dlouho opírala o tradiční přístupy. Jedná se především o manuální kontrolu, kdy kvalifikovaný personál musí být fyzicky přítomen na daném úseku trati a pomocí ručního zařízení provést patřičnou inspekci. Tyto metody jsou ovšem pomalé, pracné, náchylné k lidským chybám a mají mnoho dalších limitů, které nestíhají požadavkům dnešní doby [2]. Proto se nabízí zásadní otázka, jak tedy můžeme celý proces zrychlit, zefektivnit a celkově zvýšit bezpečnost železničního provozu a předejít nebezpečným situacím?

Aby bylo možné odpovědět na tuto otázku, je nutné zpracovat detailní analýzu jednotlivých metod. Obecně defektoskopie představuje rozsáhlý obor, a proto je nutné zaměřit se na přínos těchto technologií pro železniční provoz a ideálně najít perspektivní přístupy, které jsou rychlé, efektivní a bezpečné. Součástí této práce je také přehled nejčastějších vad kolejnic a kol, neboť pochopení jejich charakteru je klíčové pro jejich úspěšnou detekci.



Obr. 1-1 Následky nehody [17]

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

Kola a kolejnice lze zařadit mezi nejnamáhanější prvky v železniční dopravě. Železniční soupravy vytvářejí extrémní napětí na velmi malé stykové ploše mezi kolem a kolejnicí. Odvalování kol vede ke vzniku a vývoji vad, které jsou především únavového charakteru. Jelikož systém kolo-kolejnice je provázán, tak pokud například kolo vykazuje známky poškození, začne ihned negativně ovlivňovat ostatní komponenty. Každá vada se projevuje odlišně a může se nacházet kdekoliv v daném objemu materiálu.

Hlavním problémem je skutečnost, že tradiční metody kontrol jsou v současnosti časově náročné a spoléhají se na zkušenosti operátora, což je v mnoha ohledech nebezpečné a neefektivní. Moderní přístupy narážejí na problém nutnosti filtrovat ze signálu rušivé složky, jejichž odstranění představuje náročnou výzvu. Jednotlivé metody jsou zaměřeny pouze na určitou část kolejnice nebo kola, a proto nejsou samostatně schopné zachytit všechny typy vad v celém jejich objemu.

Vzhledem k rozsáhlosti problematiky budou informace v textu vycházet primárně ze železniční dopravy, přičemž tramvajové dopravě a metru se text bude věnovat spíše okrajově. Většina popsaných principů je však do značné míry shodná i v těchto odvětvích. Dále se text zaměří na nejčastější a nejzávažnější vady a jejich detekci.

2.2 Cíl práce

Tato práce se soustředí na zmapování současného stavu, zhodnocení tradičních metod a na detailní analýzu moderních metod, které mají potenciál výrazně zvýšit bezpečnost kolejové dopravy a postupně umožnit přechod na systémy prediktivní údržby. Hlavní výsledek tvoří ucelený přehled jednotlivých metod, pojednání o výhodách a nedostacích daných přístupů s ohledem na jejich bezpečnost, efektivitu a praktický přínos. Dílčí cíle práce tvořily prostudování dostupných zdrojů, s cílem vybrat vhodné zástupce jednotlivých metod, popsat princip funkce tradičních i moderních přístupů a zhodnotit jejich přínos v kontextu prediktivní údržby. Práce se mimo jiné zabývá přenosem zatížení, nejčastějšími vadami a jejich systémem rozdělení.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Přenos zatížení

Prostředí, v němž probíhá kontakt kola a kolejnice, je náročné a silové působení na tomto rozhraní je komplexní a proměnné [1]. Tyto síly jsou závislé na geometrii obou prvků [3]. Svislé zatížení kolejnic vyvolané hmotností železničního vozidla lze rozdělit na statickou a dynamickou složku. Statické zatížení je dáno podílem celkové hmotnosti vozidla a počtu kol. V traťových obloucích se zatížení mezi vnitřní a vnější kolejnicí liší v závislosti na převýšení koleje až o 20–30 %. Dynamický účinek představuje přírůstek nad rámec statického zatížení [4]. Příčinou vzniku této složky jsou nerovnosti na povrchu kolejnic i kol, které se projevují zejména při vysokých rychlostech. Uvedené jevy mohou při častém výskytu zvyšovat rychlost šíření únavových trhlin [1].

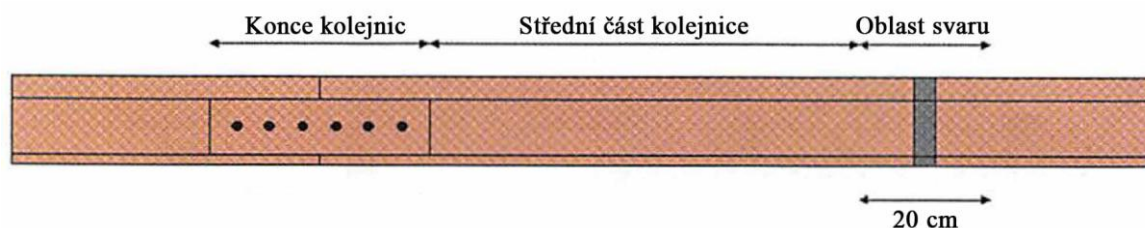
Vnější silové účinky vyvolávají v materiálu kolejnice napětí různého druhu. Ohybové napětí vzniká při jejím průhybu mezi pražci ve svislém a příčném směru [4]. Svislé zatížení je dominantní [1], přičemž hlava kolejnice je namáhána tlakem, zatímco v patě vzniká tahové napětí. Ohyb v příčném směru způsobí boční vychýlení hlavy vůči patě [4].

Další napětí vzniká vlivem teplotní roztažnosti, přičemž největší riziko představuje vybočení kolejnic. Pro omezení tohoto problému je nezbytné, aby kolejnice byla namáhána tahem po většinu roku [1]. Jedním ze způsobů, jak tohoto stavu dosáhnout, je svařování při tzv. neutrální teplotě, která se pohybuje v ČR kolem 20 °C [5]. Díky tomuto opatření je kolejnice celkově namáhána tlakem pouze nad touto teplotou [6]. Tento způsob pokládky kolejnic snižuje riziko jejich vybočení, ale na druhou stranu zvyšuje riziko náhlého křehkého lomu, a to zejména v zimních měsících [1].

V důsledku pohybu, trakce a brzdění vozidla vzniká v místě dotyku kola s kolejnicí kontaktní napětí [1]. Tlak, který zde vzniká, je definován pomocí Hertzovy teorie, která popisuje rozložení tohoto tlaku v místě kontaktu a je zahrnuta ve většině výpočetního softwaru [3]. Nebezpečím tohoto napětí je únava valivého kontaktu, též známá jako RCF (Rolling Contact Fatigue). Tato únava se nejvíce projevuje typicky pod povrchem kolejnic v hloubce 5–25 mm a vede ke vzniku podpovrchových trhlin [7]. RCF je velmi nebezpečná a stejně jako u ostatních kovových součástí vystavených cyklickému namáhání může i u kolejnic a kol vést k jejich částečnému nebo úplnému selhání [1].

3.2 Rozdělení vad kolejnic a kol

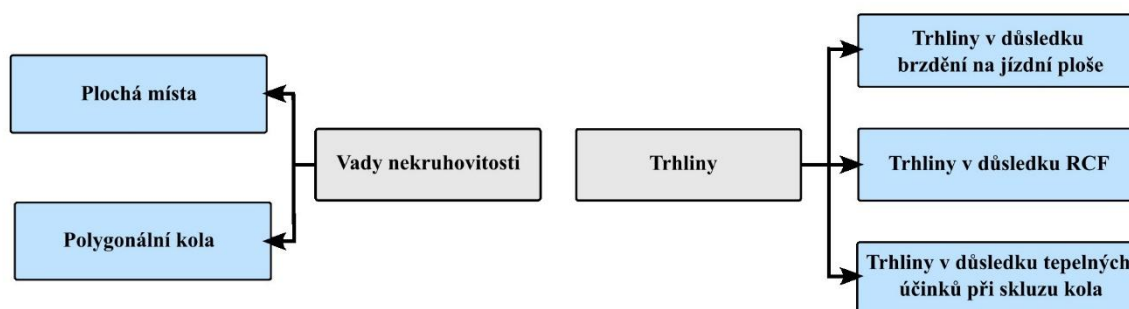
Vady kolejnic se mohou vyskytovat na koncích kolejnic, v oblasti svaru nebo ve střední části kolejnice (Obr. 3-1) [8]. Konec kolejnice je definován jako část kolejnice skrytá pod kolejnicovou spojkou. Oblast svaru je úsek kolejnice, který přesahuje 10 cm na každou stranu od tupého svarového spoje. Střední část kolejnice zahrnuje úsek, který leží mezi již zmíněnými částmi [9]. První klasifikace byla vytvořena v době, kdy šroubované kolejnice hrály stále dominantní roli. S přechodem na bezстыkovou kolej se význam vad na koncích kolejnic snížil, zatímco vady v oblastech svarových spojů začaly být častější [9].



Obr. 3-1 Oblasti kolejnice [9]

Vady kolejnic jsou roztrženy pomocí čtyřmístného číselného kódu [8; 9]. První číslice definuje polohu vady podle výše zmíněných oblastí. Druhá číslice upřesňuje umístění vady v průřezu kolejnice. Třetí číslice určuje orientaci vady. Čtvrtá číslice je doplňková a může být použita k podrobnější klasifikaci vady [9].

Zatímco defekty v kolejnicích jsou charakterizovány podle čtyřmístného číselného kódu, u železničních kol dostupná literatura a normy žádné specifické číslování neuvádějí [10; 11]. Z tohoto důvodu bylo vytvořeno vlastní schéma (Obr. 3-2), které znázorňuje rozdělení na vady nekruhovitosti a na trhliny podle příčiny vzniku [11]. Tento přehled nezahrnuje všechny možné vady, ale pokrývá převažující typy [10; 11].



Obr. 3-2 Rozdělení vad kol [11]

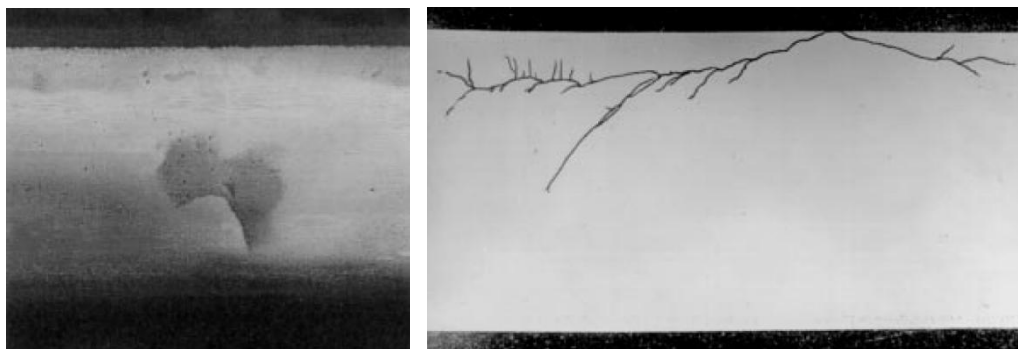
3.2.1 Vady kolejnic

Závažnou hrozbu představují vady kolejnic. V mnoha případech jsou primární příčinou vzniku únavových trhlin, jejichž délka se může pohybovat v rozmezí od několika milimetrů až po několik metrů [1; 8]. Jejich vývoj je popsán třemi fázemi. První dvě souvisí se vznikem a šířením trhliny, přičemž v tomto časovém období probíhá nejvíce prohlídek kolejnic s cílem udržet tento růst pod kontrolou a omezit jej na přijatelnou úroveň. Třetí fáze odpovídá samotnému dolomení kolejnice [1].

Vzhledem k tomu, že se do této kategorie řadí velké množství specifických vad [4; 8], bude hlavní pozornost věnována vadám typu RCF. Defekty v této skupině jsou totiž považovány za nejčastější příčinu vykolejení [12]. Jak již bylo zmíněno, jedná se o únavu valivého kontaktu, přičemž vady jsou způsobeny nadměrným smykovým namáháním povrchové vrstvy kolejnice [4]. Tento jev vede ke ztrátě tvárnosti materiálu, který přestává odolávat provozním podmínkám [1]. Mezi vady způsobené RCF se řadí šikmé trhliny pojížděné plochy (squats), šikmé trhliny pojížděné hrany (head checking) a odlupování materiálu z pojížděné hrany (shelling). Kromě vad RCF budou popsány vlnovitost kolejnice (corrugations) a příčná trhlina v hlavě kolejnice (transverse defect) [4; 8].

Squat

Tato vada se nachází na jízdní ploše hlavy kolejnice a projevuje se jako mírná lokální prohlubeň tmavší barvy [12]. Vyskytuje se v obloucích a v přímých úsecích trati, kde železniční vozidla dosahují vyšších rychlostí [8]. Každý squat se skládá ze dvou hlavních podpovrchových trhlin (Obr. 3-3). Přední se šíří ve směru jízdy, zatímco zadní postupuje v opačném směru [4]. Trhliny jsou iniciovány na povrchu a šíří pod úhlem 10–15° od podélné osy kolejnice směrem dolů a při dosažení hloubky 4 mm se dále rozvětvují. Při dosažení kritické velikosti může dojít ke křehkému lomu kolejnice [8].



Obr. 3-3 Squat; vlevo pohled na lokální prohlubeň; vpravo řez profilem ukazující trhlinu [8]

Head checking (HC)

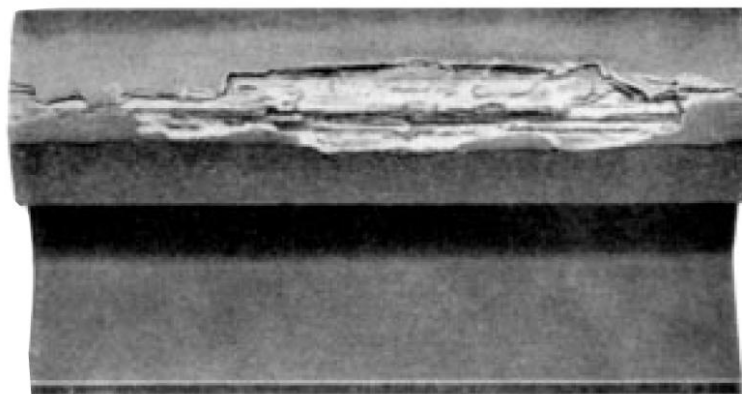
Vada je iniciována na povrchu pojížděné hrany kolejnice a projevuje se jako velké množství rovnoběžných trhlinek s roztečí 1–5 mm (Obr. 3-4) [8]. Tento defekt je obvykle pozorován v obloucích o velkém poloměru na vnější koleji a vzniká vysokým kontaktním tlakem [8;12]. Trhliny dosahují hloubky 2–5 mm [4]. Po delší době provozu může dojít k vylamování materiálu mezi jednotlivými trhlinami, přičemž vada se může rozvinout v příčnou trhlinu. Rozvoj příčné trhliny se může urychlit v kombinaci s vadou shelling [8].



Obr. 3-4 Head checking [8]

Shelling

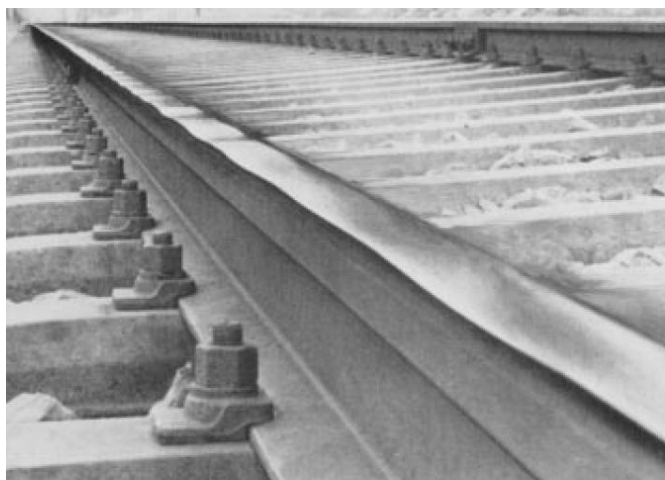
V hloubce 2–8 mm, v důsledku kontaktních sil, vznikají podélné trhliny pod pojížděnou hranou kolejnice [8; 4]. Vada se nejprve projevuje tmavými skvrnami na povrchu zaoblení pojížděné hrany, což signalizuje přítomnost vnitřních trhlin. Při delší době provozu může dojít k odlupování materiálu (Obr. 3-5) [8]. Přítomnost tohoto defektu můžeme pozorovat především v obloucích trati na vnější koleji [4].



Obr. 3-5 Shelling [8]

Vlnkovitost kolejnice

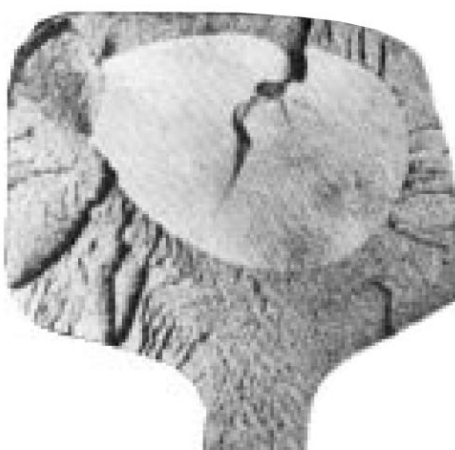
Jedná se o cyklické nerovnosti na jízdní ploše kolejnice, které svým tvarem připomínají vlny a dosahují hloubky kolem 2 mm (Obr. 3-6) [8; 4]. Dělí se na krátké a dlouhé vlny [4]. Délka krátkých vln se pohybuje mezi 3–10 cm. Vznikají v důsledku pohybu, zrychlování a brzdění vozidla [8; 4]. Dlouhé vlny dosahují délky 1,5–3 m. Prvotní příčinou vzniku této vady je výrobní proces, konkrétně se jedná o rovnání kolejnic [8].



Obr. 3-6 Vlnkovitost [8]

Příčná trhlina v hlavě kolejnice

Nejedná se o konkrétní vadu ale o specifický typ únavové trhliny, ke které dochází kvůli vnitřním nehomogenitám jako jsou dutiny a vměstky. Příčná trhlina může dosáhnout povrchu hlavy kolejnice, ale její rozměry bývají malé a je obtížné ji identifikovat pohledem (Obr. 3-7). Tyto trhliny mohou vznikat v důsledku rozvoje vad shelling. [8]



Obr. 3-7 Příčná trhlina [8]

3.2.2 Vady kol

Klasické dvojkolí se skládá ze dvou kol a nápravy. Kola přenášejí hmotnost vozidla a zajišťují plynulost jízdy. Tyto valivé prvky mohou být postiženy vadami různého typu v důsledku nerovností trati nebo výrobních nedokonalostí. Největší hrozbu představují plochá místa a polygonální kola. Tyto vady nekruhovitosti mají největší pravděpodobnost výskytu, což vyplývá z analýz železničních dvojkolí provozovaných evropskými a asijskými dopravci [10]. Dále budou popsány trhliny, které vznikají v důsledku brzdění na jízdni ploše, únavového poškození valivého kontaktu (RCF) a tepelných účinků při skluzu kola [11]. Včasná diagnostika těchto vad může snížit náklady na údržbu a zamezit vzniku nebezpečných situací [10].

Plochá místa

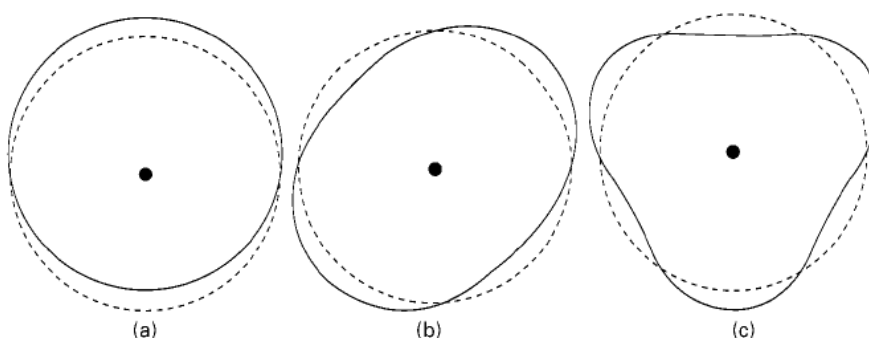
Při brzdění se kolo může zablokovat nebo při rozjezdu protáčet. Následkem je smýkání kola po povrchu kolejnice, což může vést ke vzniku plochých míst (Obr. 3-8) [11]. Nečistoty, jako jsou listí, mastnota, námraza a sníh, tento problém zhoršují. V důsledku smýkání dochází k obroušení části jízdni plochy kola a lokální teplota kola se výrazně zvýší. Když se kolo začne znovu odvalovat, následuje rychlé ochlazení, což je způsobeno odvodem tepla do okolního chladného objemu kola. Tento proces vede k lokální fázové přeměně a vzniku martenzitu. Ten se časem vylamuje, čímž se tvoří dutiny. Pokud nedojde k včasnému zásahu, mohou se dutiny propojit, což se projeví rozsáhlým poškozením jízdni plochy kola [13].



Obr. 3-8 Ploché místo na jízdni ploše [10]

Polygonální kola

Jedná se o vadu nekruhovitosti, přičemž kolo vykazuje periodické odchylky od středního poloměru kola. Obrázek (Obr. 3-9) znázorňuje tyto odchylky, přičemž případ a) se vztahuje k excentricitě kola, která je způsobena nesouosostí otvorů. Případ b) se může vyskytovat u kol, která jsou odpružena pryží a případ c) může vzniknout v důsledku uchycení kola do tříčelistového sklíčidla během profilování. Počet vln po obvodu kola může dosahovat vyšších hodnot, a navíc jednotlivé případy se mohou na kole vyskytovat současně. Amplitudy se pohybují v řádu 1 mm. Tato vada může při určité rychlosti vlaku vést k nepříjemné úrovni vibrací. [13]



Obr. 3-9 Polygonální kola; (a) excentricita kola; (b) vada u kol odpružených pryží; (c) vada v důsledku uchycení do tříčelistového sklíčidla [13]

Trhliny v důsledku brzdění na jízdní ploše

Nacházejí se na jízdní ploše kola v místech, kde na ni působí brzdový špalík. Zpočátku se projevují jako síť jemných trhlin. Trhliny jsou uspořádány příčně přes jízdní plochu kola (Obr. 3-10). Pokud se trhлина rozšíří na zkosenou hranu nebo je delší než 40 mm, kolo musí být okamžitě vyřazeno z provozu. [11]



Obr. 3-10 Trhлина v důsledku brzdění na jízdní ploše [10]

Trhliny v důsledku RCF

Dochází k nim při odvalování kola. Zpočátku se poškození projevuje jako síť jemných trhlin. Trhliny bývají na jízdní ploše umístěny pod úhlem (Obr. 3-11) a jsou obecně přijatelné, ale doporučuje se sledovat jejich růst. Pokud trhлина překročí délku 40 mm, musí se kolo vyřadit z provozu a odeslat na reprofilaci. [11]



Obr. 3-11 Trhлина v důsledku RCF na jízdní ploše [10]

Trhliny v důsledku tepelných účinků při skluzu kola

Při skluzu kola je dosaženo vysokých teplot, následně při opětovném odvalování dojde k rychlému ochlazení a vzniku martenzitu. Martenzit je velmi křehký, a proto se trhliny mohou tvořit snadněji. Trhliny jsou hrubší než ty dříve zmiňované a jsou uspořádány příčně přes jízdní plochu kola v místě, kde došlo ke skluzu. Obrázek (Obr. 3-12) znázorňuje oblast trhlin v martenzitu, které jsou doprovázeny vylupováním. Trhliny nesmí přesáhnout velikost 40 mm. [11]

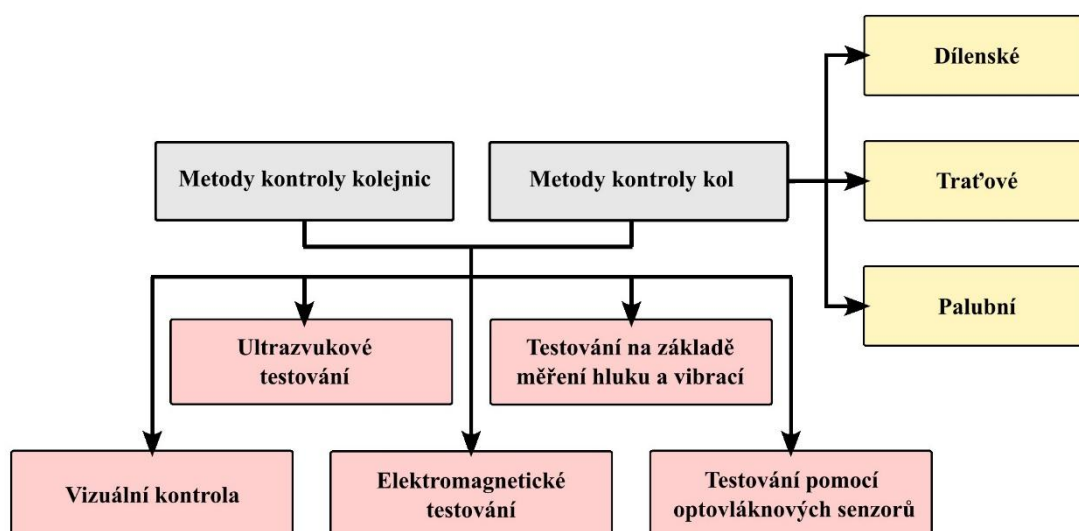


Obr. 3-12 Oblast trhlin na jízdní ploše doprovázena vylupováním [11]

3.3 Klasifikace metod pro detekci vad kolejnic a kol

Inspekce vad kolejnic a kol představuje komplexní výzkumný obor, který se zabývá vývojem měřicích systémů a senzorů [12]. V současné době je vysoká poptávka po velmi komplexních a inteligentních systémech, jejichž vývoj představuje pro mnoho vědeckých a technických pracovníků obtížný problém [14]. Různé vady se projevují odlišně a vyžadují různé diagnostické techniky [10]. Vývoj efektivnějších, spolehlivějších, rychlejších a přesnějších systémů je obzvláště důležitý pro zajištění bezpečnosti [14].

Detekční metody lze rozdělit na tradiční a moderní. Tradiční postupy jsou pevně ukotveny v normách, avšak mají určité limity a přestávají vyhovovat dnešním nárokům. Z těchto důvodů se rozvíjejí přístupy moderní, které jsou předmětem současného výzkumu [12]. Detailnější klasifikace podle fyzikálních principů je v následujícím schématu (Obr. 3-13). Toto rozdělení lze provést pro oba systémy kolejnic i kol. U diagnostiky kol je však vhodné tyto metody dále rozlišovat podle umístění měřicího zařízení na metody dílenské, traťové a palubní. Kontrola při vjezdu/výjezdu z depa, nebo při níž je vozidlo odstaveno spadá pod dílenskou metodu [10].



Obr. 3-13 Klasifikace metod kolejnic a kol [12]

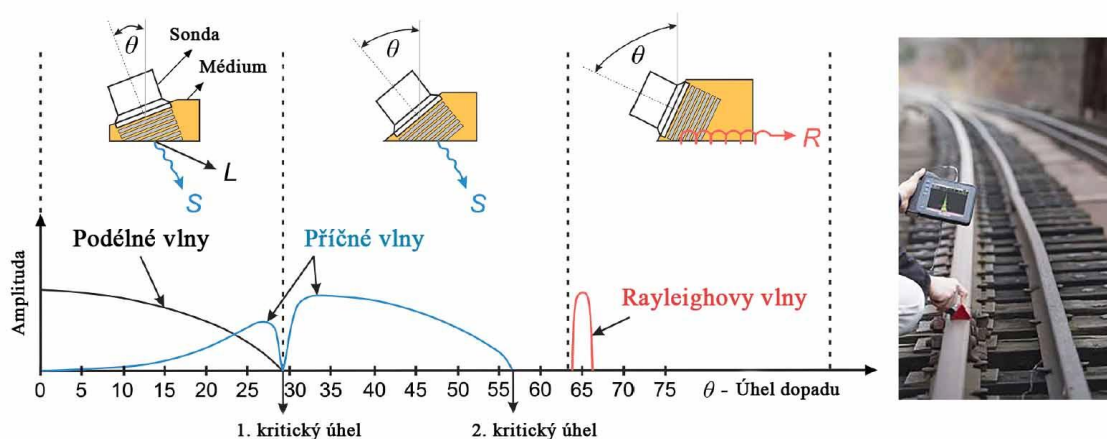
Dále je důležité zmínit, že technologií detekce existuje velké množství a není možné je v této práci všechny pokrýt. Navíc většina z nich má řadu komerčních provedení, a tudíž se stejná technologie může lišit v závislosti na výrobcí, nicméně jejich fyzikální princip je shodný. Pro popis bylo vybráno několik vhodných zástupců, které dohromady představují solidní přehled dané problematiky. Uvedené metody v následující kapitole jsou nedestruktivní (NDT), tedy při detekci vad nedojde k poškození vyšetřovaného materiálu. [12]

3.4 Ultrazvukové testování (UT)

Do této oblasti patří jak tradiční přístupy, které jsou široce využívány pro detekci vnitřních vad kolejnic a kol [12; 2], tak i moderní technologie [15; 16]. Tradiční postup, využívající konvenční ultrazvukové sondy [12], bude popsán podrobněji, neboť princip funkce zůstává v základu stejný jako u těch moderních. Pro popis moderních přístupů byla vybrána metoda využívající měniče se vzduchovou vazbou (ACT), která slouží pro kontrolu kolejnic a piezoelektrická ultrazvuková metoda (PEU) pro zkoušení železničních kol [15; 16].

3.4.1 Zkoušení pomocí konvenčních ultrazvukových sond

Testování může být provedeno manuálně pomocí speciálního přenosného ultrazvukového zařízení, prostřednictvím sond umístěných na ručně tlačném vozíku nebo přímo na zkušebním vozidle [17]. Princip metody spočívá ve vysílání ultrazvukových vln do kolejnice, které interagují s vnitřními nehomogenitami, a pomocí snímačů je sledován návrat odražené nebo rozptýlené energie [18]. Buzení vln lze realizovat pomocí piezoelektrických prvků [19]. Protože vady mohou mít různou prostorovou orientaci, je potřeba během testování generovat různé typy vln v závislosti na úhlu dopadu (Obr. 3-14). Mohou se tedy tvořit podélné, příčné a povrchové Rayleighovy vlny. Pro generování Rayleighových vln musí být úhel dopadu vlny větší než druhý kritický úhel. Tyto vlny se šíří po povrchu kolejnice. Pokud je úhel dopadu menší než tato hranice, vlny vstoupí do materiálu, přičemž na povrchu dojde k jejich lomu [12]. Směr, pod kterým se vlny následně šíří, se nazývá úhel lomu a je měřen od kolmice [12; 20]. Obvykle používané úhly lomu jsou 0° , 37° , 45° a 70° , přičemž úhel 0° se používá ke zjištění podélné délky vnitřní horizontální trhliny [18; 12]. Požadovaných úhlů může být docíleno využitím speciálních sond nebo pomocí správného natočení sondy [12]. Vzhledem k tomu, že orientace trhlín není zcela předvídatelná, mohou být vysílány vlny pod různými úhly dopadu současně, například využitím více sond, aby se maximalizovala šance na nalezení vnitřních vad [19].



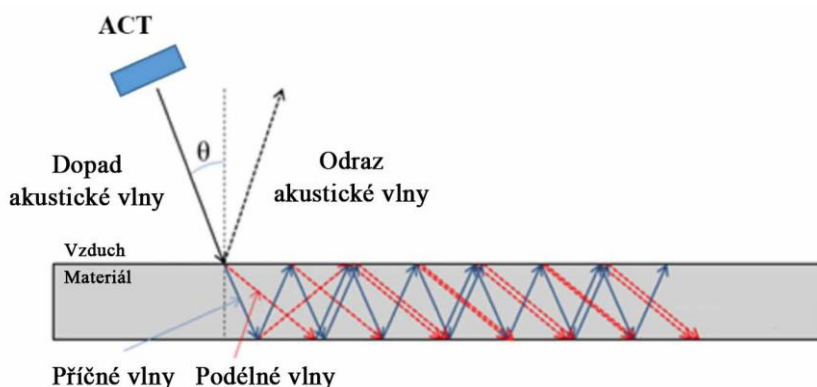
Obr. 3-14 Typy vln v závislosti na úhlu dopadu [12]

Aby se zabránilo odrazu dopadající vlny od povrchu kolejnice, je nutné použít kontaktní médium mezi sondou a kolejnicí [12].

Nebezpečím této metody jsou příčné trhliny, které se mohou vyskytovat pod dlouhými horizontálními trhlinami, tudíž mohou být zakryty a nelze je detekovat [2; 12]. Dalším nebezpečím je fenomén mrtvé zóny, což je oblast do hloubky přibližně 4 mm pod povrchem. V této zóně jsou slabé echo signály z vad překryty silným povrchovým echo signálem, který vzniká, když vlna vstupuje do kolejnice. Tento jev znemožňuje detekci vad v této povrchové vrstvě [21]. Další nevýhodou je nízká přesnost detekce [14]. Tato metoda je schopná lokalizovat a zjistit velikost vnitřních vad, jako jsou trhliny s různou prostorovou orientací [20; 12].

3.4.2 Testování pomocí měniče se vzduchovou vazbou (ACT)

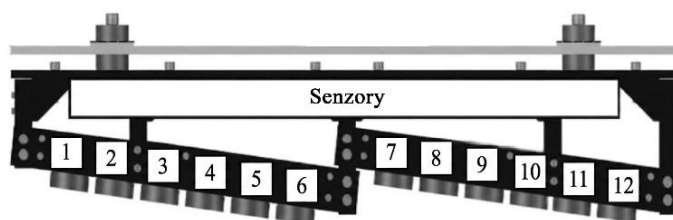
Tento měnič, umístěn v určité výšce nad testovaným objektem, generuje akustické vlny, které se šíří vzduchem. V okamžiku, kdy tato akustická vlna dopadne na povrch kolejnice, část energie se odrazí a zbývající část pronikne do materiálu, kde se přemění na podélné a příčné vlny. Důležitým faktorem souvisejícím s přeměnou těchto vln je úhel dopadu. Kvůli ztrátě energie při odrazu, přeměněné vlny mají velmi nízkou amplitudu ve srovnání s kontaktními metodami. Princip metody je znázorněn na (Obr. 3-15). [15]



Obr. 3-15 Přeměna dopadajících akustických vln [15]

Tato metoda je bezkontaktní a její největší výhodou je to, že snímače mohou být umístěny do vzdálenosti několik desítek centimetrů nad kolejnicí. ACT lze použít jako zdroj ultrazvukových vln, nebo také jako detektor, kdy zdroj může být jiné zařízení. Například tyto vlny mohou být generovány pomocí laseru a detekovat je můžeme pomocí ACT. Tato metoda je schopna detekovat vnitřní vady kolejnic a svarů. Měníče lze přidělat na vlak jedoucí běžnou rychlostí, tedy nedochází k narušení běžného provozu. [12]

Na (Obr. 3-16) je znázorněno uspořádání 12 ACT připevněných na měřicím rámu testovacího vozidla. Toto provedení navrhli autoři v článku [22], kdy tento systém zkoušeli na testovací trati a prokázali funkčnost této metody.



Obr. 3-16 ACT připevněny na měřicím rámu [22]

3.4.3 Piezoelektrická ultrazvuková metoda (PEU)

Jedná se o dílenskou metodu, tudíž se kontrola provádí při vjezdu vozidla do železničního depa. Tento přístup využívá piezoelektrického jevu k přeměně elektrické energie na mechanickou, čímž se generují ultrazvukové vlny, které se šíří materiálem zkoušeného kola. Následnou analýzou naměřeného signálu lze odhalit přítomnost vady. Využívá se zde speciálně navržená kolejnice, kdy její vzdálenost je mírně rozšířena, čímž je podepřena pouze vnější část jízdní plochy kola. V důsledku toho zde vzniká prostor pro umístění ultrazvukových sond. Tato realizace je znázorněna na (Obr. 3-17). Sondy jsou podepřeny pružinami, aby byl zajištěn dostatečný kontakt s projíždějícími koly, a také jsou vybaveny malými tryskami pro přívod vody, která slouží jako kontaktní médium. [16]



Obr. 3-17 Ultrazvukové sondy umístěné v kolejnici [16]

Metoda je schopna odhalit vady na věnci kola, trhliny na okolku a jízdní ploše. Obvodové vady na věnci lze detekovat v hloubce od 5 mm do 100 mm. Nevýhodou daného řešení je, že podepřenou část jízdní plochy a okolek nelze dostatečně přesně zkontrolovat. Dále je zde riziko přehlédnutí malých vad. [16]

3.5 Testování na základě měření hluku a vibrací (N&V)

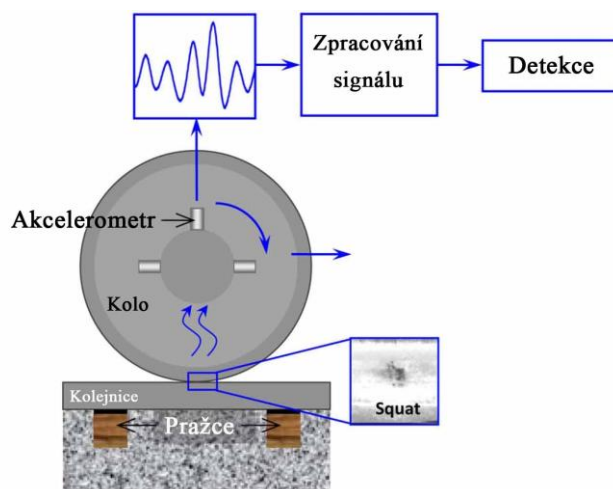
3.5.1 Měření metodou akustické emise (AE)

Počáteční vývoj a růst trhlin uvnitř materiálu způsobuje náhlé přerozdělení napětí, čímž dojde k uvolnění energie. Tato energie se šíří ve formě akustického signálu, který je možné detekovat, a tedy zjistit přítomnost vady [10; 23]. Detekci lze provést pomocí senzorů umístěných podél tratě nebo přímo na vozidle [12; 10]. Tyto měřicí systémy jsou však citlivé na nežádoucí zdroje hluku. Nežádoucí akustické složky musí být ze signálu odstraněny, a to buď použitím dodatečného měřicího systému, nebo vhodnou filtrací signálu [12].

Metoda je schopna přímo zachytit vznik a růst trhlin, což je obtížné kteroukoliv jinou metodou. Další výhodou je nenáročnost na přesnou polohu senzorů [10; 24]. Detekční dosah je až 30 m [19]. Tímto přístupem lze identifikovat vady hlavy kolejnice, jako je squat nebo vnitřní trhliny, a také defekty kol, jako jsou plochá místa [19; 12; 10].

3.5.2 Metoda založená na akcelerometrech (ABA)

Když kolo přejede přes povrchovou nerovnost, vybudí se vibrace ve vertikálním a podélném směru [25]. Tyto malé nárazy způsobují nepatrnou změnu signálu zrychlení, který je zaznamenán akcelerometrem umístěným na ložiskové komoře nebo na jiném místě v podvozku [12]. Výsledné vibrace měřené ve vertikálním směru zahrnují rušivé vlivy od ložiska, dvojkolí, kolejnice a šterkového lože. Naproti tomu v podélném směru jsou vibrace pouze od ložiska a dvojkolí [25]. Podélný signál tedy zvyšuje úspěšnost detekce, a proto je vhodné používat konfiguraci akcelerometrů umístěných v podélném a vertikálním směru [26]. Princip lze vidět na (Obr. 3-18).



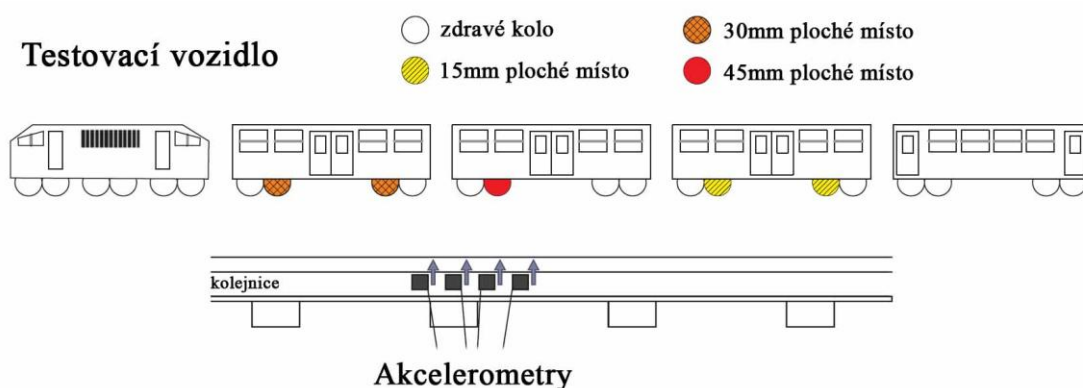
Obr. 3-18 Princip metody ABA [25]

Získaný signál je potřeba digitálně filtrovat od rušivých vlivů, neboť jsou považovány za šum a nesouvisí s přítomností defektů [26]. Jedna z používaných metod filtrace je vlnková analýza, díky které je možné získat různé frekvenční rozsahy a tím pádem klasifikovat vady podle závažnosti [12]. Pásmo 200–400 Hz odpovídá přítomnosti středních a těžkých vad, zatímco rozsah 1000–2000 Hz indikuje přítomnost vad lehkých [26].

V závislosti na tom, zda jsou hledány defekty v kolejnicích nebo v kolech, je zapotřebí eliminovat příslušný rušivý signál. Například v důsledku otáčení kola a jeho geometrických nepřesností mohou vznikat periodické rázy, a pokud je cílem detekovat vady kolejnic, stačí tento opakující se vzorec ze signálu odstranit. [26]

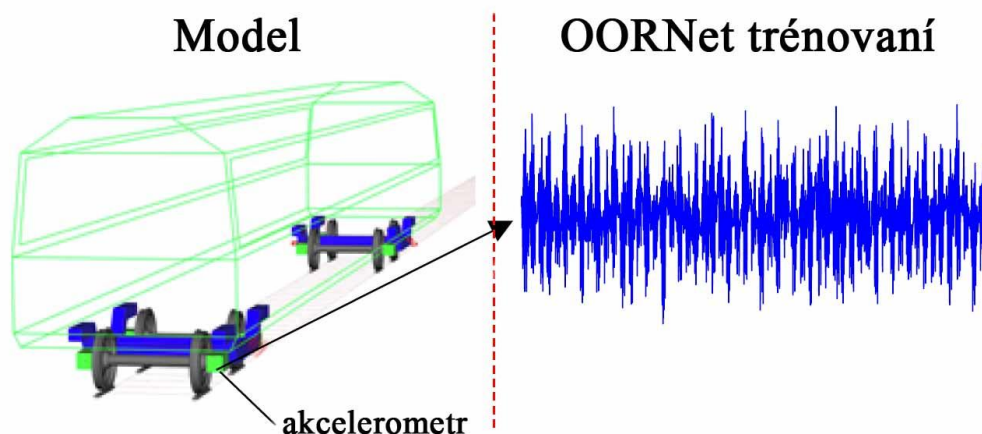
Tato metoda dokáže v kolejnicích identifikovat vadu HC, vlnkovitost, střední a těžké vady typu squat se 100 % úspěšností a lehké vady s přesností 78 % [12; 27]. V kolech lze zjistit přítomnost plochých míst a polygonizace [28; 27].

Systém pro detekci vad kol je možné realizovat buď uchycením snímačů podél tratě, nebo přímo na vozidlo [10]. Autoři v článku [28] provedli testování, kdy jejich měřicí sestava využívala zkušebního vozidla a testovací tratě, přičemž kola vykazovala různé stupně poškození (Obr. 3-19). Kolejnice byla osazena čtyřmi akcelerometry s cílem detekovat tyto anomálie kol. Nicméně tyto snímače jsou schopné zaznamenávat i signály ze vzdálenějších nárazů, což není žádoucí. Proto byl pro přesnost detekce použit algoritmus, který vytvořil časové okno, kdy se kolo s defektem nacházelo přímo nad akcelerometrem, a tudíž algoritmus analyzoval výhradně signály vznikající v blízkosti snímače. Tento postup tedy eliminoval šum, který vznikal v oblasti mimo akcelerometr. Délka časového okna byla nastavena tak, aby odpovídala přesně jednomu obvodu kola při aktuální rychlosti vlaku. Výsledky prokázaly spolehlivost metody při určování přítomnosti plochého místa.



Obr. 3-19 Testovací vozidlo [28]

Postup pro hledání vad kol, kdy je akcelerometr uchycen na vozidle, je popsán v [27]. Autoři zde vyvinuli model hlubokého učení s názvem OORNet, určený pro monitorování stavu kol s vadami kruhovitosti. Vzhledem k tomu, že je v reálném provozu obtížné získat data tisíců vadných kol, tak proto autoři vytvořili model vozidla vykazující právě tyto geometrické odchylky. Dále pomocí simulace získali data, která naměřil senzor zrychlení umístěný na ložiskové skříni. Díky této shromážděné databázi vytrébovali model OORNet, který byl dále schopný s 97 % přesností klasifikovat stav kola. Tento proces je znázorněn na (Obr. 3-20).



Obr 3-20 Trénování modelu OORNet na základě dat ze simulačního modelu [27]

Zapojení hlubokého učení do této problematiky představuje zásadní pokrok, protože konvenční metody zpracování signálu, jako například vlnková analýza, narážejí na problém, kdy vztah mezi naměřenými vibracemi a skutečnou velikostí defektu nebo jeho typem není lineární. To je způsobeno přítomností velkého množství proměnných faktorů v systému vozidlo-kolej, jako například neustále se měnící nerovnost tratě nebo opotřebení povrchů. Proto tyto běžné matematické modely zpracování signálu mají své určité limity, neboť v reálném provozu zde figuruje příliš mnoho proměnných. [27]

Výhodou této metody založené na akcelerometrech je možnost jejich instalace přímo na vozidlo. To umožňuje provádět inspekci při vysokých rychlostech za relativně nízké náklady [12; 25]. Další výhodou je využití rozsáhlé škály metod zpracování signálu, kdy mezi nejpokročilejší patří využití metody hlubokého učení, která poskytuje příznivé podmínky pro analýzu signálů zrychlení [10].

3.6 Vizuální kontrola (VT)

Tradiční přístupy jsou závislé na lidském zraku, zatímco ty moderní se spoléhají na kamery s vysokým rozlišením (AVT). Přístupy využívající bezpilotních letounů se v současnosti stále více uplatňují. Jejich leteckého snímkování se totiž využívá i v jiných oblastech, jako například kontrola povrchu lopatek větrných turbín nebo mapování terénu. [29]

3.6.1 Pochůzka u trati

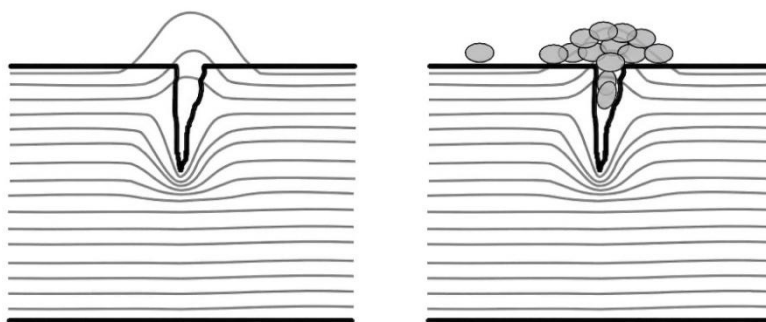
Tato metoda představuje jeden z nejjednodušších přístupů kontroly kolejnic. Inspekce je prováděna kvalifikovaným personálem, který se pohybuje podél trati a s využitím pomocného osvětlení kontroluje stav kolejnic. Tato metoda je však pomalá, nebezpečná a závislá na znalostech a zkušenostech personálu. [20; 10]

Mezi vady, které je schopna tato metoda identifikovat, patří horizontální a vertikální povrchové trhliny, koroze, squaty, head checking, shelling a vlnovitost kolejnice [20].

3.6.2 Magnetická prášková metoda (MT)

V tomto postupu se na testovaný materiál nanese železný prášek a následně se na kontrolovanou oblast aplikuje magnetické pole. V místech vad dochází k silnému rozptylu magnetického toku (Obr. 3-21). Železný prášek se nahromadí v místě rozptylu a vytvoří se tak viditelná indikace. [20]

Norma uvádí, že metoda je schopna detekovat vady ústící na povrchu ve feromagnetických materiálech. Dále se využívá ke zkoušení kolejnic po opravě broušením nebo k ověření vad zjištěných pomocí ultrazvuku. [20]



Obr. 3-21 Rozptyl magnetického pole a hromadění prášku [30]

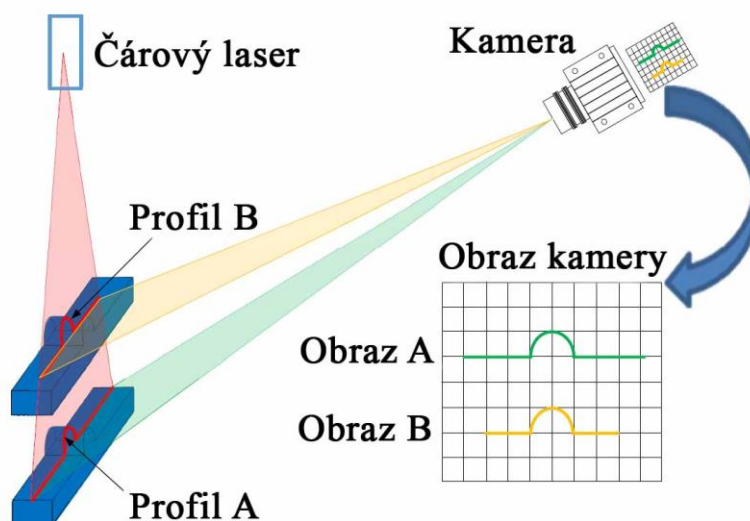
3.6.3 Kapilární zkouška

Tento přístup vyžaduje, aby byl kontrolovaný materiál důkladně očištěn. Následně se na něj nanese jasně zbarvený penetrant, který pronikne do trhlin nebo dutin ústících na povrchu. Po uplynutí stanovené doby se přebytečný penetrant z povrchu odstraní a nanese se vývojka. Vývojku je možné si představit jako suchý bílý prášek, jenž díky reverznímu kapilárnímu účinku vytáhne penetrant z trhlin. Díky tomu se vytvoří viditelné indikace, které jsou širší než samotná vada, což usnadňuje jejich detekci. [20]

Tato metoda dokáže detekovat povrchové trhliny. Dále se používá pro detekci vad kolejnic po opravě svařováním a broušením. [20]

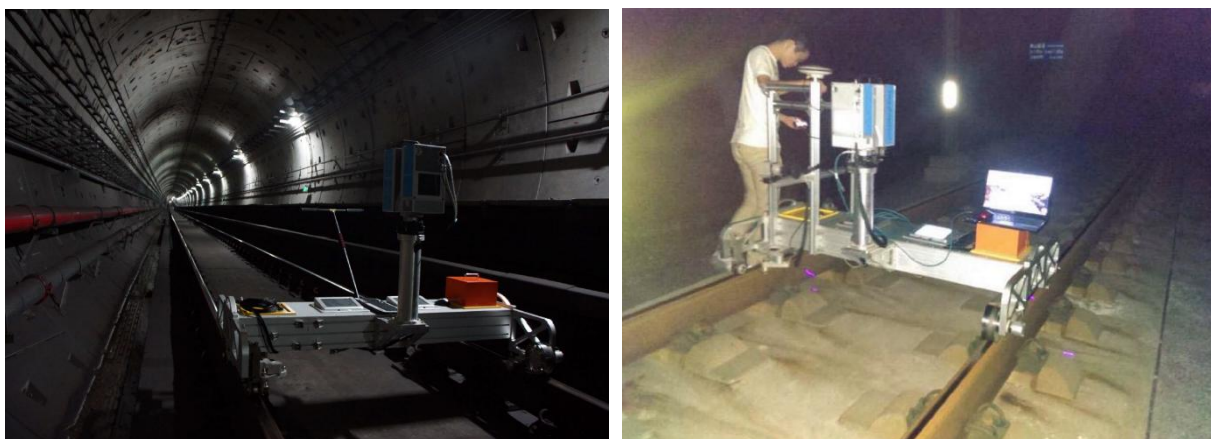
3.6.4 Automatizovaná vizuální kontrola s využitím 3D laseru (AVT)

Podstatou této zkoušky je využití laserového skeneru, který osvětluje povrch kolejnice a vytváří na něm světelný pás. Kamera, snímající tuto linii na povrchu, je vůči čárovému laseru nakloněna pod určitým úhlem. Pokud se tento laser vlivem povrchové vady vychýlí, kamera je schopna zachytit tuto výškovou změnu profilu. Poté se pomocí algoritmu vypočítají fyzické souřadnice profilu povrchu. Systém také využívá GPS k lokalizaci vad. Obrázek (Obr. 3-22) ilustruje princip této metody. Je zde znázorněno těleso v různých vzdálenostech od laseru a dále schéma zobrazuje, jak se tato změna výšky projeví na obraze kamery. [31] Popsaná zařízení lze umístit na nosnou platformu zobrazenou na (Obr. 3-23).



Obr. 3-22 Princip metody AVT s využitím 3D laseru [31]

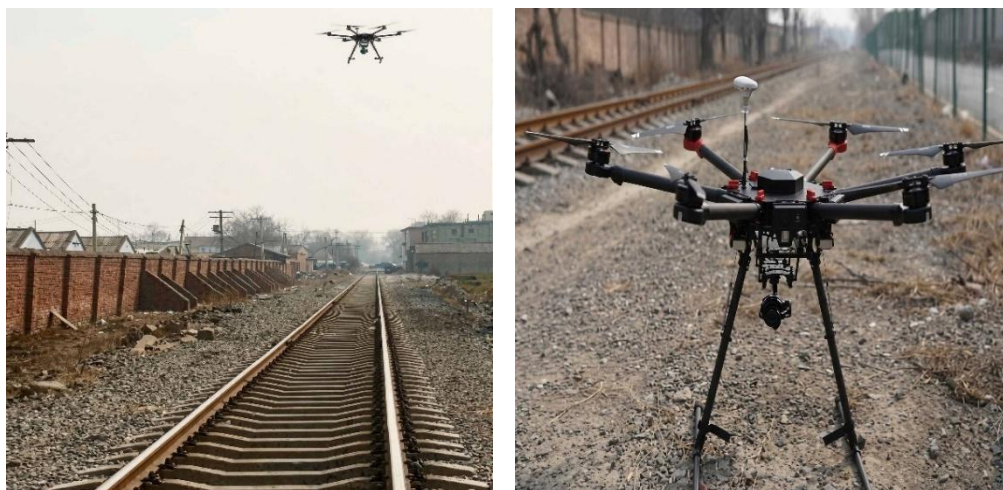
System dokáže rozpoznat povrchové vady o délce větší než 2 mm, šířce větší než 0,6 mm a hloubce větší než 0,5 mm. Z těchto hodnot vyplývá, že systém je přesný na rozpoznávání hloubky, avšak je problém správně určit délku těchto vad, na kterou je systém mnohem méně citlivý. Proto je metoda schopna detekovat v zásadě vady jako vlnkovitost kolejnice, koroze, rýhy, shelling a opotřebení abrazí. Kromě detekce a správné lokalizace je metoda schopna vady klasifikovat s přesností 93,78 %. Provozní rychlost platformy je 1,5 m/s. [31]



Obr. 3-23 Nosná platforma; vlevo zařízení je v tunelu metra; vpravo zařízení kontroluje železnici [31]

3.6.5 Vizuální kontrola pomocí bezpilotního letounu (UAV)

Kontrolu kolejnic pomocí dronu provedli autoři v článku [29]. V práci představili nový přístup vizuální kontroly, založený na použití bezpilotních letounů k pořizování snímků tratě (Obr. 3-24). Dále se zaměřili na vylepšení obrazu a segmentaci vad neboli na jejich rozlišení od zbytku kolejnice. Aby se předešlo kolizi s překážkami, byla pro daný úsek výška letu stanovena na 30 m. Provozní rychlost dronu byla 2 m/s. Pro zajištění pokrytí každé části tratě byla snímací frekvence stanovena na 2 snímky za sekundu a skutečná zachycená délka kolejnice na jednom snímku činila 1 m. Pro lokalizaci vad každý pořízený snímek obsahoval souřadnice letounu v daném okamžiku. Jelikož intenzita slunečního světla se může nepříznivě měnit, byl pro zvýraznění povrchových vad použit algoritmus LWLC (Local Weber-like contrast). Segmentace a odstranění šumu bylo dosaženo pomocí metody GSME (Gray stretch maximum entropy).



Obr. 3-24 Bezpilotní letoun; vlevo UAV nad železnici; vpravo pohled na UAV [29]

Za výhody lze považovat nízkou cenu, snadné ovládání a flexibilitu. Nevýhodou je citlivost dronu na přírodní vlivy, jako například silný vítr. Výsledky experimentu ukázaly schopnost metody detekovat povrchovou vadu s úspěšností 94 %. [29]

3.7 Elektromagnetické testování (ET)

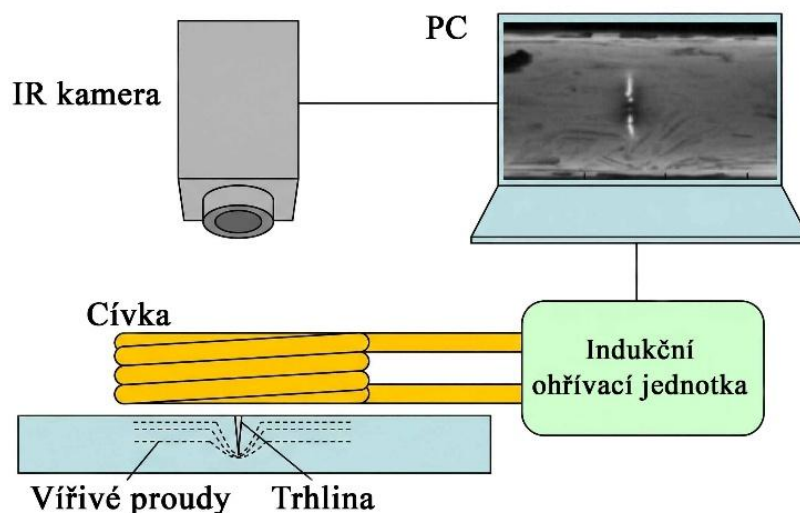
3.7.1 Testování pomocí konvenčních sond vířivých proudů (ECT)

Při průchodu střídavého proudu budicí cívkou vzniká v její blízkosti proměnné magnetické pole, které v důsledku elektromagnetické indukce v kolejnici generuje vířivé proudy [20;12]. Jejich přítomnost způsobuje ohřev materiálu a vytvoří indukované sekundární magnetické pole [20; 32]. V důsledku malých povrchových nebo podpovrchových vad dochází k narušení toku vířivých proudů, čímž se mění generované sekundární magnetické pole [20;12]. Během testování lze zachytit změnu sekundárního magnetického pole, a tedy i přítomnost defektu. Systém tvoří budicí i detekční cívky a pomocný obvod. Inspekci je možné provést manuálně pomocí ruční sondy, zařízení namontovaného na ručně tlačném vozíku nebo přímo na vozidle [20]. Metodu lze používat v kombinaci s ostatními inspekčními metodami [12].

Hloubka vniku vířivých proudů do materiálu kolejnic je obecně malá, proto má tato metoda nejvyšší citlivost na vady povrchové nebo těsně pod povrchem [12]. Patří sem vady typu squat a head checking [20]. Metoda může vést k falešné detekci neexistujících vad nebo k nepřesnému stanovení jejich velikosti [12].

3.7.2 Termografie využívající pulzní vířivé proudy (PEC)

PEC funguje v základu na stejném principu jako metoda konvenční, ale využívá jiného jevu, známého jako Jouleův ohřev. V místě, kde indukované vířivé proudy narazí na vadu, jsou nuceny změnit směr, což způsobí změnu rozložení tepla v zóně defektu. Protože kov se snaží teploty vyrovnat, dojde k tepelné difuzi. Tento proces je možné zachytit pomocí infračervené kamery, a tedy zjistit přítomnost defektu. Základní konfigurace se skládá z indukční budicí cívky, infračervené kamery a doprovodného vybavení (Obr. 3-25) [32]. Analýza rozložení tepla probíhá ve specializovaném softwaru [12].

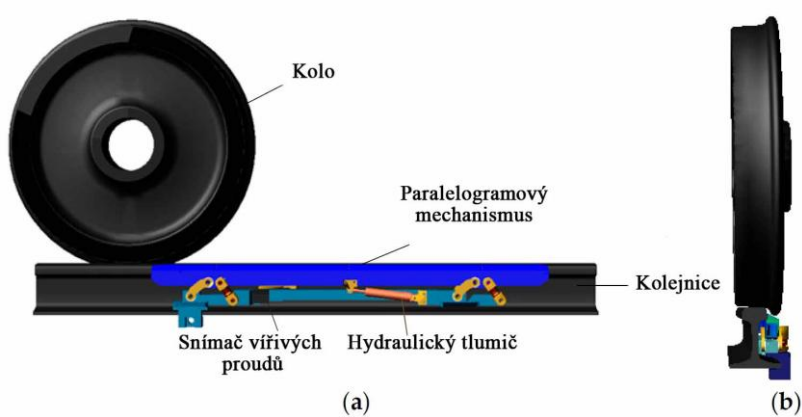


Obr. 3-25 Princip metody PEC [32]

Obecnou výhodou termografického testování ve srovnání s ostatními metodami je schopnost otestovat velkou plochu materiálu v krátkém čase. Navíc neustálý vývoj infračervených kamer umožňuje zvýšení teplotního rozlišení snímků [12]. Ovšem kdybychom tento systém chtěli použít na testovacím vozidle, tak maximální rychlost by se pohybovala kolem 18 km/h. Rychlost je omezena snímkovou frekvencí kamery a potřebným časem pro vytvoření tepla od vířivých proudů [32]. Metoda je schopna detekovat vady typu squat a head checking a další podpovrchové trhliny do hloubky 5 mm [12].

3.7.3 Metoda využívající paralelogramový mechanismus

Pro detekci vad kol, lze použít tento mechanismus, který se skládá z měřicího pravítka, snímače vířivých proudů, hydraulického tlumiče a dalších prvků. V případě, že se na běhounu kola vyskytuje ploché místo, tak při kontaktu této plochy s kolejnicí dojde k poklesu osy kola. Tento vertikální pohyb se prostřednictvím okolku přeneseme na měřící pravítko, které je umístěno podél kolejnice. Změnu výšky pravítka je možné zaznamenat snímačem vířivých proudů. Princip je znázorněn na obrázku (Obr. 3-26). Kinematika tohoto mechanismu zajišťuje, aby se pravítko nenaklápělo, což umožňuje přesné měření po celé jeho délce. Rázová síla vznikající při kolizi mezi kolem a měřícím mechanismem je zmírňována hydraulickým tlumičem. Důvodem použití snímače vířivých proudů je jeho rozlišovací schopnost zaznamenat i nepatrné výchylky. [33]



Obr. 3-26 Paralelogramový mechanismus [33]

Podobně jako u ultrazvuku i tato metoda je instalována u vjezdu do vlakového depa [16; 33]. Při překročení prahové rychlosti 14 km/h rázová síla kola prudce zvyšuje vibrace měřicího mechanismu, což negativně ovlivňuje přesnost detekce. Nicméně rychlost v depech je omezena, tudíž tato rychlost se jeví jako dostačující. Výhodou této metody je možnost kvantifikace neboli určení přesné velikosti defektu. Systém také odhalí plochá místa a hloubku opotřebení profilu při porovnání se standardním kolem. Praktické ověření mechanismu proběhlo na železnici v čínském Yinchuanu v roce 2019 (Obr. 3-27) [33].



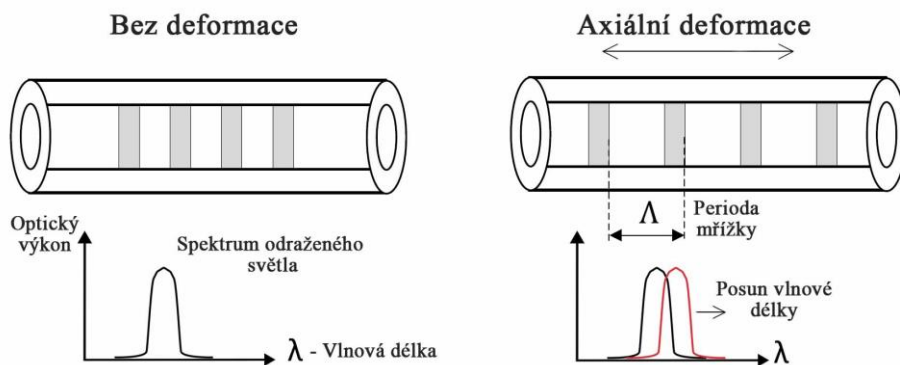
Obr. 3-27 Ukázka mechanismu [33]

3.8 Testování pomocí optovláknových senzorů (FOS)

Na trhu existuje velké množství konvenčních senzorů s různými principy fungování [34]. Příkladem konvenčních senzorů jsou tenzometry, které ke snímání využívají elektrický proud [10; 34]. Tenzometry se instalují na kolejnice a podle velikosti naměřené síly při průjezdu vlaku lze následně identifikovat závady dvojkolí [10]. Jako jejich moderní alternativa se však v posledních letech pro kontrolu inženýrské infrastruktury výrazně rozšířily optovláknové senzory [12]. Používají se pro monitorování stavu konstrukcí, jako jsou potrubí, mosty, tunely, kolejnice a šterkové lože. Jednou z jejich předností je schopnost měřit deformace, posuny, teploty a vibrace [35]. Do skupiny FOS patří několik zařízení, avšak vzhledem k tomu, že typ senzoru FBG se v železniční infrastruktuře značně rozšířil, bude popis věnován právě této technologii [12; 35].

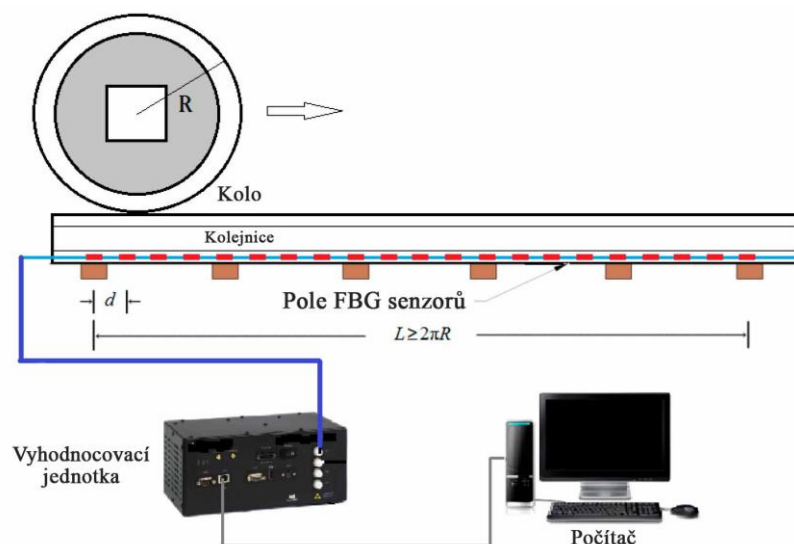
3.8.1 Testování pomocí vláknové Braggovy mřížky (FBG)

Optické senzory jsou zařízení, která pro přenos signálu využívají světlo šířící se uvnitř optického vlákna. Hlavními nosiči signálu jsou fotony. FBG je tvořeno právě tímto vláknem, kdy uvnitř jádra je v určitém úseku vytvořena periodická Braggova mřížka, která má odlišný index lomu než jádro. Mřížka při interakci se šířícím světlem odráží úzkou část vlnového spektra zpět, zatímco zbývající část signálu je schopna volně projít [34]. Deformace a vibrace vlákna vyvolané vnějšími vlivy způsobí změnu periody mřížky, což se projevuje posunem vlnové délky (Obr. 3-28) [10; 34]. Defekt kola s malou odchylkou poloměru, je schopný vyvolat vibrace, které mohou být tímto systémem naměřeny [36].



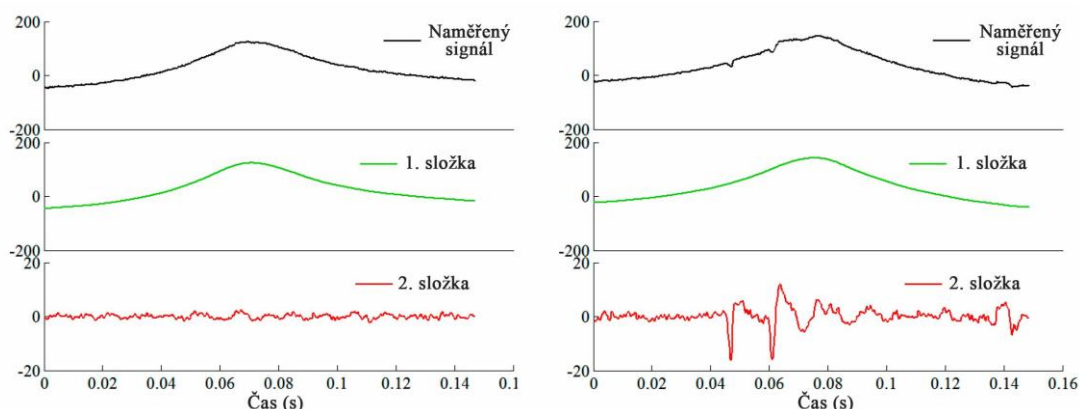
Obr. 3-28 Posun vlnové délky v závislosti na deformaci optického vlákna [34]

FBG umožňuje použití stovek snímacích bodů v jediném optickém kabelu. Optické vlákno má výhodu v dálkovém přenosu signálu díky jeho nízkému útlumu. To umožňuje instalaci monitorovacího zařízení daleko od úseku kolejnice vybaveného senzory. Na (Obr. 3-29) je zachycena konfigurace navrženého systému a pole rozmístěných senzorů. FBG jsou připevněny na patách paralelních kolejnic. Vyhodnocovací jednotka sbírá naměřená data a posílá je do počítače. Zde data vyhodnocuje software využívající speciální algoritmus. [36]



Obr. 3-29 Konfigurace FBG systému [36]

Vzhledem k tomu, že dominantní složkou naměřeného signálu je průhyb kolejnice způsobený tíhou projíždějícího vlaku a anomálie signálu způsobená defektem je velmi nepatrná, je nutné použít algoritmus k extrakci signálu nesoucího informaci o stavu kola. K tomuto účelu lze použít bayesovskou metodu slepého oddělování zdrojů. Graf vlevo na obrázku (Obr. 3-30) zobrazuje, jak tento algoritmus rozděluje naměřený signál na dvě složky. První složka představuje odezvu kolejnice pod tíhou vlaku s dokonale kulatým kolem, zatímco druhá složka je odezva vyvolaná pouze drsností kola. Graf vpravo znázorňuje stejný proces, ale zde kolo vykazuje známky nekuhovitosti. Porovnáním výsledků je patrné, že u zdravého kola je druhá složka stabilní, zatímco v druhém případě vykazuje značné odchylky, které signalizují přítomnost geometrických odchylek. Bylo zjištěno, že navrženou metodou lze úspěšně detekovat defekty kol s odchylkou poloměru již od 0,06 mm. [36]



Obr. 3-30 Rozdělení naměřeného signálu; vlevo zdravé kolo; vpravo kolo vykazuje známky nekuhovitosti [36]

Oproti konvenčním tenzometrům, které ke své funkci potřebují elektrický proud, je zásadní výhodou fakt, že senzory i spojovací vlákna nevyžadují žádné napájení [10; 36]. Díky absenci elektrických prvků je FBG systém odolný vůči elektromagnetickému rušení. Mezi další výhody patří odolnost proti korozi, schopnost pracovat v náročném prostředí, vysoká citlivost, možnost měření na velké vzdálenosti, snadná instalace a schopnost autonomního provozu [35]. Nevýhodou může být závislost systému na rychlosti vlaku, neboť při rychlostech pod 20 km/h je obtížné ze signálu získat informaci o závadě [36].

3.9 Praktické nasazení metod a systém prediktivní údržby

Metody manuální kontroly jsou postupně nahrazovány velkými měřicími vozy. Detekční zařízení je většinou umístěno v podvozku [19]. Důležité je poznamenat, že tyto systémy obvykle využívají kombinaci různých inspekčních metod [12; 37]. Na českých železnicích je k dispozici DJ NDT, což je diagnostická jednotka pro nedestruktivní zkoušení kolejnic, která byla uvedena do provozu v roce 2017 (Obr. 3-31) [37].

3.9.1 DJ NDT

Tato jednotka slouží k detekci zejména vnitřních vad kolejnic a je složena ze tří vozidel: hnacího, měřicího a řídicího. Pod měřicím vozem je umístěn měřicí podvozek (Obr. 3-32), který slouží k umístění a zajištění diagnostického zařízení ve správné poloze. Je vybaven trojicí inspekčních metod: ultrazvukovým systémem UT, systémem vizuální kontroly AVT a systémem vířivých proudů ECT. [37]



Obr. 3-31 Diagnostická jednotka pro nedestruktivní zkoušení kolejnic [37]

Ultrazvukový systém

Skládá se ze dvou ližin, které jsou připevněny na měřicím podvozku. Na každé ližině je umístěno celkem 9 ultrazvukových sond pro každý kolejnicový pás, přičemž poloha a natočení UT snímačů umožňuje kontrolu v celé šířce hlavy kolejnice. [37]

Systém vizuální kontroly

Využívá bezkontaktního vysokorychlostního optického systému pro snímkování povrchu kolejnice z obou stran. Je zde využito čtyř kamer s osvětlením LED, které zajišťují dostatečné nasvícení povrchu kolejnice. [37]

Systém vířivých proudů

Tento systém využívá 4 snímače vířivých proudů pro každou kolejnici. Snímače jsou uchyceny k rámu měřicího podvozku, který je napojen na pneumatický systém vozu a umožňuje jeho automatické spouštění a zvedání. Soustava slouží k detekci povrchových vad, zejména vady head checking, a je schopna provést kontrolu do hloubky 2,7 mm. [37]



Obr. 3-32 Měřicí podvozek k zajištění diagnostického zařízení [37]

Jednotka dosahuje rychlosti až 70 km/h při měření. Nejvyšší přepravní rychlost je 110 km/h. Systém potřebuje technologickou vodu jako kontaktní médium pro provedení ultrazvukové kontroly. Vozidlo je schopno pojmout 12 000 l vody. Za den může jednotka zkontrolovat 200 km úsek trati. [37]

3.9.2 Prediktivní údržba

Plánovaná nebo neplánovaná údržba trati může způsobit zpoždění, kompletně přerušit provoz a vyvolat nespokojenost cestujících. Navíc údržba, zejména ta neplánovaná, je finančně velmi nákladná. Další významnou obavou je lidská chyba, která je považována za nejčastější příčinu nehod. To však není jediný problém, protože personál provádějící kontrolu podél trati je vystaven nebezpečí od projíždějících vlaků, vysokému napětí od trakčního vedení a mnoha dalším potenciálním hrozbám. Z těchto důvodů je vhodné se zabývat optimalizací, která může výrazně snížit náklady a zajistit bezpečnost provozu. Konkrétně se jedná o prediktivní údržbu, což je systém, který je založen na predikci vývoje defektů a stavů, aby bylo možné přesněji naplánovat činnost údržby. Tedy jednoduše řečeno, snažíme se pomocí různých zdrojů dat odhadnout, kdy přesně vada dosáhne kritického stavu, abychom údržbu neprováděli až moc často, a také aby k ní nedošlo příliš pozdě. Dále může k optimalizaci výrazně přispět zavedení automatizace, která nahradí nutnost pracovníků provádět náročné úkony spojené s kontrolou vad. [38]

Řadíme sem tedy přístupy, které využívají senzorické a výpočetní technologie, přičemž některé metody mohou přispět k predikci závady více a některé méně. Data můžeme rozdělit do tří skupin: ze senzorů, stávající a z fyzikálních modelů. Data ze senzorů, která poskytují informaci o velikosti a typu vady, tvoří naprostý základ. Stávající data zahrnují informace z provozu, například hmotnost a frekvence projíždějících vlaků nebo také údaje o počasí. Pokud je dat nedostatek nebo je jejich kvalita nízká, lze tyto problémy překonat vytvořením fyzikálního modelu [38]. Všechna tato data jsou analyzována pomocí algoritmů, přičemž nejpoužívanější využívají metod umělé inteligence [10; 38].

4 DISKUZE

Následující tabulka představuje přehled důležitých informací, které byly získány z předchozí rešerše. Přehledně shrnuje zjištěitelné vady, hlavní výhody a nevýhody tradičních i moderních metod.

Tab. 4-1 Srovnání metod detekce defektů kolejnic a kol

Metoda		Aplikace	Zjistitelné vady	Hlavní výhody	Hlavní nevýhody
UT	Konvenční	Kola i kolejnice	Vnitřní vady – velikost a pozice trhlín	Ideální pro lokální kontrolu, detekce vnitřních vad, určení velikosti vad, vysoká mobilita, možnost umístění na vozidlo – rychlost až 70 km/h	Nelze detekovat zakryté vady, mrtvá zóna do hloubky 4 mm, nižší přesnost, vyžaduje kontaktní médium, nízká rychlost manuální kontroly
	ACT	Kolejnice	Vnitřní vady – kolejnic i svarů a jejich pozice	Bezkontaktní, vysoká rychlost až 128 km/h, detekce vnitřních vad	Část energie vln je odražena od kolejnice – vrací se slabý signál
	PEU	Kola	Trhlíny na věnci, okolku a jízdní ploše v hloubce od 5 do 100 mm	Detekce vnitřních vad, kontrola při vjezdu do depa – vlak nemusí být odstaven	Nákladné, podepřená část a okolek nelze přesně zkontrolovat, přehlédnutí malých vad, vyžaduje kontaktní médium
N&V	AE	Kola i kolejnice	Squat, vnitřní trhlíny, plochá místa	Přímo zachycuje vznik a růst vady, nenáročnost na polohu senzorů, detekční dosah až 30 m	Citlivost na nežádoucí zdroje hluku – nutnost filtrace signálu, vada musí růst pro její zachycení
	ABA	Kola i kolejnice	Povrchové vady a jejich klasifikace – squat, HC, vlnkovitost, plochá místa, polygonizace	Umístění snímačů na vozidlo a podél tratě, kontrola při vysokých rychlostech za nízké náklady	Citlivost na rušivé vlivy – nutnost filtrace signálu, falešné poplachy
VT	Pochůzka	Kolejnice	Povrchové vady – trhlíny, squat, HC, shelling, vlnkovitost	Jednoduchost, nízké náklady	Nízká rychlost, přehlédnutí menších vad, závislost na zkušenostech personálu
	MT	Kola i kolejnice	Povrchové trhlíny	Ideální pro lokální kontrolu a ověření přítomnosti vad	Nízká rychlost, příprava povrchu, detekce pouze povrchových trhlín

	Kapilární	Kolejnice	Povrchové trhliny	Ideální pro lokální kontrolu a ověření přítomnosti vad	Nízká rychlost, příprava a očištění povrchu, detekce pouze povrchových trhlin
	AVT – 3D laser	Kolejnice	Povrchové vady a jejich klasifikace – vlnkovitost, shelling, koroze, rýhy	Změří velikost vady od délky 2 mm, šířky 0,6 mm a hloubky 0,5 mm, klasifikace vad	Systém špatně rozpoznává délku vady na povrchu
	UAV	Kolejnice	Povrchové vady	Flexibilita, vysoká úspěšnost detekce povrchových vad	Nutnost využití algoritmů k odstranění šumu, citlivost na vlivy prostředí
ET	Konvenční (ECT)	Kola i kolejnice	Povrchové a podpovrchové vady, HC, squat	Možnost umístění na vozidlo, rychlost až 70 km/h, vhodné pro kombinace	Malá hloubka vniku vířivých proudů, falešné poplchy
	PEC	Kolejnice	Povrchové a podpovrchové vady do hloubky 5 mm – squat, HC	Schopnost otestovat velkou plochu materiálu, rychlost až 18 km/h	Rychlost testování je omezena snímkovací frekvencí kamery a tvorbou tepla od vířivých proudů
	Paralelogram	Kola	Velikost plochého místa, hloubka opotřebení	Kontrola při vjezdu do depa – vlak nemusí být odstaven, určení velikosti vady	Opotřebení měřicího pravítka, detekce pouze vad nekruhovitosti nikoli trhlin
FOS	FBG	Kola	Vady nekruhovitosti	Nevyžaduje napájení, odolnost proti elektromagnetickému rušení, použití v náročném prostředí, detekce odchylky poloměru od 0,06 mm	Závislost systému na rychlosti vlaku, obtížné získávání informací o závadě ze signálu

4.1 Analýza tradičních metod

Na první pohled se může zdát, že tradiční přístupy, které jsou tvořeny především manuální kontrolou, jsou zastaralé a zbytečné. Ve skutečnosti jsou tyto přístupy stále využívány a má to i své opodstatnění. Jejich hlavní přínos spočívá především v možnosti provedení lokální kontroly tratě. Pokud byl například inspekčním vozidlem nalezen nebezpečný úsek, lze k jeho došetření použít metody jako UT, ECT, nebo vizuální prohlídku. Navíc díky tomu, že kontrolu provádí člověk, tak může využít svého logického úsudku a zkontrolovat ostatní komponenty železniční tratě nebo její okolí. Oproti rychlejším přístupům, při kterých inspekční vozidlo daný úsek přejede vysokou rychlostí, lze kontrolu kolejnic provést mnohem pečlivěji, což platí i pro kontrolu kol. Železniční personál může provést kontrolu z různých úhlů, nebo také zkontrolovat složitější prvky, jako jsou výhybky. Zároveň tradiční přístupy nevyužívají žádnou složitou výpočetní techniku. Další výhodou, která se projevila postupem času, je možnost nainstalovat konvenční zařízení do podvozků inspekčních vozidel.

Manuální kontrola má také mnoho nedostatků a limitů. Nejdříve je důležité si uvědomit, že kontrolovat kompletní železniční infrastrukturu těmito metodami je velmi pomalé a v dnešní době téměř nerealné. Kdyby nebylo rychlejších metod, pomalá údržba tratě by vedla ke zpoždění nebo k úplnému přerušení provozu. Nespokojení cestující a zpožděné dodávky by nepřímo způsobili výrazné ekonomické ztráty. Ačkoli lidská přítomnost může mít své výhody, přesto s sebou nese i řadu potenciálních rizik. Nebezpečí může vzniknout například vlivem únavy nebo ztráty koncentrace, které mohou vést k přehlédnutí nebo ke špatnému vyhodnocení vad. Kontrola je navíc v mnoha ohledech závislá na zkušenostech operátora, který je neustále vystaven riziku střetu s projíždějícím vlakem.

Tradiční kontrola ultrazvukem je široce využívána a její hlavní výhodou je schopnost zkontrolovat vnitřní část materiálu, což je obtížné kteroukoliv jinou metodou. Nicméně kvůli mrtvé zóně, která znemožňuje zkontrolovat povrch, je vhodné tuto metodu používat v kombinaci s jinými metodami. Dále je důležité upozornit na skutečnost, že trhliny mohou být zakryty pod dlouhými horizontálními trhlínami, například v důsledku rozvoje povrchové vady squat. Magnetická prášková a kapilární metody umožňují zkontrolovat povrch materiálu, přesto jsou pomalé a pro kontrolu většího objemu materiálu se nehodí, proto se používají zřídka. Lepším řešením je použít konvenční sondy vířivých proudů. Tato metoda dokáže zkontrolovat velmi nebezpečnou oblast těsně pod povrchem kolejnice, a tudíž se nabízí jako skvělé doplnění k metodě UT.

4.2 Analýza moderních metod

Hlavní odlišnost, kterou se tato oblast vyznačuje, je rychlost provedení kontroly a také způsob hledání a diagnostiky vad. V tradičních přístupech kontrola byla provedena za přítomnosti člověka. U nových přístupů data sbírají senzory a následně jsou vyhodnocována externím softwarem. To má za následek zvýšení efektivity celého procesu a částečného odstranění lidského faktoru, který je považován za nejčastější příčinu nehod v této oblasti. Dříve se kontrola železničních kol především prováděla ve specializovaných dílnách. Současným trendem je kontrola vozidel při pohybu. Senzory se instalují podél tratí, u vjezdů do železničních dep nebo se také integrují přímo na vozidlo, což výrazně zkracuje čas diagnostiky.

Jako velmi perspektivní metoda se zdá být ABA, která má schopnost hledat povrchové vady kolejnic i kol současně, záleží jen na tom, jakou složku ze signálu se rozhodneme extrahovat. Její instalace je velmi jednoduchá a praktická a nevyžaduje žádné složité rámy, jako tomu bylo v případě konvenčních senzorů. Za nevýhodu lze považovat falešný poplach, který může být způsoben například přítomností cizího tělesa na povrchu kolejnice. Metoda je zejména vhodná pro kontrolu kol, jelikož vady nekruhovitosti vlivem otáčení kola způsobují periodické rázy a měřitelný signál je tedy lépe rozlišitelný. Zapojením umělé inteligence do této problematiky lze falešné poplachy do jisté míry eliminovat. Metoda ACT má hlavní výhodu v tom, že je bezkontaktní a nepotřebuje kontaktní médium, jako to bylo v případě konvenčního ultrazvuku. Zásadní problém této metody je slabý signál, který je způsoben vlivem odrazení akustických vln od povrchu materiálu. Nutnost instalace měřicího rámu zvyšuje finanční náklady. Metody AVT využívají optických kamer, které jsou schopné spolehlivě určit a klasifikovat povrchové vady. Jejich hlavní nevýhodou je problematická detekce trhlin, které ústí na povrchu a jeví se pouze jako malé mikroskopické body, které kamera není schopná rozlišit. Nicméně AVT je velmi vhodná pro kombinování s ostatními metodami, které tento nedostatek nahradí. U železničních kol paralelogramový mechanismus dokáže vadu najít a změřit s vysokou přesností, avšak detekuje pouze geometrické odchylky kola a nedokáže najít přítomnost povrchových nebo vnitřních trhlin. Podobně jako metoda PEU vyžaduje speciálně navrženou kolejnici, což může zvýšit náklady. Části kolejnice mimo jiné podléhají silnému opotřebení. FBG dokáže provést kontrolu kol ve velmi náročném prostředí, přičemž schopnost změřit odchylku poloměru od 0,06 mm je velmi nevídaná. Další unikátní technologií je využití bezpilotních letounů. Může se zdát, že tento přístup do daného odvětví úplně nezapadá, zejména kvůli možnosti zkontrolovat obtížně přístupné oblasti, což není pro danou problematiku příliš relevantní. Nicméně flexibilitu UAV lze vhodně využít například v městských částech při kontrole tramvajové tratě. Jelikož se zařízení pohybuje ve vzduchu, nedochází k narušení provozu. Navíc UAV není nijak vázáno na kolej, tudíž může jednoduše přelétnout a zkontrolovat jiný úsek tratě. Nevýhodou je citlivost na povětrnostní podmínky a závislost na denním světle.

Společným znakem, který lze pozorovat u většiny moderních metod, je citlivost senzorů na rušivé vlivy, což má za následek zhoršení kvality signálu, který nese informaci o závadách. Extrakce validních informací z tohoto signálu představuje v mnoha případech náročnou výzvu. Vývoj algoritmů a softwaru, které by dokázaly odstranit nežádoucí šum, je navíc finančně nákladný.

4.3 Kombinace metod

Důležité je si uvědomit, že v praxi dokonalá individuální metoda v podstatě neexistuje a každá má určité nedostatky. To je také důvod, proč je výzkum v této oblasti velmi rozsáhlý a neomezuje se výhradně na jednu skupinu metod. Proto je důležité zabývat se kombinováním jednotlivých přístupů, aby se navzájem doplňovaly. Princip tohoto kombinování lze vysvětlit na české diagnostické jednotce DJ NDT, která využívá UT, AVT a ECT. Tyto tři metody dokážou dokonale pokrýt celý objem kolejnice. UT detekuje vnitřní vady a systémy AVT a ECT detekují vady povrchové. AVT a ECT se dokonale doplňují tím, že trhliny, které se na povrchu projevují jako mikroskopické body, detekuje ECT a komplexnější kontrolu povrchových vad, jako squat, HC, koroze nebo shelling, provede AVT. Nevýhodou tohoto systému může být použití kontaktního média. Využívá se zde zejména technologická voda, kterou je nutné neustále doplňovat. Navíc se ultrazvukové sondy mohou opotřebit v důsledku kontaktu s povrchem kolejnice. Rychlost kontroly 70 km/h se zdá být dostačující.

4.4 Budoucnost

Přechod k systému prediktivní údržby je velmi důležitým posunem. Cílem tohoto konceptu je predikovat vývoj vad na základě získaných dat z různých zdrojů a určit, kdy trhlina dosáhne kritického stavu. Díky prediktivní údržbě lze tedy vhodně naplánovat údržbu tak, aby neprobíhala příliš často, což je finančně nákladné, a zároveň aby k ní nedošlo příliš pozdě, což by mělo fatální dopad na bezpečnost. Důležité je také pochopit charakter a proces šíření trhlin. Každá trhlina má svou dynamiku růstu a trvá určitou dobu, než se z malé vady stane vada nebezpečná. Vývoj vady lze predikovat na základě dat z provozu, jako jsou například hmotnost a frekvence projíždějících vlaků nebo dokonce i informace o počasí. Tento masivní objem dat je nutné zpracovat. V současnosti je největším trendem využití metod umělé inteligence. Tyto systémy se učí rozpoznat, jak rychle se určitý typ trhliny šíří, přičemž jako hlavní vstup využívají data z moderních systémů. Při nedostatku kvalitních dat ze senzorů lze využít simulačních modelů a data si uměle vytvořit.

5 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo zpracovat přehled moderních metod detekce defektů kolejnic i kol a odpovědět na otázku, jakým způsobem lze zefektivnit, zrychlit a celkově zvýšit bezpečnost železničního provozu. Bylo zvoleno celkem 14 metod, přičemž hlavními kritérii výběru byly jejich praktický význam a četnost využití. Hlavní důraz byl kladen na to, aby vybrané metody pocházely z různých technologických směrů a pokryly tak široké spektrum možností. Vzhledem k předepsanému rozsahu práce a rozsáhlosti problematiky byl detailnější popis věnován moderním metodám a tradiční přístupy byly zmíněny ve stručnější formě.

S ohledem na položenou otázku bylo dosaženo následujících závěrů. Prvním zjištěním bylo, že z uvedených metod neexistuje žádná, která by byla univerzální. Každý přístup vykazuje určité nevýhody. Proto je důležité zajistit jejich správnou kombinaci, díky níž se jednotlivé technologie mohou navzájem doplňovat a eliminovat své nedostatky. Kombinování metod tedy zajistí přesnější detekci, větší bezpečnost a schopnost diagnostikovat celý objem kolejnice. Bylo potvrzeno, že hlavní výhodou moderních přístupů je jejich rychlost a efektivita, zatímco tradiční přístupy jsou stále relevantní pro lokální kontrolu. Pro zavádění prediktivní údržby jsou data z moderních systémů naprosto klíčová, neboť slouží jako primární zdroj pro algoritmy využívající umělou inteligenci. Zdokonalování těchto algoritmů může výrazně zlepšit obsah užitečných dat, který jsme schopni získat ze senzorů, umožnit automatickou klasifikaci vad a zpřesnit jejich detekci. Navíc umělá inteligence úspěšně nahrazuje konvenční metody extrakce signálu, neboť velké množství proměnných faktorů v tomto prostředí představuje zásadní problém. Predikovat vývoj a šíření vad může výrazně snížit náklady spojené s údržbou.

Limitem této práce byla nutnost pokrýt systémy pro diagnostiku kol i kolejnic současně. Pro hlubší analýzu by bylo ideální tyto dvě oblasti rozdělit a popsat tak větší množství metod. Nicméně tato práce poskytuje solidní vhled do dané problematiky. Práce pojednává o přenosu zatížení, způsobu rozdělení vad, popisuje závažné vady, tradiční a moderní metody detekce defektů a nakonec i systém prediktivní údržby. Takto ucelený přehled může pomoci studentům, vědeckým pracovníkům nebo lidem z praxe, kteří se zabývají obecně defektoskopií.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CANNON, D. F., K.-O. EDEL, S. L. GRASSIE a K. SAWLEY. Rail defects: an overview. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. Wiley, 2003, 26(10), 865-886. ISSN 8756-758X. Dostupné z: doi:10.1046/j.1460-2695.2003.00693.x
- [2] KOU, Lei. A Review of Research on Detection and Evaluation of the Rail Surface Defects. *Acta Polytechnica Hungarica*. Obuda University, 2022, 19(3), 167-186. ISSN 1785-8860. Dostupné z: doi:10.12700/aph.19.3.2022.3.14
- [3] LEWIS, R. a U. OLOFSSON. 3. Wheel-Rail Contact Mechanics. In: *Wheel-Rail Interface Handbook*. Woodhead Publishing, 2009, s. 58-92. ISBN 978-1-84569-412-8. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0079ESNA/wheel-rail-interface/wheel-rail-contact-mechanics>
- [4] AUSTRALIAN RAIL TRACK CORPORATION LTD. *Rail Defects Handbook: Some Rail Defects, their Characteristics, Causes and Control* [online]. Australian Rail Track Corporation, 2006, 68 s. Dostupné také z: <https://extranet.artc.com.au/docs/eng/track-civil/guidelines/rail/RC2400.pdf>
- [5] SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY, STÁTNÍ ORGANIZACE. *Bezstyková kolej: SŽDC S3/2* [online]. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2013, 57 s. Dostupné také z: https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/139626480/20130901_S3L2.pdf/bc579fb7-6617-4b3a-bda8-66f2000c488a?version=1.0
- [6] SKAROVA, Ana, John HARKNESS, Matthew KEILLOR, David MILNE a William POWRIE. Review of factors affecting stress-free temperature in the continuous welded rail track. *Energy Reports*. Elsevier BV, 2022, 8(11), 107-113. ISSN 2352-4847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egy.2022.11.151
- [7] LEWIS, R. a U. OLOFSSON. 1. Introduction to Wheel-Rail Interface Research. In: *Wheel-Rail Interface Handbook*. Woodhead Publishing, 2009, s. 1-33. ISBN 978-1-84569-412-8. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0079ERC5/wheel-rail-interface/introduction-wheel-rail>
- [8] ČESKÉ DRÁHY. *Vady a lomy kolejnic: ČD S 67* [online]. České dráhy, 1997, 120 s. Dostupné také z: https://iwan.eu07.pl/jw/john_woods2008/predpisy/S/S67.pdf

- [9] HEYDER, Rene. The new UIC catalogue of rail defects. *Eisenbahningenieur* [online]. 2001, 52(9), 94-109 [cit. 2026-05-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/291496229_The_new_UIC_catalogue_of_rail_defects
- [10] YE, Yunguang, Haoqian LI, Qunsheng WANG, Fansong LI, Cai YI, Xinyu PENG, Caihong HUANG a Jing ZENG. Fault diagnosis of railway wheelsets: A review. *Measurement*. Elsevier BV, 2025, 242(E), 116169. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2024.116169
- [11] RAIL SAFETY AND STANDARDS BOARD. *Rail Industry Standard for Wheelsets* [online]. RSSB, 2017. Dostupné také z: <https://www.rssb.co.uk/standards-catalogue/CatalogueItem/RIS-2766-RST-Iss-1>
- [12] MIĆIĆ, Milica, Ljiljana BRAJOVIĆ, Luka LAZAREVIĆ a Zdenka POPOVIĆ. Inspection of RCF rail defects – Review of NDT methods. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. Elsevier BV, 2023, 182, 109568 [cit. 2026-05-08]. ISSN 0888-3270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymssp.2022.109568
- [13] LEWIS, R. a U. OLOFSSON. 8. Out-of-Round Railway Wheels. In: *Wheel-Rail Interface Handbook*. Woodhead Publishing, 2009, s. 245-279. ISBN 978-1-84569-412-8. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0079EVL3/wheel-rail-interface/out-round-railway-wheels>
- [14] WANG, Yu, Bingrong MIAO, Ying ZHANG, Zhong HUANG a Songyuan XU. Review on Rail Damage Detection Technologies for High-Speed Trains. *Applied Sciences*. MDPI, 2025, 15(14), 7725. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app15147725
- [15] WANDOWSKI, Tomasz, Damian MINDYKOWSKI, Pawel KUDELA a Maciej RADZIENSKI. Analysis of Air-Coupled Transducer-Based Elastic Waves Generation in CFRP Plates. *Sensors*. MDPI, 2021, 21(21), 7134. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21217134
- [16] PENG, Chaoyong, Xiaorong GAO, Zeyong WANG, Quanke ZHAO, Yu ZHANG, Jianping PENG a Kai YANG. Railway wheel defect dynamic inspection system based on ultrasonic technology. In: *2013 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology and Application*. Jinan, China: IEEE, 2013, s. 216-219. ISBN 978-1-4673-6020-3. Dostupné z: doi:10.1109/fendt.2013.6635560
- [17] PH PAPAELIAS, M, C ROBERTS a C L DAVIS. A review on non-destructive evaluation of rails: State-of-the-art and future development. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. SAGE Publications, 2008, 222(4), 367-384. ISSN 0954-4097. Dostupné z: doi:10.1243/09544097jrrt209

- [18] CLARK, Robin. Rail flaw detection: overview and needs for future developments. *NDT*. Elsevier BV, 2004, 37(2), 111-118. ISSN 0963-8695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2003.06.002
- [19] ZHAO, Yuliang, Zhiqiang LIU, Dong YI, et al. A Review on Rail Defect Detection Systems Based on Wireless Sensors. *Sensors*. MDPI, 2022, 22(17), 6409. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s22176409
- [20] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *Železniční aplikace - Infrastruktura - Nedestruktivní zkoušky kolejnic v koleji - Část 3: Požadavky na identifikaci vnitřních a povrchových vad kolejnic* [online]. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [21] HA, Jong Moon, Hong Min SEUNG a Wonjae CHOI. Autoencoder-based detection of near-surface defects in ultrasonic testing. *Ultrasonics*. Elsevier BV, 2022, 119, 106637. ISSN 0041-624X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ultras.2021.106637
- [22] DATTA, Diptojit a Francesco Lanza DI SCALEA. High-Speed Inspection of Rails by Passive Ultrasonic Monitoring. *Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*. ASME International, 2022, 5(4), 1-9. ISSN 2572-3901. Dostupné z: doi:10.1115/1.4055382
- [23] ZHANG, Xin, Yiming CUI, Yan WANG, Mingjian SUN a Hengshan HU. An improved AE detection method of rail defect based on multi-level ANC with VSS-LMS. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Elsevier BV, 2018, 99, 420-433. ISSN 0888-3270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymssp.2017.06.029
- [24] HAN, Zhiyuan, Guoshan XIE, Hongyun LUO, Mayorkinos PAPAELIAS a Claire DAVIS. Acoustic Emission Monitoring of Brittle Fatigue Crack Growth in Railway Steel. In: *Springer Proceedings in Physics* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 371-382 [cit. 2026-05-08]. ISBN 9783319290508. ISSN 0930-8989. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-29052-2_32
- [25] LI, Zili, Maria MOLODOVA, Alfredo NUNEZ a Rolf DOLLEVOET. Improvements in Axle Box Acceleration Measurements for the Detection of Light Squats in Railway Infrastructure. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015, 62(7), 4385-4397 [cit. 2026-05-08]. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/tie.2015.2389761
- [26] MOLODOVA, Maria, Zili LI, Alfredo NUNEZ a Rolf DOLLEVOET. Automatic Detection of Squats in Railway Infrastructure. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2014, 15(5), 1980-1990. ISSN 1524-9050. Dostupné z: doi:10.1109/tits.2014.2307955

- [27] YE, Yunguang, Bin ZHU, Ping HUANG a Bo PENG. OORNet: A deep learning model for on-board condition monitoring and fault diagnosis of out-of-round wheels of high-speed trains. *Measurement*. Elsevier BV, 2022, 199, 111268. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2022.111268
- [28] BELOTTI, Vittorio, Francesco CRENNNA, Rinaldo C. MICHELINI a Giovanni B. ROSSI. Wheel-flat diagnostic tool via wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Elsevier BV, 2006, 20(8), 1953-1966. ISSN 0888-3270. Dostupné z: doi:10.1016/j.ymssp.2005.12.012
- [29] WU, Yunpeng, Yong QIN, Zhipeng WANG a Limin JIA. A UAV-Based Visual Inspection Method for Rail Surface Defects. *Applied Sciences*. MDPI, 2018, 8(7), 1028. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app8071028
- [30] Magnetická prášková metoda. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2026-05-08]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetická_prášková_metoda
- [31] XIONG, Zhimin, Qingquan LI, Qingzhou MAO a Qin ZOU. A 3D Laser Profiling System for Rail Surface Defect Detection. *Sensors*. MDPI, 2017, 17(8), 1791. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s17081791
- [32] WILSON, John, Guiyun TIAN, Ilham MUKRIZ a Darryl ALMOND. PEC thermography for imaging multiple cracks from rolling contact fatigue. *NDT*. Elsevier BV, 2011, 44(6), 505-512. ISSN 0963-8695. Dostupné z: doi:10.1016/j.ndteint.2011.05.004
- [33] GAO, Run, Qixin HE a Qibo FENG. Railway Wheel Flat Detection System Based on a Parallelogram Mechanism. *Sensors*. MDPI, 2019, 19(16), 3614. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19163614
- [34] RIZA, Muhammad Arif, Yun Ii GO, Sulaiman Wadi HARUN a Robert R. J. MAIER. FBG Sensors for Environmental and Biochemical Applications—A Review. *IEEE Sensors Journal*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2020, 20(14), 7614-7627. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/jsen.2020.2982446
- [35] DU, Cong, Susom DUTTA, Pradeep KURUP, Tzuyang YU a Xingwei WANG. A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*. Elsevier BV, 2020, 303, 111728. ISSN 0924-4247. Dostupné z: doi:10.1016/j.sna.2019.111728
- [36] LIU, Xiao-Zhou, Chi XU a Yi-Qing NI. Wayside Detection of Wheel Minor Defects in High-Speed Trains by a Bayesian Blind Source Separation Method. *Sensors*. MDPI, 2019, 19(18), 3981. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19183981

- [37] SPRÁVA ŽELEZNIC. Diagnostická jednotka DJ NDT. *Centrum techniky a diagnostiky* [online]. [cit. 2026-05-08]. Dostupné z: <https://www.tudc.cz/index.php/diagnosticke-prostredky/dj-ndt/>
- [38] BINDER, Mario, Vitaliy MEZHUYEV a Martin TSCHANDL. Predictive Maintenance for Railway Domain: A Systematic Literature Review. *IEEE Engineering Management Review*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2023, 51(2), 120-140. ISSN 0360-8581. Dostupné z: doi:10.1109/emr.2023.3262282

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

7.1 Použité zkratky

ABA	Metoda založená na akcelerometrech
ACT	Měníče se vzduchovou vazbou
AE	Akustická emise
AVT	Automatizovaná vizuální kontrola
ČR	Česká republika
DJ NDT	Diagnostická jednotka pro nedestruktivní zkoušení kolejnic
ECT	Testování pomocí konvenčních sond vířivých proudů
ET	Elektromagnetické testování
FBG	Vláknová Braggova mřížka
FOS	Optovláknové senzory
GPS	Globální polohový systém
GSME	Gray Stretch Maximum Entropy
HC	Head Checking
IR	Infrared
LED	Světlo emitující dioda
LWLC	Local Weber Like Contrast
MT	Magnetická prášková metoda
N&V	Testování na základě měření hluku a vibrací
NDT	Nedestruktivní testování
OORNet	Out-Of-Roundness Network

PC	Osobní počítač
PEC	Termografie využívající pulzní vířivé proudy
PEU	Piezoelektrická ultrazvuková metoda
RCF	Únava valivého kontaktu
UAV	Bezpilotní letoun
UT	Ultrazvukové testování
VT	Vizuální testování

7.2 Použité symboly

θ	Úhel dopadu
λ	Vlnová délka
Λ	Perioda mřížky

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Následky nehody	13
Obr. 3-1 Oblasti kolejnice	16
Obr. 3-2 Rozdělení vad kol	16
Obr. 3-3 Squat	17
Obr. 3-4 Head checking	18
Obr. 3-5 Shelling	18
Obr. 3-6 Vlnkovitost	19
Obr. 3-7 Příčná trhlina	19
Obr. 3-8 Ploché místo na jízdni ploše	20
Obr. 3-9 Polygonální kola	21
Obr. 3-10 Trhlina v důsledku brzdění na jízdni ploše	21
Obr. 3-11 Trhlina v důsledku RCF na jízdni ploše	22
Obr. 3-12 Oblast trhlín na jízdni ploše doprovázena vylupováním	22
Obr. 3-13 Klasifikace metod kolejnic a kol	23
Obr. 3-14 Typy vln v závislosti na úhlu dopadu	24
Obr. 3-15 Přeměna dopadajících akustických vln	25
Obr. 3-16 ACT připevněny na měřicím rámu	26
Obr. 3-17 Ultrazvukové sondy umístěné v kolejnici	26
Obr. 3-18 Princip metody ABA	27
Obr. 3-19 Testovací vozidlo	28
Obr. 3-20 Trénování modelu OORNet na základě dat ze simulačního modelu	29
Obr. 3-21 Rozptyl magnetického pole a hromadění prášku	30

Obr. 3-22 Princip metody AVT s využitím 3D laseru	31
Obr. 3-23 Nosná platforma	32
Obr. 3-24 Bezpilotní letoun	33
Obr. 3-25 Princip metody PEC	34
Obr. 3-26 Paralelogramový mechanismus	35
Obr. 3-27 Ukázka mechanismu	35
Obr. 3-28 Posun vlnové délky v závislosti na deformaci optického vlákna	36
Obr. 3-29 Konfigurace FBG systému	37
Obr. 3-30 Rozdělení naměřeného signálu	37
Obr. 3-31 Diagnostická jednotka pro nedestruktivní zkoušení kolejnic	38
Obr. 3-32 Měřicí podvozek k zajištění diagnostického zařízení	39

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Srovnání metod detekce defektů kolejnic a kol	41
--	----