TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií

Diagnostický systém tramvajových podvozků

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika

Autor práce: **Bc. Michal Roško**

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.

Liberec 2016

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies

Tram Undercarriages Diagnostic System

Master thesis

Study programme: N2612 – Electrotechnology and Informatics

Study branch: 3902T005 – Automatic Control and Engineering Informatics

Author: **Bc. Michal Roško**

Supervisor: doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D.

Liberec 2016

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Akademický rok: **2015/2016**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Michal Roško**
Osobní číslo:	**M14000189**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Automatické řízení a inženýrská informatika**
Název tématu:	**Diagnostický systém tramvajových podvozků**
Zadávající katedra:	**Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Zásady pro vypracování:

1. Popište jednotlivé diagnostické uzly systému realizovaného v Dopravním podniku měst Liberce a Jablonce nad Nisou.
2. Analyzujte informace získané z jednotlivých měřících pracovišť a navrhněte případné propojení jejich datového toku.
3. Navrhněte celkovou optimální sestavu pracoviště pro testování tramvajových podvozků. Vytvořte výstupní software protokolu a navrhněte jeho správu a archivaci protokolů na datovém úložišti DPMLJ.
4. V závěru navrhněte další opatření pro zlepšení diagnostického systému v jednotlivých stanovištích a celku.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 40–50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] **HELEBRANT, František; ZIEGLER, Jiří. Technická diagnostika a spolehlivost II.: Vibrodiagnostika. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. 178 s. ISBN 80-248-0650-9**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Josef Černohorský, Ph.D.**
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Pavel Němeček**
Katedra vozidel a motorů

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 12. 5. 2016

Podpis: Rosler

Poděkování

Mé poděkování patří především panu doc. Ing. Josefu Černohorskému, Ph.D. za zodpovědný přístup k vedení práce, věcné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Josefu Kolářovi za trpělivost, vstřícnost a poskytnuté materiály. Za rady a osvětlení některých problémů děkuji rovněž Ing. Janu Křepelovi, Ph.D. a Ing. Richardu Schreiberovi. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat také své rodině za materiální i duševní podporu během celého studia a své přítelkyni za pomoc při finálních korekcích práce.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá diagnostikou tramvajových podvozků tramvají Tatra T3. Popisuje stávající systém fungující v Dopravním podniku měst Liberce a Jablonce nad Nisou, a.s. (DPMLJ). Především se zaměřuje na diagnostiku převodovek, za jejímž účelem je v dílně těžké údržby DPMLJ k dispozici měřicí stolice. Snaží se analyzovat výsledky tohoto měření a na základě toho rozhodnout o přítomnosti závad v převodovce. Navrhuje rovněž možná zlepšení tohoto měřicího procesu. V rámci této diplomové práce také vzniká aplikace, která z dat naměřených na této stolici generuje protokoly o měření. Dále je zde navržen systém diagnostiky vibrací za provozu tramvaje, a systém sběru dat o jednotlivých dílech pro dílnu dopravního podniku.

Klíčová slova

technická diagnostika, vibrodiagnostika, tramvajové podvozky, systém sběru dat

Abstract

Thesis deals with diagnostics of undercarriages of trams Tatra T3. The present state of system used in transport company of Liberec and Jablonec nad Nisou (DPMLJ) is described in it. Thesis is especially focused on system for diagnosing gearboxes, for which purpose there is a measuring station in DPMLJ. Thesis decides about presence of malfunctions on gearboxes based on results of analysis of those measurements. It also suggests possible improvements of the measurement process. A PC application for processing and visualization of data measured on gearboxes has also been implemented within the thesis. In the final part of the thesis the new system for vibration diagnostics during normal operation is suggested as well as a system for collecting data about undercarriages parts in DPMLJ.

Keywords

technical diagnostics, vibrodiagnostics, tram undercarriages, data acquisition system

Obsah

Seznam obrázků 11
Seznam tabulek 11
Seznam zkratek 13

1 Podvozek vozu Tatra T3 **16**
1.1 Motor 17
1.2 Převodovka 18
1.3 Kolo 19

2 Zpracování signálů **20**
2.1 Digitalizace signálu 20
2.1.1 Chyba vzorkování 21
2.1.2 Chyba kvantování 21
2.2 Frekvenční analýza 21
2.2.1 Fourierova transformace spojitého signálu 22
2.2.2 Fourierova transformace diskrétního signálu (DTFT) 22
2.2.3 Diskrétní Fourierova transformace (DFT) 22
2.3 Vibrodiagnostika 23
2.3.1 Vibrace a jejich měření 23
2.3.2 Zpracování naměřených vibrací 24
2.3.3 Analýza poruch převodovky 26

3 Systém diagnostiky podvozků v DPMLJ **30**
3.1 Měření a úprava profilu nákolků 30
3.2 Měření motorů 31
3.2.1 Průběh a prostředky měření 31

3.3 Měření převodovek . . . 33
3.3.1 Průběh měření . . . 34
3.3.2 Prostředky měření . . . 34
3.3.3 Nastavení modulu pro sledování technického stavu zařízení . . . 35
3.4 Návrh propojení toku dat . . . 37

4 Aplikace pro generování protokolů o měření převodovek 38
4.1 Jazyk XML . . . 38
4.2 Vývojové prostředí . . . 39
4.2.1 Knihovna OxyPlot . . . 39
4.2.2 Knihovna iTextSharp . . . 39
4.2.3 Knihovna Xml.XPath . . . 39
4.2.4 Třída FTP . . . 40
4.3 Návrh formátu ukládaných dat . . . 40
4.4 Vytvoření aplikace . . . 40
4.4.1 Přístup k FTP . . . 41
4.4.2 Načtení souboru . . . 41
4.4.3 Vykreslení grafů . . . 43
4.4.4 Vytvoření PDF dokumentu . . . 43
4.5 Použití aplikace . . . 44

5 Sběr dat o údržbě 46
5.1 Současný stav . . . 46
5.1.1 Povinně tvořené legislativní materiály . . . 46
5.1.2 Provozně technická data údržby . . . 47
5.2 Návrh zlepšení systému sběru dat o údržbě . . . 47
5.2.1 Databáze . . . 47
5.2.2 Systém sběru dat za provozu . . . 48
5.2.3 Systém pro dílnu DPMLJ . . . 50

Použitá literatura 56

A Obsah přiloženého CD 60

B Parametry ložisek **61**

C Měřené parametry vibrací převodovky **62**

D Navržená XML struktura **63**

E Navržená struktura databáze **65**

F Navržený systém pro dílnu DPMLJ **66**

G Vývojový diagram vytvořené aplikace **67**

Seznam obrázků

1.1 Podvozek tramvajového vozu Tatra T3 [3] 16
1.2 Schéma motoru TE 022 - boční a čelní pohled [4] 17
1.3 Schéma převodovky [4] 18
1.4 Schéma kola [4] 19

2.1 Relativní četnost pro různé hodnoty špičatosti [12] 25
2.2 Relativní četnost pro různé hodnoty šikmosti [12] 26
2.3 Postranní pásma záběrové frekvence [14] 27

3.1 Pracoviště pro měření a úpravu profilu nákolků 31
3.2 Schéma zapojení měřicí stanice motorů [16] 32
3.3 Stanice pro měření motorů 32
3.4 Stolice s převodovkou při právě probíhajícím měření 33
3.5 Rozvodná skříň vně klece 35

4.1 Okno formuláře vytvořené aplikace 45

5.1 Myšlenková mapa propojení součástí pro měření vibrací za provozu . 49

B.1 Rozměry ložiska [34] 61

E.1 Návrh struktury databáze 65

F.1 Schéma toku dílů a dat dílnou DPMLJ 66

G.1 Vývojový diagram aplikace pro generování měřicích protokolů ze stanice měření převodovek 67

Seznam tabulek

3.1 Vypočítaná poruchová frekvence ozubení a vzdálenosti postranních pásem 36
3.2 Vypočítané poruchové frekvence jednotlivých ložisek 36

B.1 Parametry ložisek použitých v tramvajové převodovce 61

C.1 Výčet parametrů poskytovaných modulem pro sledování technického stavu zařízení stanice pro měření vibrací na převodovkách [35] 62

Seznam zkratek

ADC	analogově-číslicový převodník (Analog to digital converter)
DFT	diskrétní Fourierova transformace (Discrete Fourier transform)
DTFT	Fourierova transformace s diskrétním časem (Discrete-time Fourier transform)
DPMLJ	Dopravní podnik měst Liberec a Jablonec nad Nisou, a.s.
FFT	rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier transform)
FTP	síťový protokol pro přenos souborů (File transform protocol)
HTML	značkovací jazyk pro tvorbu webových stránek (HyperText Markup Language)
ord	jednotka frekvence vztažené k základní frekvenci otáčení stroje (order)
ot/min	otáčky za minutu
PC	osobní počítač (Personal Computer)
PLC	programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)
PDF	přenosný formát dokumentu (Portable Document Format)
RFID	radiofrekvenční systém identifikace (Radio Frequency Identification)
RMS	efektivní hodnota (Root mean square)
TUL	Technická univerzita v Liberci
XLS	formát Excel dokumentu (Excel spreadsheet)
XML	rozšiřitelný značkovací jazyk (Extensible Markup Language)

Úvod

Již v roce 1897 byla v Liberci postavena a uvedena do provozu první tramvajová trať v úseku mezi nádražím a Lidovými sady. Postupem času byla tramvajovými kolejemi spojena i další místa a vznikla tak síť pokrývající nejen toto město, ale i přilehlý Jablonec nad Nisou. V současné době tyto tratě čítají celkem 16 km a jsou spravovány Dopravním podnikem měst Liberce a Jablonce nad Nisou, a.s. (DPMLJ). Ten disponuje 67 tramvajovými vozy, kterými se snaží zajistit každodenní potřebu přepravy osob a odlehčit tak městu od splodin a hluku způsobených automobilovou dopravou [1], [2].

Přibližně dvě třetiny tramvajových vozů jsou denně v provozu, zbylé se renovují nebo slouží jako náhrada při případné nehodě či poruše. Většina tramvajového vozového parku je tvořena vozy Tatra T3. Tyto tramvaje byly vyráběny v letech 1962 až 1976 a DPMLJ se stará o jejich postupnou modernizaci. Ta je levnější alternativou k obměně vozového parku novými modely. Z hlediska komfortu cestování se sice tímto krokem pouze přibližuje nikoliv vyrovnává současným nejnovějším modelům, avšak ekonomická stránka věci zde hraje významnou roli. Cenová dostupnost tohoto řešení souvisí především se zkušenostmi, které DPMLJ během let práce s tramvajemi tohoto typu získal.

S ohledem na stáří vozů je velmi důležitá pravidelná údržba, která obnáší mimo jiné kontrolu podvozků. V rámci spolupráce DPMLJ a TUL byla vyvinuta testovací stolice pro převodovky a měřicí nadstavba na stávající stolici pro měření trakčních motorů, které mají za úkol usnadnit diagnostiku závad na těchto součástech.

Tato práce se zabývá popisem těchto měřících stolic a vyhodnocováním dat, jež jsou jejich výstupem. Řeší problematiku diagnostiky závad převodovek na základě měření jejich vibrací. Zabývá se možnými zlepšeními tohoto procesu. V rámci práce je realizována aplikace generující protokoly o tomto měření. Dále práce analyzuje

stávající systém sběru a archivace dat o údržbě a snaží se navrhnout s ohledem na současné trendy jeho modernizaci a rozšíření o systém měření vibrací za provozu.

1 Podvozek vozu Tatra T3

Tramvajový vůz Tatra T3, je osazen dvěma stejnými podvozky, jež vidíme na obrázku 1.1. Jedná se o dvounápravový trakční podvozek, jehož rám je vytvořen ze dvou příčníků a dvou podélníků. V podélnících jsou uchyceny nápravy. Každá z náprav má nalisovaná, pryží vypružená kola.

Obrázek 1.1: Podvozek tramvajového vozu Tatra T3 [3]

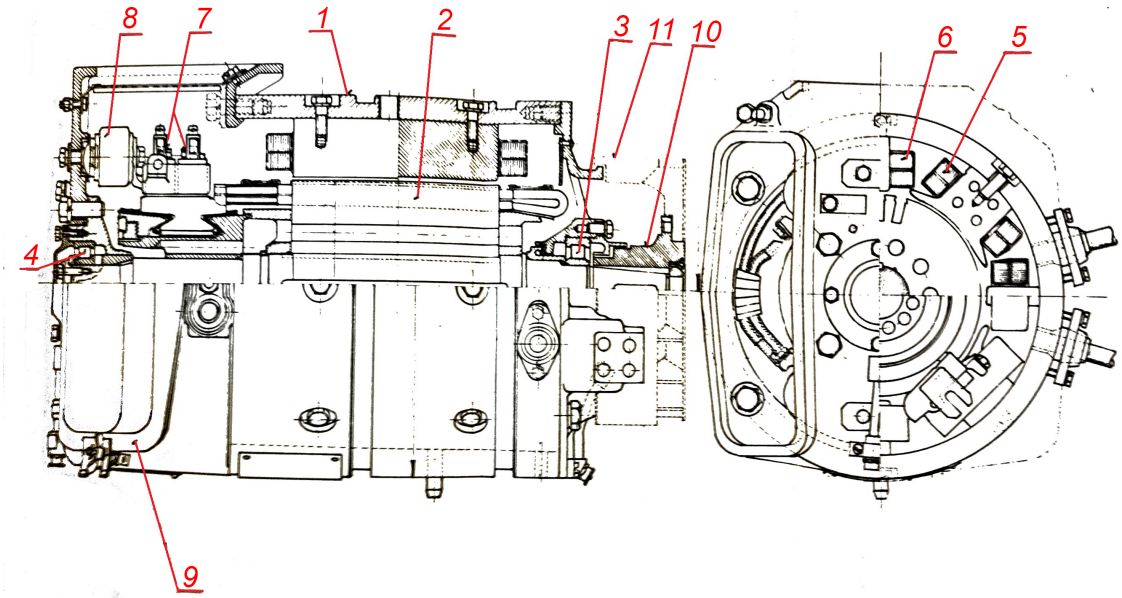
Podvozek má dvě převodovky a každá z nich je hnána vlastním trakčním motorem. Osa motoru je rovnoběžná s podélnou osou podvozku. Točivý moment se z motoru na převodovku přenáší kardanovou hřídelí.

Podvozek je dále opatřen třecí čelistovou brzdou a elektromagnetickou kolejnicovou brzdou. K brzdění se také využívá generátorického režimu motoru [3]. Dále se budeme podrobněji zabývat motorem, převodovkou a koly.

1.1 Motor

Podvozek je poháněn dvojicí shodných stejnosměrných motorů se sériovým buzením, která je napájena stejnosměrným napětím 600 V z troleje. Jedná se o motor typu TE 022 se základními parametry:

- jmenovitý výkon 40 kW;
- jmenovité napětí 300 V;
- jmenovitý proud 150 A;
- jmenovité otáčky 1750 ot/min.



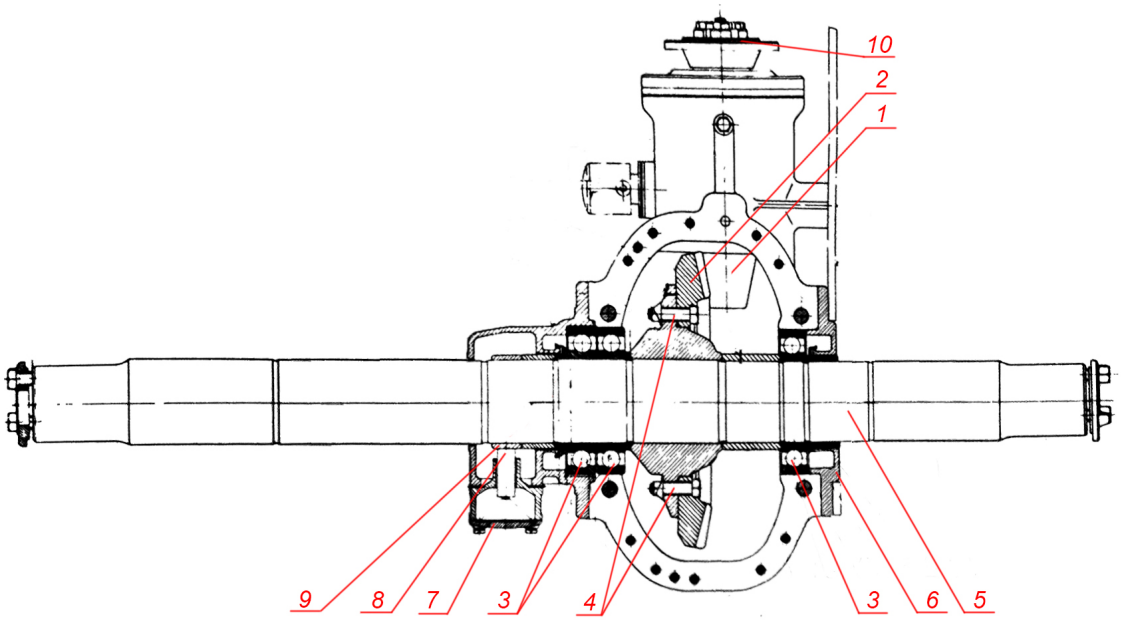
Obrázek 1.2: Schéma motoru TE 022 - boční a čelní pohled [4]

Schéma tohoto motoru vidíme na obrázku 1.2. Stator (1) motoru je uchycen pomocí pásů a má čtyři hlavní póly (5) a čtyři pomocné póly (6). Rotor (2) je uložen na ložiscích (3,4). Sběrné ústrojí se skládá z osmi kartáčů s držáky (7) připevněnými izolátory (8), ke kterým je díky odnímatelným krytům (9) umožněn snadný přístup. Motor je chlazen vzduchem z nezávislé ventilace. Na konci hřídele je nasazen buben pro čelisťovou brzdu (11) a náboj spojky kardanové hřídele (10) [4].

1.2 Převodovka

V každém podvozku jsou dvě převodovky sloužící k přenosu hnací síly z kardanové spojky na nápravu. Základní parametry převodovky:

- převodový poměr 7,43;
- přípustné otáčky na vstupní hřídeli 3000 ot/min;
- přechodné otáčky na vstupní hřídeli 4000 ot/min.



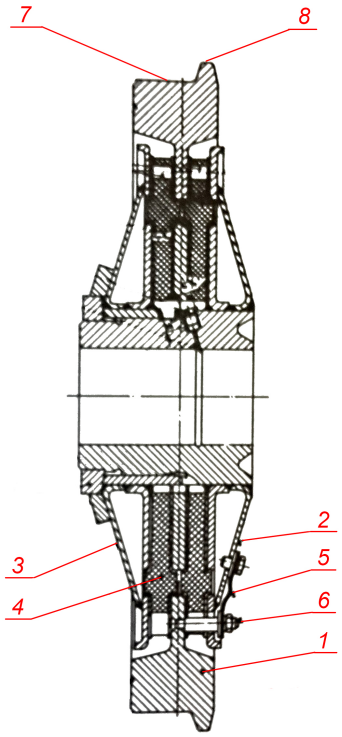
Obrázek 1.3: Schéma převodovky [4]

Schéma převodovky vidíme na obrázku 1.3. Soukolí převodovky je hypoidní a obsahuje jeden pár ozubených kol - pastorek (1) se 7 zuby a talířové kolo (2) s 52 zuby. Jejich osy jsou mimoběžné. Pastorek je uložen ve dvou válečkových ložiscích typů NU2315 a NU412 a dvou kuželíkových ložiscích typu 31313 a je na něm připevněn náboj (10) pro připevnění kardanové hřídele. Talířové kolo je upevněno šrouby (4) na náboji, který je nalisován na nápravě (5). Uložení talířového kola tvoří tři kuličková ložiska typu 6222 (3). Parametry vyjmenovaných ložisek jsou uvedeny v příloze B.

Převodová skříň je složena ze dvou dílů, jejichž dělící rovina je šikmá. K této skříni je dále připojeno na jednom boku víko (6) a na druhém skříň (7), v níž je umístěn izolovaný sběrač. Přes uhlík (8) tohoto sběrače je veden proud z motoru na sběrací kroužek (9) nalisovaný na nápravě a odtud přes kola do kolejnice [4].

1.3 Kolo

Součástí každého podvozku jsou čtyři pryží vypružená kola nalisovaná na nápravách. Kolo (viz schéma na obrázku 1.4) se skládá z disku s nákolkem (1), náboje s diskem (2), pouzdra s diskem (3) a dvou pružných vložek (4). Měděná propojka (5) přenášející zemní potenciál propojuje disk nákolku opatřený čepem (6) s pouzdrem. Nákolek je z vnější strany tvořen pojezdovou plochou (7) a okolkem (8) [4].



Obrázek 1.4: Schéma kola [4]

Průměr nového nákolku je 700 *mm*. Při jízdě dochází k jeho opotřebení a tím se tento průměr zmenšuje. Dojde-li ke snížení pod hranici 625 *mm*, pak je nákolek vyřazen. Tento parametr je rovněž důležitý pro párování náprav, podvozků a spojování vozů. V běžném provozu nesmí rozdíl průměrů jakékoliv dvojice nákolků v rámci dvou spojených vozů přesáhnout 20 *mm*. Při reprofilaci kol je tento limit ještě přísnější. Maximální rozdíl průměrů nákolků na jedné nápravě nesmí přesáhnout 1 *mm*, mezi nápravami v jednom podvozku 2 *mm*, mezi dvěma podvozky 4 *mm* a mezi dvěma spojovanými vozy nesmí přesáhnout 8 *mm* [5].

2 Zpracování signálů

Stejně jako v mnoha jiných odvětvích se i při diagnostice tramvajových podvozků využívá znalostí z oblasti zpracování signálů. Tento obor říká, jak z určitých naměřených dat získat potřebné informace, ze kterých lze následně vyvodit kýžené závěry.

Signálem nazýváme změnu určité fyzikální veličiny v čase, v této proměnlivosti bývá uložena informace. Zjistíme-li tedy průběh měřené veličiny x v čase t získáme analogový signál $x(t)$. Jedná se o signál spojitý v čase, který může nabývat nekonečně mnoha úrovní hodnot.

2.1 Digitalizace signálu

I když měřený signál bývá zpravidla analogový, zpracování signálů probíhá v současné době ve většině případů v číslicové podobě. Signál je tedy třeba digitalizovat, to znamená provést jeho diskretizaci v čase zpravidla s ekvidistantními kroky (vzorkování) a v úrovních (kvantování). Vznikne tak posloupnost hodnot $x[n]$, kde n je celé číslo a každý n-tý vzorek odpovídá času $t = nT_v$. T_v je perioda vzorkování. O převod analogového signálu na číslicový se stará analogově číslicový převodník (ADC) [6].

Je zřejmé, že při procesu digitalizace není zachována veškerá informace obsažená v původním analogovém signálu. Potýkáme se principiálně se dvěma problémy:

- chyba vzorkování,
- chyba kvantování.

2.1.1 Chyba vzorkování

Mezi dvěma okamžiky vzorkování existuje časový interval, ve kterém nejsme schopni říci, jaká byla skutečná hodnota původního analogového signálu. Po navzorkování pokládáme signál v tomto čase za konstantní. Tento předpoklad však může vést k chybě označované jako aliasing (překládání frekvencí). Chceme-li se této chyby vyvarovat, musíme dodržet vzorkovací teorém $f_V > 2f$, který říká, že vzorkovací frekvence f_V musí být větší než dvojnásobek jakékoliv frekvence f obsažené ve vzorkovaném signálu. V praxi se aliasingu předchází pomocí analogového dolnopropustního filtru se zlomovou frekvencí $f_V/2$, který se předřadí vzorkovacímu obvodu [6, str. 12].

2.1.2 Chyba kvantování

Při kvantování analogového signálu se každé jeho hodnotě přiřazuje nejbližší kvantizační úroveň z oboru hodnot výsledného diskrétního signálu. Uvažujeme-li tedy ekvidistantní rozdělení kvantizačních úrovní v rámci celého oboru hodnot s krokem Δx, pak může dojít k chybě v rozmezí $\langle -\Delta x/2, \Delta x/2 \rangle$. Výsledkem je tedy signál s tzv. kvantizačním šumem. Počet kvantizačních úrovní je pro k-bitový ADC roven 2^k [6, str. 13].

2.2 Frekvenční analýza

V signálu často zkoumáme přítomnost frekvencí jeho změn. Ta nám může o jeho charakteru mnohé napovědět. Základem pro frekvenční analýzu je fakt, že jakákoliv periodická funkce $x(t)$ s periodou T lze rozložit pomocí Fourierovy řady (vztah 2.1) na součet nekonečně mnoha exponenciál.

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} F_k \mathrm{e}^{j\frac{2\pi}{T}kt}, \tag{2.1}$$

kde j je imaginární jednotka a Fouruierovy koeficienty F_k jsou dány vztahem

$$F_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \mathrm{e}^{-j\frac{2\pi}{T}kt} \mathrm{d}t, \tag{2.2}$$

kde $k \in Z$ [6, str. 23].

2.2.1 Fourierova transformace spojitého signálu

Signál $x(t)$ se za účelem frekvenční analýzy převádí z časové oblasti do frekvenční oblasti, kde ho označujeme $X(\mathrm{e}^{j\omega})$ a nazýváme frekvenčním spektrem signálu $x(t)$. K tomuto převodu slouží Fourierova transformace, kterou vyjadřuje vztah

$$X(\mathrm{e}^{j\omega}) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\mathrm{e}^{-j\omega t}\mathrm{d}t, \tag{2.3}$$

kde $\omega = \frac{2\pi}{T}$ vyjadřuje úhlovou frekvenci. Obdobně pak platí vztah pro zpětný převod z frekvenční do časové oblasti [6, str. 24]

$$x(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{0}^{2\pi} X(\mathrm{e}^{j\omega})\mathrm{e}^{j\omega t}\mathrm{d}\omega. \tag{2.4}$$

2.2.2 Fourierova transformace diskrétního signálu (DTFT)

Nejen spojitý, ale i diskrétní signál $x[n]$ s periodou vzorkování T_v lze převést do frekvenční oblasti. Pro tento účel platí vztah [7, str. 61]

$$X(\mathrm{e}^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]\mathrm{e}^{-j\omega n}. \tag{2.5}$$

Pro zpětný převod do diskrétní časové oblasti slouží vztah [7, str. 62]

$$x[n] = \frac{1}{2\pi}\int_{0}^{2\pi} X(\mathrm{e}^{j\omega})\mathrm{e}^{j\omega nT_v}\mathrm{d}\omega. \tag{2.6}$$

2.2.3 Diskrétní Fourierova transformace (DFT)

V obou předchozích případech bylo výsledkem převodu do frekvenční oblasti spojité frekvenční spektrum. Pro počítačové zpracování je však výhodné pracovat, spíše než se spojitými hodnotami, s hodnotami diskrétními. K tomuto účelu slouží diskrétní Fourierova transformace, jejímž vstupem je periodický diskrétní signál $x[n]$ s periodou N vzorků a výstupem diskrétní spektrum $X[k]$ původního signálu. Pro výpočet

DFT používáme vztah

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \mathrm{e}^{-j\frac{2\pi k}{N}n}, \tag{2.7}$$

kde $k = 0, 1, \ldots, N-1$. Člen $X[k]$ pak odpovídá úhlové frekvenci $\omega[k] = \frac{2\pi k}{N}$ [7, str. 226]. Zpětný převod diskrétního spektra $X[k]$ na diskrétní signál $x[n]$ je dán vztahem

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \mathrm{e}^{j\frac{2\pi k}{N}n}, \tag{2.8}$$

kde $n = 0, 1, \ldots, N-1$ [7, str. 231].

Rychlá Fourierova transformace (FFT)

Výpočet DFT se běžně provádí pomocí algoritmu označovaného jako rychlá Fourierova transformace. Podmínkou je splnění délky vstupního signálu $N = 2^m$, kde m je přirozené číslo. Časová složitost tohoto algoritmu je $O(Nlog(N))$, což oproti DFT počítanému dle definice, jehož časová složitost je $O(N^2)$), znamená značné zrychlení [7, str. 262].

2.3 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostika je obor technické diagnostiky zkoumající vibrace mechanických rotačních strojů a na základě tohoto zkoumání zjišťuje informace o stavu těchto strojů. Dokáže tak diagnostikovat vnitřní poruchy a napomáhá tím při plánování údržby [8].

2.3.1 Vibrace a jejich měření

Vibrace představují pohyb tělesa, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy. Při jejich měření zaznamenáváme výchylku polohy, rychlosti nebo zrychlení, přičemž poslední jmenovaná možnost je nejčastěji využívaná. Senzory pro měření zrychlení nazýváme akcelerometry.

Piezoelektrické akcelerometry

Piezoelektrické akcelerometry jsou nejrozšířenějším typem mezi snímači vibrací. Jejich přednostmi jsou pasivita (není třeba je napájet), dlouhodobá stabilita a široký frekvenční rozsah. Využívají piezoelektrický krystal, který při působící síle (zrychlení) vytváří napětí mezi svými opačnými konci.

Piezorezistivní akcelerometry

Piezorezistivní akcelerometry mají ze všech akcelerometrů nejvyšší citlivost. Nevýhodou je teplotní závislost. Principem je převod síly vytvořené seismickou hmotou na změnu odporu piezorezistivního elementu. Obvykle je dvojice těchto elementů zapojena do můstku, na nějž je přivedeno napětí a měří se jeho napěťové rozvážení.

Kapacitní akcelerometry

Kapacitní akcelerometry jsou velmi přesné a citlivé, nevýhodu však je úzký frekvenční rozsah. Při pohybu seismické hmoty dochází ke zvětšení jedné kapacity a současnému zmenšení druhé kapacity. Na sériové spojení těchto dvou kapacit je přivedeno napětí a měří se napětí mezi nimi.

Laserové interferometrické vibrometry

Laserové interferometrické senzory vibrací fungují na rozdíl od všech výše uvedených typů akcelerometrů bezdotykově. Mají velmi široký frekvenční rozsah a vysokou přesnost. Nevýhodou zpravidla bývá jejich vyšší cena. Jsou založeny na principu sledování interferenčního obrazce vzniklého ze dvou laserových paprsků dopadajících na měřený objekt [9].

2.3.2 Zpracování naměřených vibrací

Vibrace, naměřené jako závislost zrychlení (případně rychlosti nebo polohy) na čase, tvoří diskrétní signál $x[n] = x_n$ délky N, který budeme dále zpracovávat. Popíšeme nyní některé jeho důležité sledované vlastnosti. K tomu budeme potřebovat průměrnou hodnotu $\overline{x}$ signálu a směrodatnou odchylku s.

Vrchol (Peak)

Vrcholová hodnota x_P je maximální hodnota v naměřeném signálu. Lze vyjádřit vztahem

$$x_P = \max x_n. \tag{2.9}$$

Efektivní hodnota (RMS)

Efektivní hodnota (Root Mean Square) x_{RMS} vyjadřuje energii signálu a lze ji vypočítat pomocí vztahu [10]

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N} x_n^2}{N}}. \tag{2.10}$$

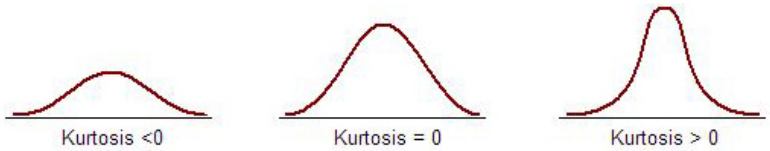
Nárazovost (Crest factor)

Nárazovost x_{CF} vyjadřuje do jaké míry signál obsahuje špičky, které se výrazně vzdalují od jeho průměrné hodnoty [11]. Je bezrozměrná a je dána vztahem

$$x_{CF} = \frac{x_P}{x_{RMS}}. \tag{2.11}$$

Špičatost (Kurtosis)

Špičatost x_K popisuje tvar křivky relativní četnosti. Grafy relativní četnosti pro různé hodnoty špičatosti můžeme vidět na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Relativní četnost pro různé hodnoty špičatosti [12]

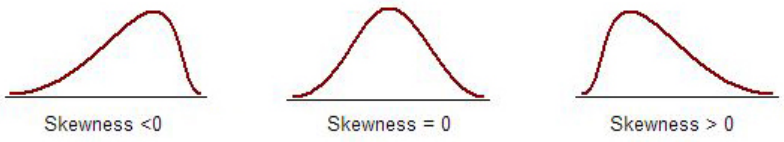
Nulovou špičatost má normální rozdělení. Kladná špičatost značí, že se více hodnot blíží aritmetickému průměru. Záporná naopak znamená hodnoty více rozptýlené ke kraji funkce relativní četnosti [13]. Špičatost vypočítáme ze vztahu

$$x_K = \frac{\sum_{n=1}^{N} (x_n - \overline{x})^4}{N s^4}. \tag{2.12}$$

Šikmost (Skewness)

Šikmost x_S popisuje symetričnost dat. Nulová hodnota znamená symetrickou křivku relativní četnosti. Kladná šikmost znamená vyšší četnost malých hodnot oproti četnosti velkých hodnot. Analogicky záporná šikmost značí vyšší četnost velkých hodnot oproti četnosti malých hodnot [13]. Grafy relativní četnosti pro různé hodnoty šikmosti můžeme vidět na obrázku 2.2. Špikmost vypočítáme ze vztahu

$$x_S = \frac{\sum_{n=1}^{N} (x_n - \overline{x})^3}{N s^3}. \tag{2.13}$$



Obrázek 2.2: Relativní četnost pro různé hodnoty šikmosti [12]

2.3.3 Analýza poruch převodovky

V této části se budeme zabývat analýzou vibrací převodovek měřených na stolici dostupné v dílně těžké údržby DPMLJ. Na základě naměřených dat jsme schopni zjistit poruchy ozubení a ložisek. K oběma se váží určité poruchové frekvence, které lze vypočítat z jejich mechanických vlastností. Těmito výpočty se nyní budeme zabývat.

Ozubení

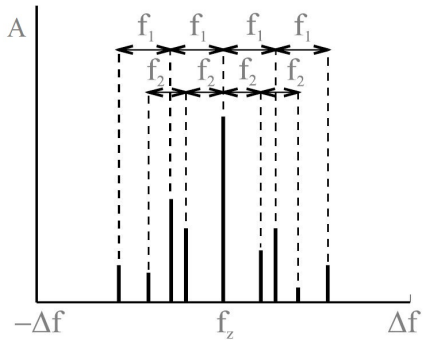
Mějme převod tvořený dvěma ozubenými koly v záběru. První kolo má z_1 zubů a je upevněno na hřídeli, jež se otáčí frekvencí f_1. Obdobně druhé kolo má počet zubů z_2 a frekvenci otáčení f_2. Tyto frekvence jsou spolu svázané vztahem

$$f_2 = f_1 \frac{z_1}{z_2}. \tag{2.14}$$

Základní frekvence záběru f_z pak plyne ze vztahu

$$f_z = f_1 z_1 = f_2 z_2. \tag{2.15}$$

Tuto fekvenci a její postranní pásma budeme sledovat za účelem detekce závad ozubení. Postranní pásma jsou tvořena složkami ve vzdálenosti kf_1 nebo kf_2 od základní frekvence, kde k je celé číslo. Grafické znázornění těchto frekvencí vůči frekvenci záběru vidíme na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Postranní pásma záběrové frekvence [14]

Nová ozubená kola bez výrobních vad mají nižší amplitudy rychlosti vibrací na frekvencích postranních pásem a vůči nim poměrně vysokou amplitudu rychlosti vibrací na frekvenci záběru. S opotřebením se obecně amplitudy rychlosti jednotlivých složek postranních pásem zvyšují [14], [15].

Ložiska

Vibrace ložisek jsou způsobeny silovými impulzy, které vznikají při odvalování valivých členů mechanismu po jeho vnější a vnitřní dráze. Mějme ložisko s následujícími parametry:

- počet valivých členů n,
- průměr valivého členu d,
- průměr ložiska (měřený mezi středy protilehlých valivých členů) D,
- stykový úhel α.

Pro válečkové ložisko platí $\alpha = 0$. Pro kuželíkové ložisko je α úhel, který svírá osa kuželíku s osou ložiska. Pro kuličkové ložisko je třeba úhel α vyjádřit z poměru

radiálního zatížení F_R a axiálního zatížení F_A ložiska dle vztahu

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{F_A}{F_R + F_A}. \tag{2.16}$$

Rozměry d, D a úhel α lze vyjádřit pomocí souhrnného parametru x pomocí vztahu

$$x = \frac{d}{D} \cos \alpha. \tag{2.17}$$

Při odvalování může docházet ke skluzu mezi vnější dráhou a valivým členem nebo mezi vnitřní dráhou a valivým členem. Tyto jevy charakterizujeme koeficienty s_o a s_i, jež nabývají hodnot z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$. Souhrnně je vyjadřujeme pomocí parametru ξ daným vztahem 2.18. Při odvalování bez skluzu platí $s_o = s_i = 0$ a tedy $\xi = 1$.

$$\xi = (1 - s_o)(1 - s_i) \tag{2.18}$$

Každé ložisko má v principu tři základní frekvence, na kterých se projevují jeho poruchy:

- $f_{RE} = F_{RE} f_S$ frekvence poruch valivých členů,
- $f_{OR} = F_{OR} f_S$ frekvence poruch vnějšího kroužku,
- $f_{IR} = F_{IR} f_S$ frekvence poruch vnitřního kroužku.

Tyto frekvence lze vztáhnout k frekvenci otáčení hřídele f_S a následně počítat koeficienty F_{RE}, F_{OR} a F_{IR} násobků této základní frekvence. V knize [14] byly odvozeny vztahy pro výpočet těchto koeficientů

$$F_{RE} = \frac{2(1 - x^2)(1 - s_i)}{x(1 + \xi + x(1 - \xi))} \cos \alpha, \tag{2.19}$$

$$F_{OR} = \frac{n(1 - x)\xi}{1 + \xi + x(1 - \xi)}, \tag{2.20}$$

$$F_{IR} = \frac{n(1 + x)}{1 + \xi + x(1 - \xi)}. \tag{2.21}$$

Dále se zkoumají i vyšší harmonické složky těchto tří základních frekvencí. Pro nulový skluz platí, že jsou jejich celočíselnými násobky. Pro nenulový skluz však dochází k jejich posunu od těchto poloh. Tento posun je vyjádřen koeficienty ΔF_{RE},

ΔF_{OR} a ΔF_{IR} dle vztahů

$$\Delta F_{RE} = \frac{1-x^2}{x} \frac{2s_i - (1-x)(1-\xi)}{1+\xi+x(1-\xi)} \cos\alpha, \tag{2.22}$$

$$\Delta F_{OR} = \frac{n}{2} \frac{(1-x^2)(1-\xi)}{1+\xi+x(1-\xi)}, \tag{2.23}$$

$$\Delta F_{IR} = -\frac{n}{2} \frac{(1-x^2)(1-\xi)}{1+\xi+x(1-\xi)}. \tag{2.24}$$

Vady ložisek se projeví ve velikosti zrychlení na základních frekvencích f_{RE}, f_{OR}, f_{IR} a jejich vyšších harmonických. Nelze však obecně kvantifikovat mez mezi bezvadným ložiskem a ložiskem s poruchou. Vhodnější je při zachování podmínek měření nasbírat data o bezvadných kusech a na základě výrazných odchylek od nich určovat poruchy [14], [15].

3 Systém diagnostiky podvozků v DPMLJ

Pracovníci dílny těžké údržby v DPMLJ zajišťují kontrolu a opravy všech dílů tramvajových podvozků. Do této dílny se z provozu dostávají tramvajové vozy běžně v těchto situacích:

- během provozu se projeví závada podvozku, které si při jízdě všimne řidič či cestující;
- při pravidelné denní kontrole vozu je zjištěna závada na podvozku;
- je naplánována prohlídka podvozků.

V dílně těžké údržby jsou podvozky z vozů demontovány a přesunuty na pracoviště, kde probíhá jejich vlastní kontrola, oprava a údržba. Hlavním procesem je tzv. protáčení podvozků, kdy je kontrolována funkčnost převodovek a motorů. Aby se minimalizovala možnost nastání problémů při tomto procesu, jsou k dispozici měřicí pracoviště pro motory a převodovky [5].

3.1 Měření a úprava profilu nákolků

Při provozu tramvají dochází k opotřebení nákolků. To může být v rámci celé jeho šířky nerovnoměrné. V dílně těžké údržby DPMLJ se proto zabývají měřením profilu pojezdové plochy a okolků kol a následným obrobením kol. K tomuto účelu je zde k dispozici kromě hrotového soustruhu také podúrovňový obráběcí soustruh (viz obrázek 3.1), jímž se budeme dále zabývat.

Celý tramvajový vůz vjede na toto pracoviště tak, aby se měřená náprava dostala na místo, kde probíhají následné operace. Nejprve dojde ke změření profilu nákolku, na základě tohoto měření a znalosti ideálního profilu je vypočteno nutné obrobení, které je ihned provedeno. Nakonec je pro kontrolu zopakováno měření nového

Obrázek 3.1: Pracoviště pro měření a úpravu profilu nákolků

profilu. Celý systém je řízený průmyslovým PC, které se zároveň stará i o generování výstupních protokolů. Ty jsou ukládány do lokálního souborového úložiště ve formátu čitelném pouze pro řídicí aplikaci, která je dokáže tisknout. Použitím vhodné virtuální tiskárny je tedy možné získat tyto protokoly ve formátu PDF. Ty obsahují kromě grafického znázornění profilu naměřeného před úpravou a po ní také informaci o průměru nákolku [5].

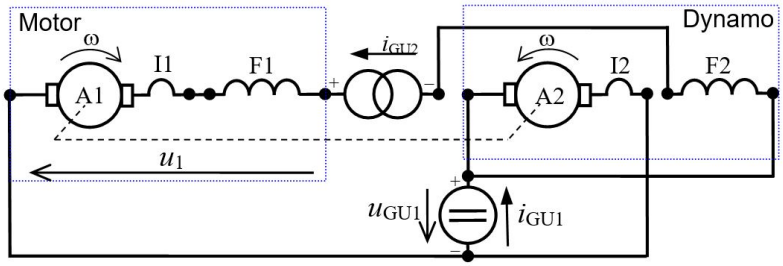
3.2 Měření motorů

Pro kontrolu trakčních motorů a zjištění jejich skutečných parametrů a charakteristik je v dílně těžké údržby DPMLJ instalována stolice doplněná o měřicí jednotku. Znalost těchto vlastností je důležitá především pro párování motorů v podvozcích. Charakteristiky všech motorů v obou podvozcích vozu by měly být co nejpodobnější, jinak dochází k prokluzům kol a to vede k rychlému opotřebení nákolků.

3.2.1 Průběh a prostředky měření

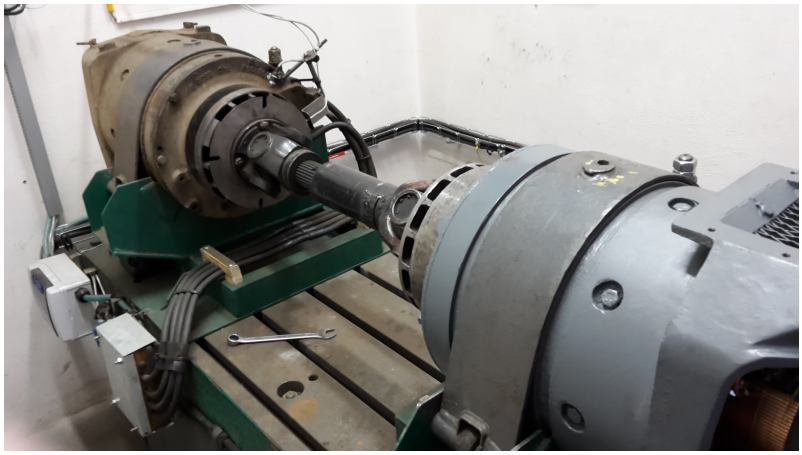
Motor 1 je upevněn ke hřídeli, na jejímž opačném konci je motor 2 pracující v režimu dynamo. Elektrické zapojení měřicí stolice vidíme na obr 3.2. Vinutí hlavních pólů F1 i vedlejších pólů I1 měřeného motoru je zapojeno v sérii. Proudový zdroj GU2 určuje zátěž testovaného motoru a pokrývá ztráty vinutí a úbytek napětí na kartáčích. Napěťový zdroj GU1 pokrývá mechanické ztráty a ztráty v železe. Oba

zdroje jsou řízeny mikrokontroléry ovládanými obsluhou. Měřicí karta firmy National Instruments se stará o měření napětí U_{A1},U_{A2},U_{F1},U_{F2}, proudů $I_1 = I_{F2} = I_{GU2}$, I_{A2} a úhlové rychlosti otáčení ω.



Obrázek 3.2: Schéma zapojení měřicí stanice motorů [16]

Naměřené hodnoty jsou přenášeny do připojeného počítače, kde je vytvořený model a testovací aplikace v programu MATLAB. Aplikace se stará o komunikaci s měřicí kartou, záznam a vizualizaci měřených dat. Průběh všech měřených veličin v čase je uložen do souboru typu MAT.



Obrázek 3.3: Stanice pro měření motorů

Měření každého motoru na tomto pracovišti, jež vidíme na obrázku 3.3, probíhá následujícím způsobem. Nejprve je spuštěna měřicí aplikace, poté obsluha uvede do chodu oba napájecí zdroje. Jakmile aplikace detekuje nenulovou hodnotu otáček, je spuštěn záznam měřených dat. Přesně po 5 minutách od tohoto okamžiku jsou vyčteny hodnoty kotevního napětí motoru a rychlosti otáčení. Poté obsluha vypne napájecí zdroje, přičemž aplikace měří dobu doběhu. Až po úplném zastavení motoru

je měření ukončeno. Podle hodnot kotevního napětí motoru a rychlosti otáčení po pěti minutách běhu se párují motory v podvozcích. Z doby doběhu je možné zjistit, zda je rotor správně uložen ve statoru [16].

3.3 Měření převodovek

Pro výstupní kontrolu převodovek je v dílně těžké údržby DPMLJ k dispozici stolice (viz obrázek 3.4). Ta umožňuje měření jejich momentové charakteristiky. Zároveň její výšková úroveň a dostatečný volný prostor okolo zajišťují pohodlný přístup pracovníkům dílny při případných opravách závad zjištěných během procesu měření.

Mimo výše uvedených funkcí bylo rozhodnuto i o zařazení měření vibrací, které je určitým nadstandardem. V době tohoto rozhodnutí nebylo jasné, zda bude mít měření vibrací v tomto případě nějaký význam a zda naměřená data poskytnou informace o případných poruchách převodovky. Popíšeme nejprve průběh měření a poté komponenty použité při realizaci. Nakonec budeme řešit správné nastavení jednotky pro měření vibrací.

Obrázek 3.4: Stolice s převodovkou při právě probíhajícím měření

3.3.1 Průběh měření

Převodovka demontovaná z podvozku se pomocí jeřábu volně položí na měřicí stolici a z bezpečnostních důvodů se zajistí dvěma západkami. Kardanovou hřídelí se spojí s asynchronním třífázovým elektromotorem. Rychlost otáčení tohoto motoru je řízena frekvenčním měničem. Na dotykovém panelu může obsluha zvolit manuální nebo automatický režim měření.

Při manuálním režimu nastaví požadované otáčky motoru. Poté vizuálně a poslechově zkoumá správnost chování převodovky. Současně se na displeji zobrazuje aktuální moment motoru, měřené otáčky a hodnoty ze senzoru vibrací.

Postup automatického režimu byl vyladěn v rámci této práce. Při něm je převodovka roztáčena motorem postupně v obou směrech od 0 do 700 ot/min s krokem 25 ot/min. Po každém ustálení otáček probíhá 15 s měření, během kterého jsou 50-krát vyčteny a následně zprůměrovány hodnoty ze senzoru vibrací a moment. Dále je měřen průběh momentu a výkyvu otáček při nastavení konstantních otáček 700 ot/min. Nakonec jsou všechna naměřená data uložena do souboru formátu XML. Závada se nemusí ve vibracích viditelně projevit při všech rychlostech otáčení, proto je třeba měřit v celém rozsahu. Průměrováním jsou odstraněny případné nežádoucí vlivy související s ostatními pracemi v dílně (např. vibrační šum způsobený demontáží těžkých součástí) a tím je zajištěna vyšší vypovídající hodnota výsledných dat.

3.3.2 Prostředky měření

Měřící stolice je z bezpečnostních důvodů umístěna uvnitř klece, do které je umožněn přístup brankou jen povolaným osobám s klíčem. Vně této klece je rozvodná skříň (viz obrázek 3.5). Uvnitř ní je umístěno PLC, které řídí celý proces měření. K němu jsou připojeny vstupně-výstupní moduly, dotyková obrazovka, modul pro sledování technického stavu zařízení (tzv. condition monitoring modul) a bezpečnostní systém.

Senzorem pro měření vibrací je jednoosý piezoelektrický akcelerometr. Ten je připojen k modulu pro sledování technického stavu zařízení. Jeho výstupem je sada parametrů vycházejících z naměřených vibrací, moment a rychlost otáčení. Jejich výčet je uveden v příloze C. Všechny komponenty uvnitř rozvodné skříně a senzor

Obrázek 3.5: Rozvodná skříň vně klece

vibrací jsou výrobky firmy B-R Automation, což zajišťuje jejich naprostou kompatibilitu.

Řídicí PLC je možné připojit do sítě pomocí ethernetové zásuvky. V rámci sítě se poté může chovat jako webový server, FTP server nebo dokáže posílat emailové zprávy. V tomto případě je použito přístupu pomocí funkce FTP serveru, ze kterého je možné stahovat soubory s naměřenými daty [17],[18].

3.3.3 Nastavení modulu pro sledování technického stavu zařízení

V modulu pro sledování technického stavu zařízení je možné nastavit až 32 frekvenčních pásem, jež chceme zkoumat. Jak bylo vysvětleno v kapitole 2.3.3, existují určité poruchové frekvence převodovky. Je tedy vhodné z parametrů ozubení uvedených v kapitole 1.2 a parametrů ložisek uvedených v příloze B spočítat tyto frekvence (viz tabulky 3.2 a 3.1) a nastavit podle nich frekvenční pásma modulu.

Modul dokáže přímo sledovat i vyšší harmonické nastavených frekvencí. Toho je vhodné využít u poruchových frekvencí ložisek, pro ně tedy využijeme 12 pásem modulu, které současně sledují i vyšší harmonické. U poruchových frekvencí ozubení

F_1 (ord)	F_2 (ord)	F_z (ord)
0,135	1	7

Tabulka 3.1: Vypočítaná poruchová frekvence ozubení a vzdálenosti postranních pásem

typ	F_{RE} (ord)	F_{OR} (ord)	F_{IR} (ord)
NU2315	4,76	5,19	7,81
NU412	4,56	4,35	6,65
31313	4,88	6,61	9,39
6222	0,71	0,56	0,79

Tabulka 3.2: Vypočítané poruchové frekvence jednotlivých ložisek

je naopak třeba tuto možnost v modulu zakázat a postranní pásma sledovat odděleně. Sledujeme tedy jednu základní frekvenci otáčení a čtyři frekvence pro každé uvažované postranní pásmo, což například pro první dvě postranní pásma znamená využití celkem 9 pásem modulu. Pro poruchové frekvence ložisek je třeba nastavit sledování zrychlení vibrací, pro poruchové frekvence ozubení rychlost vibrací.

Všechny vypočtené frekvence se vztahují k rychlosti otáčení vstupní hřídele převodovky a jsou uvedeny jako její násobky (tedy v jednotkách *ord*). Ložiska typů NU2315, NU412 a 31313 jsou vázána přímo na tuto vstupní hřídel. Ložisko typu 6222 je však vázáno na hřídel výstupní, proto bylo třeba nejprve přepočítat rychlost otáčení vstupní hřídele pomocí převodového poměru na rychlost otáčení výstupní hřídele. Při výpočtech frekvencí ložisek byl uvažován nulový skluz a u ložiska typu 6222 nulové axiální zatížení. Maximální možný úhel α mezi axiální a radiální zátěžnou silou je roven 20°. Na výsledné frekvence má rozptyl úhlu α 0° až 20° vliv necelé 1%. Ten je pokryt uvažováním chyby $0,04$ *ord* u základních poruchových frekvencí [19],[20].

3.4 Návrh propojení toku dat

Výstupní data ze všech diagnostických uzlů popsaných v předchozích kapitolách jsou ukládána na lokální počítačové stanice, které jsou součástí jednotlivých pracovišť. Prvním logickým krokem je tedy jejich přesun do centrálního datového skladu (serveru). Samotné generování výstupních protokolů ve všech stanicích probíhá na žádost obsluhy. Společně s tímto krokem by bylo vhodné provést i přesun dat na server. To lze řešit například jednoduchým skriptem.

Na serveru by měl fungovat mechanismus, který v pravidelných časových intervalech kontroluje, zda nepřibyla data ke zpracování a v kladném případě toto zpracování provede. Pro tento účel by měla existovat aplikace, která dokáže vyčíst ze souborů s daty potřebné informace a zapsat je do databáze. Návrh struktury této databáze je vizualizován v příloze E a je popsán v kapitole 5.2.1.

4 Aplikace pro generování protokolů o měření převodovek

Možnosti PLC, použitého pro měření převodovek, v oblasti zpracování a vizualizace naměřených dat jsou velmi omezené. Proto je nutné zabývat se dalším zpracováním těchto dat mimo měřicí stanici. V rámci jednoduchosti bylo rozhodnuto o zpracování dat pomocí desktopové aplikace. Toto řešení poskytuje zároveň vysokou flexibilitu.

Popíšeme nejprve stručně jazyk XML, vývojové prostředí a knihovny použité při tvorbě výsledné aplikace a poté navrhneme formát předávání dat mezi měřicím pracovištěm a touto aplikací. Nakonec popíšeme fungování aplikace a její uživatelské rozhraní.

4.1 Jazyk XML

Jazyk XML (Extensible Markup Language) se řadí mezi značkovací jazyky (stejně jako například HTML). To znamená, že důležité části dokumentu se označují pomocí značek. Těmto částem se říká elementy. Ty se do sebe mohou vnořovat a tvoří tak logickou strukturu informací uložených v dokumentu.

Elementy se označují pomocí tagů. Ty jsou buď párové (počáteční a ukončovací) tedy například `<tag> </tag>` nebo nepárové tedy například `<tag/>`. Mezi párové tagy lze vkládat data nebo strukturu dále rozšiřovat dalšími tagy. Každý tag může nést atribut (nebo i více atributů) tedy například `<tag atribut="hodnota"/>`. Na začátku každého XML dokumentu musí být hlavička obsahující verzi jazyka a kódování. Ta může vypadat například takto `<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>` [21].

4.2 Vývojové prostředí

Protože výsledná aplikace má být určena pro operační systém Microsoft Windows, bylo zvoleno vývojové prostředí Microsoft Visual Studio. Konkrétně se jednalo o verzi Community 2015, která je volně dostupná na webu [22].

Instalační balíček tohoto prostředí obsahuje řadu knihoven. Kromě nich byly však použity ještě některé další, které možnosti vývojového prostředí dále rozšiřují. Výhodou tohoto prostředí je snadná implementace takovýchto knihoven. Lze je totiž získat pomocí doplňku NuGet, který je v samotném Visual Studiu v základu obsažen. Knihovna je pomocí tohoto doplňku stažena z internetové databáze a rovnou přidána k právě zpracovávanému projektu.

4.2.1 Knihovna OxyPlot

Jednou z použitých rozšiřujících knihoven je knihovna OxyPlot, která je volně dostupná právě v databázi doplňku NuGet. Jedná se o knihovnu, využitelnou nejen pro Windows aplikace, ale například i pro Android či iOS, která řeší vykreslování grafů závislostí. Práce s ní je velmi jednoduchá a všechny možnosti jsou popsány v dokumentaci [23].

4.2.2 Knihovna iTextSharp

Další rozšiřující knihovnou, která byla použita ve vytvořené aplikaci je knihovna iTextSharp. Jedná se o sadu nástrojů umožňujících práci se soubory typu PDF. Potřebné soubory jsou rovněž obsaženy přímo v databázi NuGet. Práce s touto knihovnou je intuitivní a základní postup vytváření dokumentu lze nalézt například v článku [24].

4.2.3 Knihovna Xml.XPath

Knihovna Xml.Xpath je součástí instalace Visual Studia. Pro její použití je třeba do projektu přidat referenci `System.Xml`. Tato knihovna řeší čtení a zápis XML struktury. Obsahuje prostředky pro snadnou orientaci v XML dokumentu a jeho porozumění [25].

4.2.4 Třída FTP

Třída FTP je jednoduchým rozhraním pro komunikaci se serverem pomocí protokolu FTP. Metody této třídy řeší připojení k FTP serveru, procházení souborové struktury a přesun dat. Její zdrojový kód společně s popisem a příkladem použití jednotlivých metod je volně dostupný na webu [26].

4.3 Návrh formátu ukládaných dat

PLC umožňuje ukládání dat do textového souboru. Pro snazší orientaci v datech je vhodné použít XML strukturu, kterou lze programově v PLC do textového souboru vytvořit. Navržená struktura, jež byla v průběhu realizace několikrát změněna a doplněna se nakonec ustálila v podobě, kterou můžeme vidět v příloze D. Tu nyní popíšeme.

Kořenový element `<Root>` obsahuje jeden element `<DateTime>` s podelementy `<Year>`, `<Month>`, `<Day>`, `<Hour>`, `<Minute>` a `<Second>`, do jejichž parametru `val` se ukládá odpovídajícím způsobem datum a čas měření. Dále může kořenový element obsahovat až 5 elementů `<Data>`. Díky tomu je možné uložit více opakovaných měření jedné převodovky do jednoho souboru. Každý element `<Data>` obsahuje právě tolik elementů `<Measurement>`, pro kolik rychlostí otáčení bylo měření provedeno. V jednotlivých elementech `<Measurement>` jsou obsaženy elementy `<vzorek>` určující index měření, `<n>` udávající rychlost otáčení, `<M>` udávající právě naměřený točivý moment, 19 elementů odpovídajících parametrům z tabulky v příloze C a 21 frekvenčních pásem podle návrhu z kapitoly 3.3.3. Každý z těchto elementů má parametr `val`, do něhož se vkládá příslušná hodnota odpovídající naměřené veličiny. Element `<Data>` dále obsahuje jeden element `<Positive>` a jeden element `<Negative>`, do jejichž podelementů `<Values>` se ukládají hodnoty naměřených otáček a momentů při maximálních otáčkách v daném směru oddělené středníky a zalomením řádku.

4.4 Vytvoření aplikace

Cílem je vytvořit aplikaci, která dávkově zpracuje XML soubory s daty a vygeneruje z nich protokoly o měření. Vstupní soubory jsou uloženy na FTP serveru, který

je hostován PLC. Výstupy v podobě dokumentů formátu PDF jsou ukládány do zvoleného adresáře lokálního počítače, na kterém je aplikace spuštěna. Vývojový diagram aplikace nalezneme v příloze G.

4.4.1 Přístup k FTP

Nejprve je třeba připojit se k FTP serveru a zkontrolovat, zda na něm jsou připraveny XML soubory ke zpracování. Pro přístup k serveru používáme proměnné:

- `hostIP` - IP adresa FTP serveru,
- `username` - přihlašovací jméno k serveru,
- `password` - heslo k serveru.

Využijeme třídy `ftp` (viz kapitola 4.2.4) a její metody `directoryListSimple`, která vrátí výčet všech souborů na serveru. Z nich vybereme pouze soubory typu XML a ty pomocí metody `download` stáhneme do lokálního dočasného adresáře a pomocí metody `delete` smažeme ze serveru. Tento postup vidíme v následující ukázce kódu:

```
ftp f = new ftp(hostIP, username, password);
string[] l = f.directoryListSimple("");
List<string> ln = new List<string>();
string tempDir = "C:\\temp\\";
if (!Directory.Exists(tempDir)) Directory.CreateDirectory(tempDir);
foreach (string s in l)
{
       if ((s.Substring(s.Length - 4, 4) == ".xml")
       {
              f.download(s, tempDir + s);
              f.delete(s);
       }
}
```

4.4.2 Načtení souboru

Máme-li soubory s daty přesunuty, je třeba je postupně zpracovat. Jelikož tyto soubory generuje PLC nesprávně a objevují se v něm znaky s ASCII hodnotou 0x00, nelze použít například třídu `System.IO.StreamReader`. Ta když narazí na takovýto znak, pokládá jej za konec souboru a další znaky již ze souboru nepřečte. Je tedy nutné použít třídu `System.IO.BinaryReader`, která tyto znaky přečíst dokáže a ná-

sledně ručně ošetřit jejich mazání, aby ve výsledném řetězci nebyly obsaženy. Čtení pomocí této třídy probíhá takto:

```
using (BinaryReader br = new BinaryReader(File.Open(cesta, FileMode.Open)))
{
	int pos = 0;
	int length = (int)br.BaseStream.Length;
	List<char> buf = new List<char>();
	while (pos < length)
	{
		char v = br.ReadChar();
		if (v != '\0') buf.Add(Convert.ToChar(v));
		pos += sizeof(byte);
	}
	string str = new string(buf.ToArray());
}
```

Tímto získáme řetězec obsahující data ve XML struktuře. Z té je třeba načíst především hodnoty atributu `val` jednotlivých elementů. K tomu použijeme třídy obsažené uvnitř knihovny `System.Xml.XPath`. Jsou jimi `XPathDocument`, do které načteme řetězec z předchozího kroku. Z něho odvozená `XPathNavigator`, pomocí které se dostaneme dovnitř elementu `Root` a `XPathNodeIterator`, kterou procházíme postupně všechny elementy `Data` a obdobně pomocí další instance třídy `XPathNodeIterator` všechny elementy `Measurement` uvnitř elementu `Data`. Metodou `MoveToChild()` se pohybujeme mezi elementy uvnitř jednoho elementu `Measurement`. Metodou `MoveToAttribute()` se přesunujeme mezi jednotlivými atributy elementu. Ve vlastnosti `Value` poté můžeme číst hodnotu atributu, na který jsme se přesunuli. Přečtení jedné hodnoty tedy probíhá takto:

```
XPathDocument xpd = new XPathDocument(str);
XPathNavigator xpn1 = xpd.CreateNavigator();
XPathNodeIterator xni1 = xpn1.Select("/Root/Data");
while (xni1.MoveNext())
{
	XPathNavigator xpn2 = xni1.Current.CreateNavigator();
	XPathNodeIterator xni2 = xpn2.Select("Data/Measurement");
	while (xni2.MoveNext())
	{
		xni2.MoveToChild("/Data", "");
		xni2.MoveToChild("vzorek", "");
		xni2.MoveToAttribute("val", "");
		string val = xni2.Value;
		//...obdobne i s ostatnimi elementy uvnitr Measurement elementu
	}
}
```

4.4.3 Vykreslení grafů

Nyní, když máme načtené hodnoty ze souboru, můžeme je vykreslit do grafů. K tomu byla použita knihovna OxyPlot popsaná v kapitole 4.2.1. Nejprve je potřeba data uložit do pole typu `DataPoint` a seřadit tak, jak je chceme mít v grafu vykreslená. Poté vytvoříme instanci třídy `LineSeries`, která představuje spojnicový graf a vložíme do ní připravená data. Následně vytvoříme instanci třídy `PlotModel`, která představuje rovinu pro vykreslení grafu. Do něj vložíme spojnicový graf a můžeme vykreslovat buď do vizuální komponenty typu `Plot` přímo do okna aplikace nebo do obrázku pomocí třídy `PngExporter`.

```
float [] x,y;
List<DataPoint> linePoints = new List<DataPoint>();
for(int i=0;i<x.Length;i++) linePoints.Add(new DataPoint(x[i],y[i]));
List<DataPoint> orderedLinePoints = linePoints.OrderBy(x => x.X).ToList();
LineSeries line = new LineSeries {ItemsSource = orderedLinePoints};
PlotModel pm = new PlotModel{Title = "Název grafu"};
pm.Series.Add(line);
Plot p;
p.Model = pm;
using (var g = new MemoryStream())
{
       var pngExporter = new PngExporter();
       pngExporter.Export(pm, g);
       Image obrazekPNG = Image.FromStream(g);
}
```

4.4.4 Vytvoření PDF dokumentu

Grafy v obrázcích je dále třeba vložit do jednoho PDF dokumentu. K tomu byla použita knihovna iTextSharp popsaná v kapitole 4.2.2. Nejprve vytvoříme nový dokument jako instanci třídy `text.Document` a otevřeme ho metodou `Open()`. Zápis obrázku do tohoto dokumentu probíhá pomocí třídy `text.Image`, do jejíž instance metodou `GetInstance()` nahrajeme připravený obrázek. Ten následně vložíme do vytvořeného dokumentu metodou `Add()`. Nakonec je třeba dokument zase zavřít metodou `Close()`.

```
text.Document doc = new text.Document();
doc.Open();
text.Image obr = text.Image.GetInstance(obrZPameti, ImageFormat.Png);
doc.Add(obr);
doc.Close
```

Podobným způsobem se do dokumentu dá vložit i text. Nejprve je třeba si připravit instanci třídy `text.Font` definující styl písma. Poté vytvořit nový odstavec pomocí třídy `text.Paragraph` a ten opět vložit do dokumentu.

```
text.Document doc = new text.Document();
doc.Open();
text.pdf.BaseFont zakladniFont = BaseFont.CreateFont(cestaKFontu,
       BaseFont.CP1250, iTextSharp.text.pdf.BaseFont.NOT_EMBEDDED);
text.Font font = new text.Font(zakladniFont, velikostPisma, 0);
Paragraph odstavec = new Paragraph("Text odstavce", font);
doc.Add(odstavec);
doc.Close
```

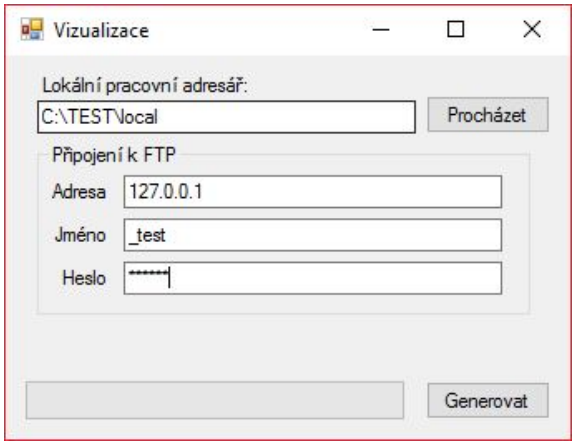
V dokumentu rovněž využíváme přehledného zobrazení dat pomocí tabulek. Ty se generují pomocí třídy `text.PdfPTable`, ve které specifikujeme počet sloupců. Dále do ní přidáváme jednotlivé buňky jako instance třídy `text.PdfPCell` a to postupně po řádcích.

```
text.Document doc = new text.Document();
doc.Open();
text.PdfPTable tabulka = new PdfPTable(pocetSloupcu);
text.PdfPCell bunka = new PdfPCell(textUvnitr);
tabulka.Add(bunka);
doc.Add(tabulka);
doc.Close
```

4.5 Použití aplikace

Celou aplikaci tvoří jediný formulář, obsahující čtyři vyplnitelné řádky, dvě tlačítka a ukazatel průběhu. Okno s tímto formulářem můžeme vidět na obrázku 4.1.

Do prvního řádku vyplníme cestu k lokálnímu pracovnímu adresáři, do kterého se budou stahovat a třídit soubory s daty a rovněž ukládat protokoly z měření. Tuto cestu rovněž můžeme nalézt pomocí adresářového průzkumníku po stisku tlačítka *Procházet*. Do řádku *adresa* vyplníme IP adresu FTP serveru, na kterém jsou uložena vstupní data v podobě XML souborů s předepsanou strukturou. Do řádků *jméno* a *heslo* vyplníme přihlašovací údaje k tomuto serveru. Nakonec stiskneme tlačítko *Generovat* a aplikace začne zpracovávat soubory z FTP serveru. Průběh můžeme sledovat na ukazateli vlevo od tlačítka *Generovat*. Zároveň se doprovodné informace zobrazují ve stavovém řádku nad tímto ukazatelem. Když se ukazatel průběhu naplní, jsou všechna data ze serveru stažena a příslušné protokoly z měření vyge-



Obrázek 4.1: Okno formuláře vytvořené aplikace

nerovány. Je-li nalezena shoda mezi soubory na serveru a dříve staženými soubory v lokálním adresáři, pak není protokol znovu generován.

Spustitelnou verzi aplikace, projekt se všemi zdrojovými kódy a ukázku vygenerovaného měřicího protokolu nalezneme na přiloženém CD, jehož obsah je popsán v příloze A.

5 Sběr dat o údržbě

V rámci údržby tramvajových podvozků vznikají v DPMLJ materiály, které popisují stav tramvajových vozů, případně jeho jednotlivých dílů. Jedná se v principu o materiály dvou druhů:

- povinně tvořené legislativní materiály,
- provozně technická data údržby.

Na základě archivace těchto materiálů je pak možné dohledat co se s konkrétními díly v minulosti přesně dělo. Analýza takovýchto dat může být užitečná pro plánování prohlídek, párování podvozků, motorů, převodovek i pro celkový přehled.

V této kapitole si popíšeme nejprve současný stav sběru těchto dat v dílně těžké údržby DPMLJ a poté navrhneme modernizaci tohoto systému.

5.1 Současný stav

V současné době je většina materiálů týkajících se údržby tramvajových podvozků ručně vyplňována do předpřipravených tištěných formulářů. Jen některé materiály jsou generovány automaticky, avšak též dochází k jejich následnému tisku.

5.1.1 Povinně tvořené legislativní materiály

Dle zákona se v DPMLJ sledují tramvajové vozy jako celky. Provozovatel tramvaje je povinen doložit potvrzení o provedených kontrolních prohlídkách. Každý vůz je očíslován a má svou knihu, do které se zapisují záznamy při povinných kontrolních prohlídkách. Při nich jsou zároveň generovány protokoly, které se v počítači vyplní dodatečnými údaji a jsou následně tištěny, podepsány a fyzicky archivovány.

5.1.2 Provozně technická data údržby

Při každé manipulaci s podvozky tramvaje v dílně těžké údržby je vyplněn tištěný formulář. V něm je přesně napsáno, jaké práce na podvozcích dané tramvaje proběhly. Formulář je poté fyzicky archivován. Na pracovišti pro měření a úpravu profilu nákolků (viz kapitola 3.1) jsou generovány a tištěny protokoly, jež jsou rovněž fyzicky archivovány. Na pracovištích měření motorů a převodovek (viz kapitoly 3.2 a 3.3) jsou generovány protokoly ukládané pouze v elektronické formě.

Z výše uvedených zdrojů se následně vybrané informace manuálně přepisují do databáze, která je realizována jednou objemnou tabulkou. Tato tabulka je uložena v počítači vedoucího dílny těžké údržby jako soubor formátu XLS [5].

5.2 Návrh zlepšení systému sběru dat o údržbě

V této kapitole se budeme zabývat návrhem systému sběru dat za provozu a systému sběru dat v dílně těžké údržby DPMLJ. Oba systémy se budeme snažit vyřešit v souladu se stávajícími trendy. Důležitou součástí, která systémy propojuje je databáze, jejíž návrh provedeme v první části.

5.2.1 Databáze

Strukturu navržené databáze vidíme v příloze E. Význam jednotlivých tabulek a jejich sloupců nyní popíšeme. Sledovanými entitami jsou:

- vozy (karoserie),
- podvozky,
- převodovky,
- motory.

Pro každou z těchto entit existuje oddělená tabulka. Struktura těchto čtyřech tabulek je shodná. Prvním sloupcem je unikátní identifikátor, který bude použit v dalších tabulkách. Druhým sloupcem je číslo dříve zavedené pro danou entitu dílnou těžké údržby DPMLJ. Tímto číslem je každá entita fyzicky označena. Třetím sloupcem je RFID kód, který využijeme v kapitole 5.2.3.

Tabulky *spojení vozů*, *spojení podvozků ve vozech* a *spojení součástí podvozků* obsahují vždy všechny spojované entity společně s časem a datem, kdy ke spojení došlo. Záznam zde vzniká při každé změně - novém spojení.

V tabulkách *měření převodovek*, *měření motorů*, *měření nákolků* a *měření za provozu* vzniká záznam při zpracování dat z každého daného provedeného měření. Návrh měření za provozu bude popsán záhy v kapitole 5.2.2. Sloupci těchto tabulek jsou vždy čas a datum provedeného měření a identifikátor měřené entity. Dále pak důležité naměřené hodnoty lišící se pro každou z tabulek.

V tabulce *najeté kilometry* je uložen identifikátor vozu, k němu patří celkový počet najetých kilometrů a datum, ke kterému je údaj platný. Záznam pro každé vozidlo zde vzniká každý den a je třeba ho načítat z dispečerského deníku.

Pro každý vůz je třeba evidovat kontrolní prohlídky, které podstoupil. K tomuto účelu slouží tabulka *prohlídky*, do níž je vyplněn identifikátor vozu, typ kontrolní prohlídky, kterou podstoupil a příslušné datum. Na základě údajů z této tabulky a tabulky najetých kilometrů je možné dopočítat zbývající počet kilometrů do další kontrolní prohlídky.

Databáze by mohla být řešena například Microsoft SQL serverem. K tomu by bylo před nasazením systému potřeba také vytvořit aplikaci řešící postupy jejího plnění a aplikaci umožňující další zpracování uložených dat. K prvotnímu naplnění by bylo možno použít data z minulosti, která jsou k dispozici ve XLS souboru, jak bylo řečeno v předchozí kapitole. K tomuto účelu by bylo třeba vytvořit patřičný skript, který by naplnění jednorázově provedl.

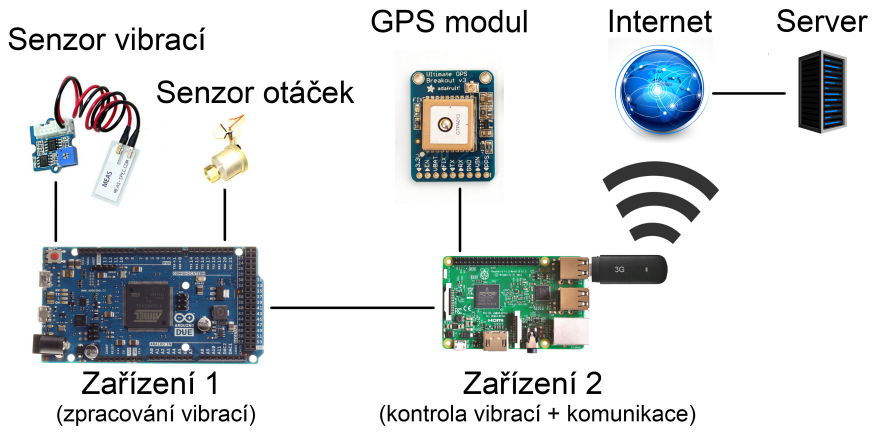
5.2.2 Systém sběru dat za provozu

Pro včasnou diagnostiku poruch součástí tramvajového podvozku je nejlepším řešením měření vibrací za provozu. Díky vibracím je možné poruchy detekovat včas, tedy dříve než se projeví závadou, která by mohla tramvaj odstavit z provozu. Mají-li vibrace na poruchových frekvencích po delší dobu výrazně rostoucí trend, pravděpodobně se začíná projevovat příslušná porucha. Tento trend lze za provozu vysledovat a včasným upozorněním poskytnout dostatek času na naplánování údržby [15].

Do každého vozu by bylo třeba namontovat systém pro měření a zpracování vibrací. Návrh takového systému vidíme na obrázku 5.1. Zařízení 1 by se staralo

o sběr dat ze senzoru otáček a senzoru vibrací, provádělo by jejich frekvenční analýzu a vybíralo hodnoty vibrací na poruchových frekvencích. Ty by byly dále odeslány do zařízení 2, které by zajišťovalo odesílání naměřených dat skrze 3G modem přes internet na centrální server. Na serveru by pak došlo ke zpracování těchto informací a v případě vyhodnocení závady by tato informace byla poskytnuta osobě mající na starost údržbu tramvají.

Současně by zařízení 2 mohlo pomocí GPS modulu měřit polohu tramvaje a rovněž ji odesílat na server. Tyto údaje by poté mohli sloužit jako kontrola pro dispečerský deník, kam jsou v současnosti zapisovány údaje o najetých kilometrech jednotlivých vozů.



Obrázek 5.1: Myšlenková mapa propojení součástí pro měření vibrací za provozu

Zařízení pro zpracování vibrací

Zařízením 1 by mohla být například deska Arduino Due. Ta disponuje 12 analogovými vstupy s rozlišením 12 bitů a 32-bitovým ARM procesorem. Měla by tedy poskytnout dostatek prostředků i pro zpracování dat z více vibračních senzorů [27].

Senzor vibrací

Senzorem vibrací by mohl být Grove Piezo Vibration sensor, založený na principu piezoelektrického akcelerometru. Ten disponuje širokým frekvenčním rozsahem a zaručuje kompatibilitu s produkty Arduino [28].

Senzor otáček

Jako senzor otáček je v převodovce již zasazeno impulzní čidlo rychlosti. Pro jeho připojení k zařízení 1 by bylo nutné nejprve proměřit jeho napěťový rozsah a případně ho pomocí dalších obvodů přizpůsobit možnostem zařízení.

Zařízení pro kontrolu vibrací

Zařízením 2 by mohlo být například Raspberry PI 3 s 64-bitovým procesorem ARM taktovaným na frekvenci 1,2 GHz. Arduino a Raspberry PI mezi sebou mohou komunikovat pomocí sběrnice I2C [29]

3G modem

Pro připojení Raspberry PI k internetu lze využít libovolný USB 3G modem.

GPS modul

Ke zjištění polohy může posloužit modul Adafruit Ultimate GPS Breakout s možností připojení externí antény. Kompatibilita s Raspberry PI je dle výrobce zajištěna [30].

Pokud by takovýto systém měl být nasazen ve větší míře, stála by jistě za zvážení možnost odesílání dat pomocí běžně používaného systému pro kontrolu jízdenek. Ten disponuje vlastním mobilním připojením k internetu, jehož by se při propojení obou systémů dalo využít. V první testovací fázi, kdy by byl řešen především přínos navrženého systému, se však spíše nevyplatí tuto možnost zkoumat. Možnou alternativou k 3G modulu by bylo využití připojení pomocí Wi-Fi, která je v navrženém zařízení 2 integrována. V takovém případě by k odesílání naměřených dat ze systému docházelo dávkově vždy na konci dne při odstavení tramvaje v depu.

Navržené komponenty zdaleka nedisponují patřičnou mechanickou odolností, kterou vyžaduje použití v běžném provozu. Pro vývoj a testování postupů se však díky nízké ceně, jednoduchosti a rychlosti nasazení zdají být vhodné.

5.2.3 Systém pro dílnu DPMLJ

Důležitým mechanismem systému pro dílnu těžké údržby DPMLJ je sledování průchodu předmětů. Proto nejprve popíšeme obecně prostředky používané k tomuto

účelu. Z nich poté vybereme vhodnou možnost na jejímž základě provedeme návrh tohoto systému.

Principy sledování průchodu předmětů

Sledování průchodu předmětů určitými místy se dnes hojně provádí za pomoci různých kódů. Takovýto kód se v daném místě načte a je poté jasné, že předmět místem prošel. Tento systém se používá například v obchodech, ať už při prodeji zboží, nebo jako prevence krádeží. Užitečný je rovněž ve skladech.

Pro fungování takovéhoto systému je vždy potřeba kód (může mít různou podobu) umístěný na sledovaném předmětu a čtečka, která načte a dekóduje informaci, kterou kód nese a tím identifikuje sledovaný předmět. Existují v principu dva různé druhy fungování takovýchto technologií:

- kódy vyžadující přímou viditelnost,
- kódy jimž stačí viditelnost v oblasti rádiových vln.

Do první skupiny patří klasické čárové (tedy 1D) kódy známé téměř z každého obalu běžně dostupných výrobků. Dále pak 2D kódy, jejichž výhodou je oproti 1D kódům možnost nést větší množství dat na stejném prostoru, naopak nevýhodou je ztráta jejich redundance a tedy při poškození hrozí větší riziko chybného načtení.

Do druhé skupiny patří takzvané RFID (Radio Frequency Identification) kódy. Jedná se o obvody, které vysláním rádiové zprávy obsahující identifikátor informují čtečku o své přítomnosti. Tyto obvody lze principiálně rozdělit na aktivní a pasivní.

Aktivní obvody potřebují pro svou funkčnost zdroj energie, který umožňuje vyslání zprávy čtečce. Oproti tomu pasivní obvod je vybuzen bezdrátově čtečkou, dojde k nabití vnitřního kapacitoru, který záhy poskytne energii samotnému logickému obvodu a ten vyšle zprávu se svým identifikátorem čtečce. Výhodou pasivních obvodů je oproti aktivním nízká cena obvodu s kódem a jeho větší kompaktnost, nevýhodou je vyšší cena čtečky [31].

Návrh systému

Protože našim cílem bude sledovat průchod jednotlivých tramvajových dílů s požadavkem na nepřímou viditelnost kódů, budeme se dále zabývat technologií RFID

a to konkrétně pasivní - kvůli jednoduchosti fungování pramenící z nepotřebnosti kódy přímo napájet.

Každý díl tramvaje, který je požadováno sledovat je třeba opatřit RFID kódem s unikátním identifikátorem. Takovéto obvody existují ve formě samolepek, které lze jednoduše připevnit. K dispozici obsluze by měl být tablet se čtečkou těchto kódů. Kvůli vícenásobnému výskytu některých dílů v tramvaji je třeba, aby obsluha určila pozici daného dílu vybráním na obrazovce tabletu. Tablet by zároveň pomocí bezdrátového připojení k síti v dílně a vhodné na míru vytvořené intuitivní aplikace předával vyplněné informace do centrální databáze.

Předpokládejme, že by nasazování takovéhoto systému probíhalo příležitostně při kontrolních prohlídkách tramvají. Kód by se při montáži daného dílu do tramvaje nalepil na místo, které je co nejméně namáháno vnějšími vlivy. Následně by byl načten obsluhou pomocí tabletu se čtečkou a ta by k němu v aplikaci přiřadila správné číslo dílu a jeho současnou pozici v tramvaji. V centrální databázi by aplikace vytvořila patřičný záznam o provedené operaci.

Při další kontrole tramvaje s takto označenými díly by obsluha načetla kód karoserie a v tabletu vybrala důvod kontroly. Při vyjmutí dílu by nebylo třeba kód načítat. Při případné náhradě, by obsluha načetla kód nově vloženého dílu a aplikace by se postarala o zapsání patřičných informací do databáze.

Schéma toku jednotlivých dílů a získaných dat nalezneme v příloze F. Je zde naznačeno rozložení tramvaje na jednotlivé sledované entity a jejich fyzický přesun na jednotlivá měřicí pracoviště. Jsou zde viditelná místa, ve kterých dochází ke sběru dat. U každé datové větve je uvedena struktura sledovaných dat korespondující s databází navrženou v kapitole 5.2.1.

Tablet

Jako výše diskutovaný tablet by mohlo posloužit např. zařízení firmy Winmate Communication Inc., konkrétně model M101B-HF. Jedná se o odolné průmyslové zařízení s úhlopříčkou 25 *cm*, jež disponuje čtyřjádrovým procesorem Intel BayTrail-M, 4 GB operační paměti, vestavěnou čtečkou RFID kódů a Wi-Fi [32].

V databázi by tak vznikaly ucelené informace nejen o současném stavu dílů, který je důležitý pro přehled, ale především o jejich historii. Z těchto dat a z dat

o najetých kilometrech by bylo možné sofistikovanou analýzou získat mnohé informace o životnosti jednotlivých dílů, pravděpodobnosti výskytu jednotlivých závad, součinnosti konkrétních dílů a podobně.

Závěr

V této práci byla diskutována problematika diagnostiky a údržby jednotlivých součástí tramvajových podvozků a s tím spojené získávání, zpracování, interpretace a archivace dat. Diplomová práce byla řešena ve spolupráci s DPMLJ.

Seznámili jsme se s tramvajovým podvozkem vozu typu Tatra T3 a jeho jednotlivými součástmi – zejména motorem, převodovkou a kolem. Vysvětlili jsme základy problematiky zpracování signálů a na něj navazujícího oboru technické diagnostiky se zaměřením na vibrodiagnostiku.

Popsali jsme pracoviště pro měření převodovek a motorů a pracoviště pro měření a úpravu profilu nákolků. Hlouběji jsme se zabývali především měřením vibrací na převodovkách a diskutovali jsme možnosti, které by mohli vést ke zpřesnění výsledků tohoto měření. Určili jsme příznaky ukazující na možné poruchy uvnitř převodovky a na základě nich jsme navrhli změny nastavení měřicí stolice. Dopravní podnik bohužel neposkytl převodovky se závadami, na nichž by bylo možné vyzkoušet, zda zvolené postupy vykazují očekávané výsledky a zda je jimi závadu možné odhalit.

Dále se podařilo vytvořit aplikaci řešící vizualizaci a archivaci dat ve formě protokolů o měření z pracoviště pro měření převodovek. Zároveň jsme navrhli formát předávání dat mezi měřicí stanicí a touto aplikací a popsali všechny prostředky použité při vývoji aplikace.

Nakonec jsme popsali provozně technické materiály, které v současnosti vznikají v dílně těžké údržby DPMLJ. Zabývali jsme se návrhem systému, který by vhodně propojil toky dat z jednotlivých dílčích pracovišť v návaznosti na současné trendy. Zároveň jsme také navrhli systém, měřící vibrace za provozu. Informace získané z obou těchto systémů se mohou stát užitečné nejen při plánování dlouhodobějších firemních strategií, ale při dostatečně velkém množství naměřených dat by bylo možné predikovat výskyt závad a předejít tak poruchám za provozu. Vhodnou a poměrně

jednoduše použitelnou metodou pro tyto účely je analýza pomocí neuronových sítí. Myšlenky nastíněné v této části by bylo vhodné rozvinout v samostatném projektu. Ten by měl detailněji prozkoumat možnosti navržených prostředků, podrobně řešit všechny technické problémy, provést cenovou kalkulaci a realizovat zkušební verze systémů.

Literatura

[1] Tramvaje v Liberci. DPMLJ. DPMLJ.cz [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: http://www.dpmlj.cz/historie/tramvaje-v-liberci

[2] Dopravní podnik měst Liberce a Jablonce nad Nisou a.s. Výroční zpráva za rok 2014 [online]. 2014 [cit. 2015-12-08]. Dostupné z: http://www.dpmlj.cz/images/docs/vyrocka_2014_final.pdf

[3] SKUPOVÁ, Dagmar. Analýza zpomalování tramvají a vyhodnocení jeho účinku na stojící cestující. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D.

[4] Tramvaj T3 (provedení T3SU): popis a pokyny pro údržbu elektrické výzbroje TR37. ČKD Praha, 1982.

[5] KOLÁŘ, Josef, vedoucí střediska Vozovna TRAM, DPMLJ,a.s., ústní sdělení, vozovna tramvají DPMLJ, Mrštíkova 850/3, Liberec 3, dne 24. 2. 2016.

[6] TŮMA, Jiří. Vehicle gearbox noise and vibration: measurement, signal analysis, signal processing and noise reduction measures. Chichester, England: Wiley, 2014, 1 online zdroj (261 pages). Automotive series (Wiley). ISBN 978-1-118-79761-7.

[7] HAYES, M. H. Schaum's outline of theory and problems of digital signal processing. New York: McGraw Hill, c1999. ISBN 00-702-7389-8.

[8] Vibrodiagnostics. ESOS Ostrava s.r.o. - Effective Machinery Care [online]. [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: http://www.diagnostikastroju.cz/en/vibrodiagnostics.php

[9] VACEK, Vladimír. Přehled senzorů pro měření vibrací. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Zuzana Kabešová.

[10] Root-Mean-Square. Wolfram MathWorld [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://mathworld.wolfram.com/Root-Mean-Square.html

[11] FRIEDMAN, Alan. What Is The "Crest Factor" And Why Is It Used? [online]. In: . [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://azimadli.com/wp-content/uploads/TECH-CrestFactor.pdf

[12] TALLAPALLI, Niranjan. Importance of data distribution in training machine learning models. Coding algorithms [online]. 2015-11-13 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: https://tekmarathon.com/2015/11/13/

[13] Measures of Skewness and Kurtosis. NIST SEMATECH. Engineering statistics handbook [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35b.htm

[14] TŮMA, Jiří. Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 80-901936-1-7.

[15] KŘEPELA, Jan, vedoucí výzkumu a vývoje Wikov MGI, ústní sdělení, Zbečník 356, Hronov, dne 11. 3. 2016.

[16] NOVÁK, Miroslav a Želmíra FERKOVÁ. Optimizing of Tram DC Traction Motors Pairing. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2016).

[17] ČERNOHORSKÝ, Josef a Josef KOLÁŘ. Technical diagnostics of tram undercarriages: Design, development and control.

[18] ČERNOHORSKÝ, Josef, vedoucí práce, ústní sdělení, TUL, Bendlova 1409/7, Liberec 1, dne 25. 4. 2016.

[19] TM280: Condition monitoring for vibration measurement technology. B&R, 2013.

[20] SKF. Bearing Frequencies Calculator [online]. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: http://webtools3.skf.com/engcalc/CalcBearingFrequenciesUpdate.do

[21] Kosek.cz. KOSEK, Jiří. Základy jazyka XML [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: http://www.kosek.cz/clanky/swn-xml/syntaxe.html

[22] MICROSOFT. Visual Studio [online]. 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: https://www.visualstudio.com/

[23] OXYPLOT CONTRIBUTORS. OxyPlot Documentation [online]. 2015 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://docs.oxyplot.org/en/latest/

[24] MITCHELL, Scott. Creating PDF Documents with ASP.NET and iTextSharp. DEVELOPER.COM. 4 Guys from Rolla [online]. 2011 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.4guysfromrolla.com/articles/030911-1.aspx

[25] XML and XPath. W3schools.com [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: http://www.w3schools.com/xml/xml_xpath.asp

[26] Simple C# FTP Class. CodeProject [online]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: http://www.codeproject.com/Tips/443588/Simple-Csharp-FTP-Class

[27] Arduino Due. Arduino.cc [online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue

[28] Grove - Piezo Vibration Sensor. Seeed [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: http://www.seeedstudio.com/depot/Grove-Piezo-Vibration-Sensor-p-1411.html

[29] RASPBERRY PI 3 MODEL B. Raspberry PI [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/

[30] Raspberry Flavored Time (A NTP server on your Pi, tethered to a GPS unit). Adafruit [online]. 2012 [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: https://blog.adafruit.com/2012/11/16/raspberry-flavored-time-a-ntp-server-on-your-pi-tethered-to-a-gps-unit-piday-raspberrypi-raspberry_pi/

[31] NEUSTUPA, Zdeněk, Roman DANEL, Pavel STAŠA, Filip BENEŠ a Jiří ŠVUB. Ensuring the security of warehouse using automatic identification by RFID. VSB - TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA. 2015 16th International Carpathian Control Conference, 2015. ISBN 978-1-4799-7370-5.

[32] LED tablet PC M101B-HF - Winmate Communication Inc. Direct Industry [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: http://www.directindustry.com/prod/winmate-communication-inc/product-35784-1491885.html

[33] SKF. Cylindrical roller bearings, single row [online]. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/roller-bearings/cylindrical-roller-bearings/single-row-cylindrical-roller-bearings/single-row/index.html

[34] NTNCORPORATION. Ball and Roller Bearings [online]. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/55397.pdf

[35] PIPET, Paul a Julie RASMONT. 2015. The possibilities of vibration analysis and monitoring for tram gearbox stand. Liberec. Závěrečný projekt. Technická univerzita v Liberci.

[36] Ondras/wwwsqldesigner. GitHub [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: https://github.com/ondras/wwwsqldesigner

A Obsah přiloženého CD

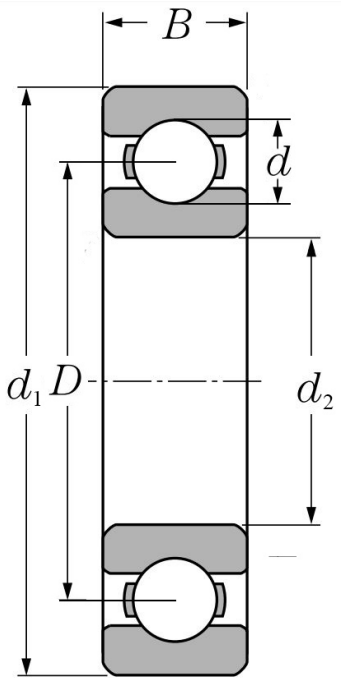
- Text diplomové práce
  – soubor *diplomova_prace_2016_Michal_Rosko.pdf*
- Zkompilovaná aplikace
  – adresář *aplikace_Vizualizace*
- Visual studio projekt se zdrojovými kódy aplikace
  – adresář *projekt_zrojove_kody*
- Ukázka protokolu generovaného aplikací
  – soubor *merici_protokol_prevodovka.pdf*

B Parametry ložisek

Byly zjištěny následující údaje o ložiscích použitých v tramvajové převodovce [33], [20]:

typ	valivý člen	d_1 (mm)	d_2 (mm)	B (mm)	počet val. čl.	d (mm)	D (mm)
NU2315	váleček	160	75	55	13	24	119
NU412	váleček	150	60	35	11	22	105
31313	kuželík	140	65	37	16	20	102
6222	kulička	200	110	38	10	29	155

Tabulka B.1: Parametry ložisek použitých v tramvajové převodovce



Obrázek B.1: Rozměry ložiska [34]

C Měřené parametry vibrací převodovky

Parametr	Jednotka
CrestFactorHighFrequency	1
CrestFactorRaw	1
Iso10816	$ms^{-1}10^{-3}$
KurtosisRaw	1
PeakHighFrequency	$ms^{-2}10^{-3}$
PeakHighFrequencyRefCalculated	$ms^{-2}10^{-3}$
PeakRaw	$ms^{-2}10^{-3}$
PeakRawRefCalculated	$ms^{-2}10^{-3}$
RmsAccEnvelope	$ms^{-2}10^{-3}$
RmsAccRaw	$ms^{-2}10^{-3}$
RmsHighFrequency	$ms^{-2}10^{-3}$
RmsHighFrequencyRefCalculated	$ms^{-2}10^{-3}$
RmsRaw	$ms^{-2}10^{-3}$
RmsRawRefCalculated	$ms^{-2}10^{-3}$
RmsVelEnvelope	$ms^{-1}10^{-3}$
RmsVelRaw	$ms^{-1}10^{-3}$
SkewnessRaw	1
Vdi3832KtHighFrequency	1
Vdi3832KtRaw	1

Tabulka C.1: Výčet parametrů poskytovaných modulem pro sledování technického stavu zařízení stanice pro měření vibrací na převodovkách [35]

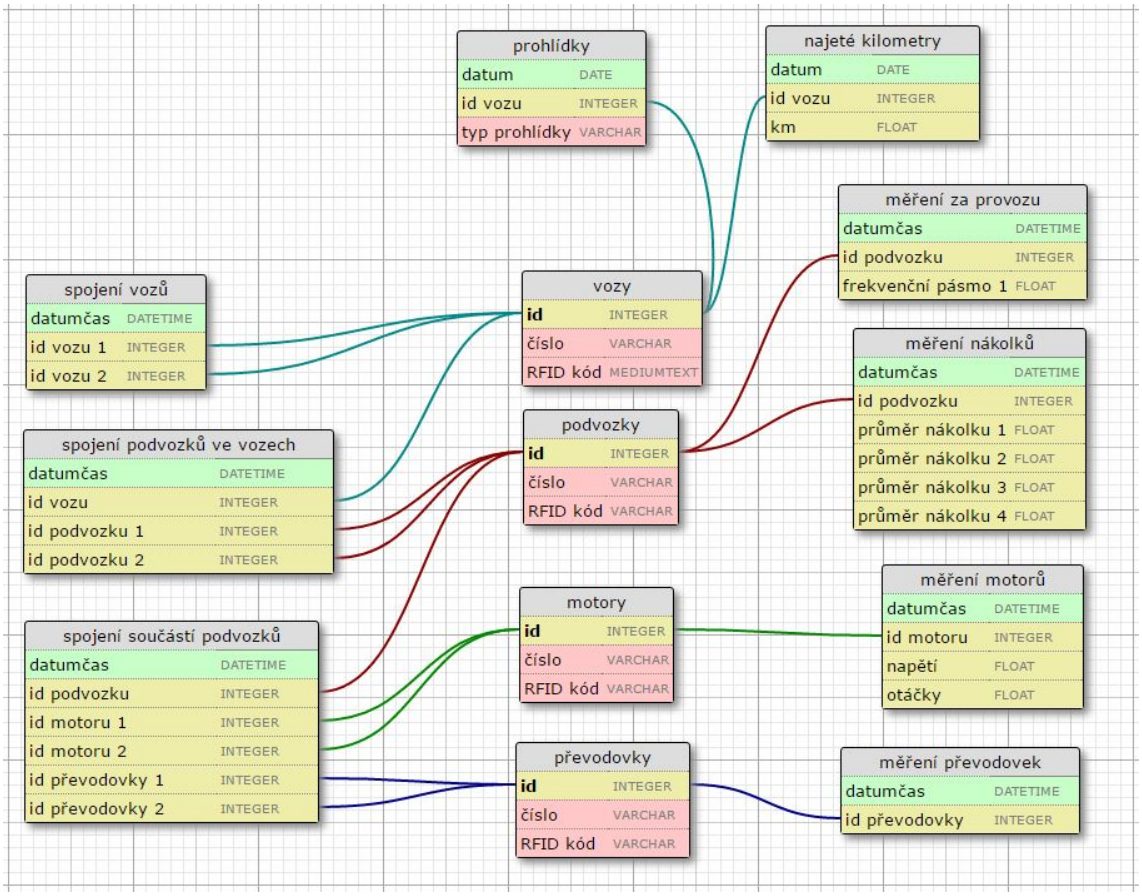
D Navržená XML struktura

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<Root>
	<DateTime>
		<Year val=""/>
		<Month val=""/>
		<Day val=""/>
		<Hour val=""/>
		<Minute val=""/>
		<Second val=""/>
	</DateTime>
	<Data>
		<Measurement>
			<vzorek val=""/>
			<n val=""/>
			<M val=""/>
			<CF_HF val=""/>
			<CF_Raw val=""/>
			<Iso10816 val=""/>
			<KurtosisRaw val=""/>
			<Peak_HF val=""/>
			<Peak_HF_RefCalc val=""/>
			<PeakRaw val=""/>
			<PeakRaw_RefCalc val=""/>
			<RmsAccEnv val=""/>
			<RmsAccRaw val=""/>
			<RMS_HF val=""/>
			<RMS_HF_RefCal val=""/>
			<RmsRaw val=""/>
			<RmsRaw_RefCal val=""/>
			<RmsVelEnv val=""/>
			<RmsVelRaw val=""/>
			<SkewnessRaw val=""/>
			<Vdi3832KtHF val=""/>
			<Vdi3832KtRaw val=""/>
			<FreqBand01 val=""/>
			<FreqBand02 val=""/>
			<FreqBand03 val=""/>
			<FreqBand04 val=""/>
			<FreqBand05 val=""/>
			<FreqBand06 val=""/>
			<FreqBand07 val=""/>
			<FreqBand08 val=""/>
			<FreqBand09 val=""/>
			<FreqBand10 val=""/>
			<FreqBand11 val=""/>
			<FreqBand12 val=""/>
			<FreqBand13 val=""/>
			<FreqBand14 val=""/>
			<FreqBand15 val=""/>
			<FreqBand16 val=""/>
			<FreqBand17 val=""/>
```

```
                <FreqBand18 val=""/>
                <FreqBand19 val=""/>
                <FreqBand20 val=""/>
                <FreqBand21 val=""/>
            </Measurement>
            <Positive>
                <Values>
                    n;M
                </Values>
            </Positive>
            <Negative>
                <Values>
                    n;M
                </Values>
            </Negative>
        </Data>
</Root>
```

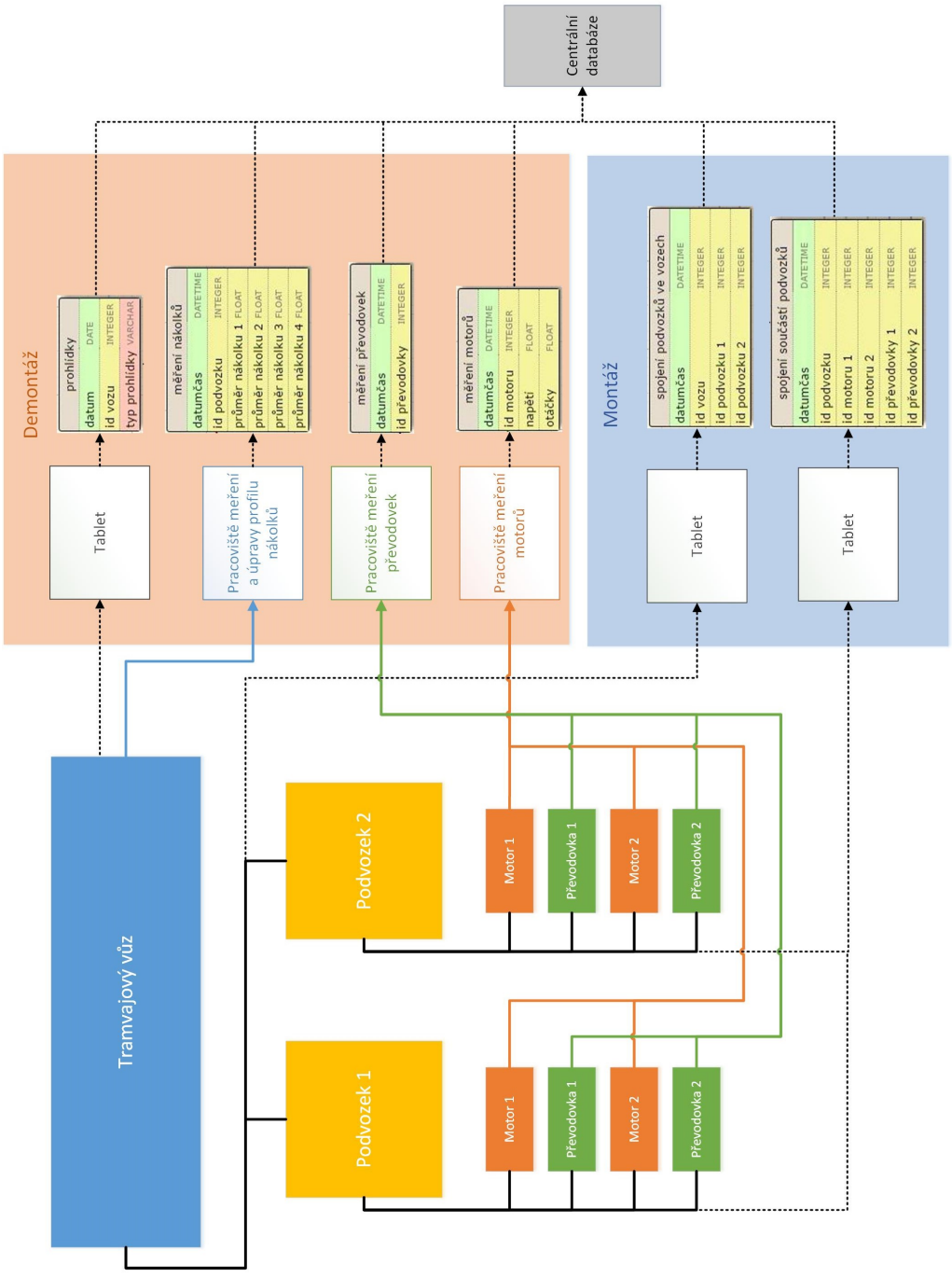
E Navržená struktura databáze

K vizualizaci struktury databáze bylo použito DEMO webového designeru [36].



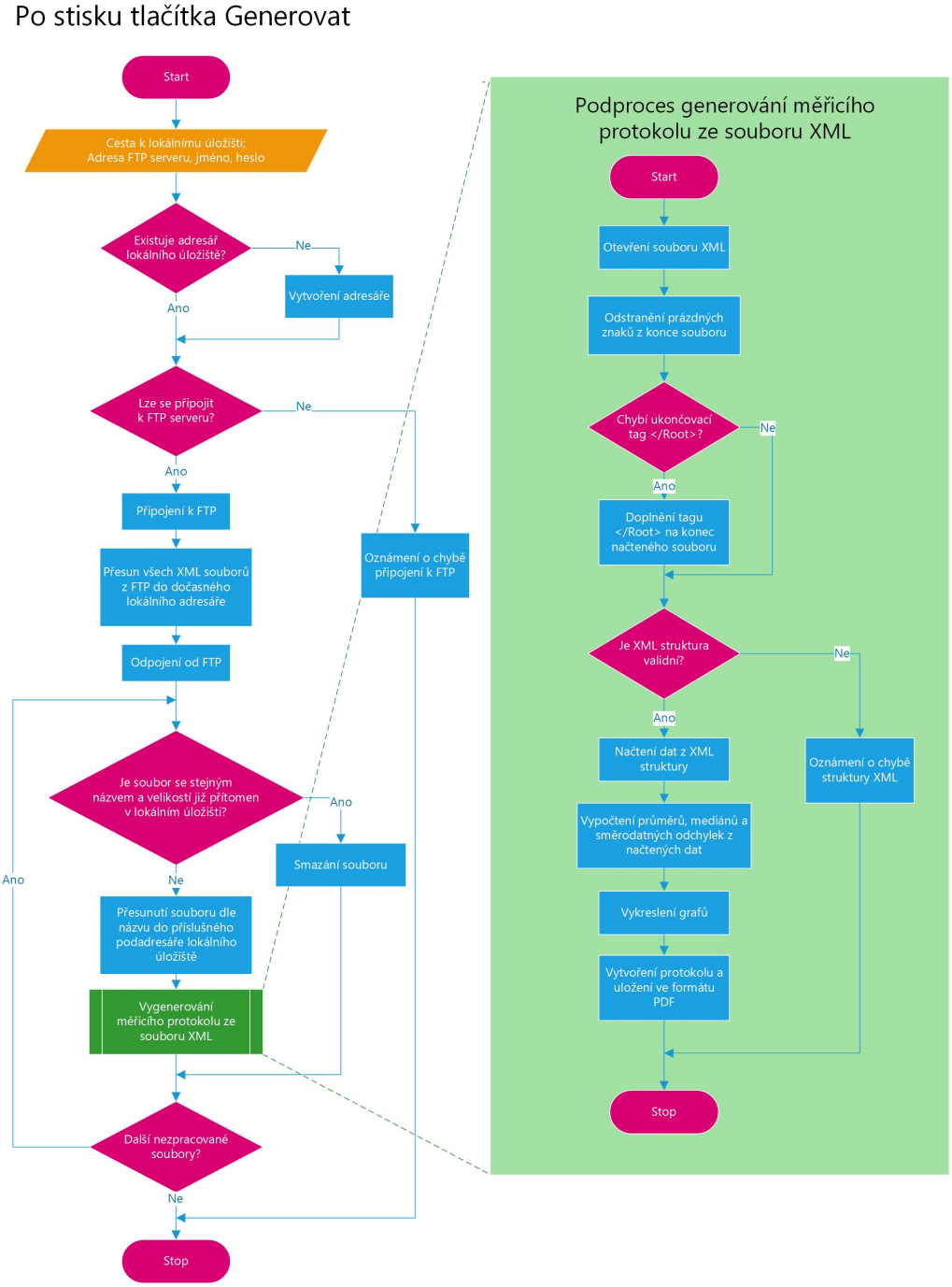
Obrázek E.1: Návrh struktury databáze

F Navržený systém pro dílnu DPMLJ



Obrázek F.1: Schéma toku dílů a dat dílnou DPMLJ

G Vývojový diagram vytvořené aplikace



Obrázek G.1: Vývojový diagram aplikace pro generování měřicích protokolů ze stanice měření převodovek