



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## LOKALIZACE A IDENTIFIKACE TYPU POŠKOZENÍ PNEUMATICKÝCH POHONŮ

LOCALIZATION AND IDENTIFICATION OF DAMAGE TYPE OF PNEUMATIC DRIVES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vladislav Richter

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.

BRNO 2018



# Zadání diplomové práce

|                   |                                    |
|-------------------|------------------------------------|
| Ústav:            | Ústav konstruování                 |
| Student:          | <b>Bc. Vladislav Richter</b>       |
| Studijní program: | Strojní inženýrství                |
| Studijní obor:    | Konstrukční inženýrství            |
| Vedoucí práce:    | <b>doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.</b> |
| Akademický rok:   | 2017/18                            |

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 diplomové práce:

## Lokalizace a identifikace typu poškození pneumatických pohonů

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pneumatické pohony jsou součástí mnoha strojírenských a dopravních zařízení. Základním požadavkem je dlouhodobá spolehlivost jejich funkce. Rostoucí nároky v některých aplikacích však způsobují postupnou degradaci pohyblivých částí, případně těsnících prvků. Současné diagnostické postupy neumožňují spolehlivou lokalizaci a ani přibližnou identifikaci typu poškození. Znalost postupů lokalizace, identifikace typu a případně i rozsahu poškození umožní optimalizovat zásah obsluhy zařízení a zajistí spolehlivost funkce zařízení.

Typ práce: výzkumná

Projekt: TAČR

**Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem práce je navrhnout a experimentálně ověřit možnost identifikace vzniku a případně hodnocení rozsahu poškození vybraných pneumatických prvků užitím moderních diagnostických metod. Navrhnout postup aplikace v rámci výstupní kontroly.

Dílčí cíle diplomové práce:

- provedení experimentálních měření odezvy signálu AE na vybrané typy vad,
- zpracování postupu třídění dat pro databázi odezev signálů,
- provedení experimentů se simulovanými vadami s cílem jejich lokalizace,
- návrh a ověření postupu identifikace vad a jejich lokalizace.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2018.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, Ch.R., BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. Překlad 7. vydání, VUTIUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN 978-80-214-2629-0.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: Technická diagnostika. 1. vydání, BEN - technická literatura, Praha 2006, 408 s, ISBN 978-80-7300-158-6.

KOPEC, B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. 1. vydání, CERM Akademické nakladatelství, Brno 2008, 610 s., ISBN 978-80-7204-591-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Pneumatické pohony jsou nedílnou součástí mnoha strojních zařízení, kde jsou kladeny vysoké požadavky na jejich spolehlivost. Bohužel někdy dochází k jejich selhání, a to buď vlivem nesprávné výroby nebo montáže ve výrobním závodě nebo postupnou degradací pohyblivých částí a těsnících prvků při provozu. Současné diagnostické metody neumožňují přibližnou lokalizaci ani identifikaci typu poškození a nedovolují tak obsluze učinit kvalifikované rozhodnutí. Tato práce se zabývá využitím akustické emise pro tyto účely. Na válcích typu PB od výrobce Poličské strojírny a.s., je představena metodika, která vede k přímé identifikaci nebo alespoň lokalizaci vybraných vad. Implementací této metodiky do výstupní kontroly výrobního závodu bude zvýšeno procento odhalených zmetkových kusů, čímž bude zabráněno haváriím těchto vadných kusů při provozu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Akustická emise (AE), pneumatické pohony, nedestruktivní testování (NDT)

## **ABSTRACT**

Pneumatic drives are an integral part of many machinery, with high demands on their reliability. Unfortunately, they sometimes fail, either due to improper production or assembly at the factory or by gradual degradation of moving parts and sealing elements during operation. Current diagnostic methods do not allow localization or identification of the type of damage and do not allow the operator to make a qualified decision. This work deals with the use of acoustic emission for these purposes. On PB type cylinders manufactured by Poličské strojírny a.s., a methodology is introduced which leads to the direct identification or at least localization of selected defects. By implementing this methodology in the final inspection of the production plant, the percentage of exposed pieces of waste will be increased, thus preventing accidents of these faulty pieces during operation.

## **KEY WORDS**

Acoustic emission (AE), pneumatic actuators, non-destructive testing (NDT)



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

RICHTER, V. *Lokalizace a identifikace typu poškození pneumatických pohonů*.  
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 78 s.  
Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc..





## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Pavlu Mazalovi, CSc. za poskytnuté rady a připomínky při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Františku Vlašicovi, Ph.D. a Ing. Houssamu Mahmoudovi za pomoc při realizaci experimentů a jejich vyhodnocení. V poslední řadě děkuji také rodině za podporu při studiu.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci *Lokalizace a identifikace typu poškození pneumatických pohonů* jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. Pavla Mazala, CSc.. Současně prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně dne 18. května 2018

.....  
Podpis autora



**OBSAH**

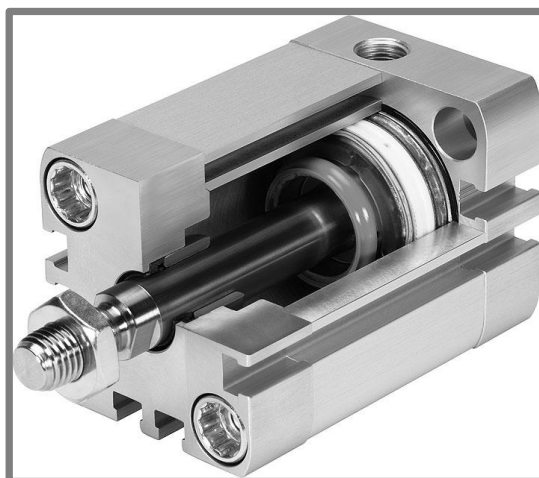
|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1</b>  | <b>ÚVOD .....</b>  | <b>10</b> |
| <b>2</b>  | <b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....</b>                       | <b>12</b> |
| 2.1       | Pneumatické pohony .....   | 12        |
| 2.1.1     | Životnost pneumatických pohonů .....                               | 14        |
| 2.2       | Akustická emise .....  | 17        |
| 2.2.1     | Využití AE v příbuzných aplikacích .....                           | 19        |
| 2.3       | Dosavadní průběh řešení projektu na ÚK .....                       | 21        |
| <b>3</b>  | <b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE .....</b>                          | <b>26</b> |
| 3.1       | Analýza problému .....   | 26        |
| 3.2       | Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše.....         | 26        |
| 3.3       | Podstata a cíle diplomové práce.....                               | 27        |
| <b>4</b>  | <b>MATERIÁL A METODY .....</b>                                     | <b>28</b> |
| 4.1       | Postup řešení .....  | 28        |
| 4.2       | Měřicí stanice.....  | 29        |
| 4.3       | Pneumatické válce PB6040C020.....                                  | 29        |
| 4.3.1     | Vady pneumatických válců PB .....                                  | 30        |
| 4.4       | Měřicí řetězec .....   | 33        |
| 4.4.1     | Snímače AE .....   | 34        |
| 4.4.2     | Analyzátor .....   | 34        |
| 4.4.3     | PC Software.....   | 35        |
| <b>5</b>  | <b>VÝSLEDKY .....</b>  | <b>36</b> |
| 5.1       | Popis signálu AE v průběhu pracovního cyklu válce PB .....         | 36        |
| 5.2       | Výběr vhodného parametru AE .....                                  | 37        |
| 5.3       | Vliv dalších faktorů na signál AE .....                            | 39        |
| 5.3.1     | Vliv umístění snímače .....  | 39        |
| 5.3.2     | Vliv rychlosti pohybu pístnice.....                                | 40        |
| 5.3.3     | Vliv tlaku vzduchu .....   | 41        |
| 5.3.4     | Vliv počtu absolvovaných cyklů .....                               | 42        |
| 5.4       | Ověření opakovatelnosti měření .....                               | 43        |
| 5.4.1     | Opakovatelnost měření za použití různých typů snímačů.....         | 43        |
| 5.4.2     | Opakovatelnost měření u všech nepoškozených válců.....             | 44        |
| 5.5       | Signál poškozených válců.....                                      | 44        |
| 5.6       | Experimenty za účelem zvýraznění vad v signálu AE.....             | 48        |
| 5.7       | Výběr zjistitelných vad a ověření jejich projevu v signálu.....    | 49        |
| 5.8       | Návrh kritérií pro jednoznačnou lokalizaci a identifikaci vad..... | 53        |
| <b>6</b>  | <b>DISKUZE .....</b>   | <b>57</b> |
| <b>7</b>  | <b>ZÁVĚR .....</b>   | <b>60</b> |
| <b>8</b>  | <b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>                               | <b>61</b> |
| <b>9</b>  | <b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....</b>            | <b>65</b> |
| <b>10</b> | <b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....</b>                                 | <b>66</b> |
| <b>11</b> | <b>SEZNAM TABULEK .....</b>  | <b>68</b> |
| <b>12</b> | <b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>   | <b>69</b> |
|           | <b>PŘÍLOHA I.....</b>  | <b>70</b> |

## 1 ÚVOD

Tato diplomová práce je součástí projektu „Nový systém bezdemontážní diagnostiky pneumatických a hydraulických komponent“, který je financován z projektu Technologické agentury České republiky (TAČR), jehož řešitelem je společnost Poličské strojírny a.s. ve spolupráci s Ústavem konstruování na FSI VUT v Brně. Záměrem projektu je výzkum uplatnění metody akustické emise pro ověřování provozního stavu tekutinových mechanismů s cílem identifikace a predikce vzniku jejich poruch včetně pořízení databanky vstupních údajů a ověření funkce na vzorku vybraných představitelů zejména pneumatických prvků. Tato diplomová práce se zabývá konkrétně vytvořením metodiky pro jednoznačnou identifikaci a lokalizaci poruch pneumatického válce typu PB vyráběného společností Poličské strojírny a.s.

Vytvořením databáze nejčastějších poruch pneumatických pohonů a přiřazením charakteristických parametrů detekovaného signálu AE k nim je umožněno diagnostikovat pneumatické prvky ve výstupní kontrole výrobního závodu a snížit tím výskyt poruch při provozu způsobených nesprávnou výrobou nebo montáží. Do budoucna se nabízí vývoj mobilní zkušební aparatury, která umožní diagnostikovat pneumatické pohony přímo v místě jejich použití bez nutnosti demontáže. Díky tomu může být zabráněno vážným poruchám při selháním pneumatických pohonů a ekonomickým ztrátám způsobeným příliš častou obměnou těchto součástí a úniky stlačeného vzduchu do okolí.

Pneumatické pohony (obr. 1.1) jsou součástí mnoha strojírenských a dopravních zařízení. Pracují na principu přeměny tlakové energie vzduchu na kinetickou energii pístu, jehož pohyb může být rotační nebo přímočarý. Základním požadavkem je dlouhodobá spolehlivost jejich funkce. Rostoucí nároky v některých aplikacích však způsobují postupnou degradaci pohyblivých částí, případně těsnících prvků. Současné diagnostické postupy neumožňují spolehlivou lokalizaci a ani přibližnou identifikaci typu poškození. Znalost postupů lokalizace, identifikace typu a případně i rozsahu poškození umožní optimalizovat zásah obsluhy zařízení a zajistí spolehlivost funkce zařízení.



Obr. 1.1 Řez kompaktním pneumatickým válcem ADN-PPS od společnosti Festo [1]

Akustická emise (AE) je jednou z metod nedestructivního testování (NDT). Je založena na stejnojmenném fyzikálním jevu, při kterém dochází v materiálu v důsledku namáhání k uvolňování mechanické energie. Ta se ve formě elastických akustických vln šíří materiálem až ke snímačům AE umístěným na povrchu součásti. Použitím více snímačů lze lokalizovat zdroj AE v materiálu. Takovým zdrojem mohou být například šířící se trhliny v materiálu nebo únik vzduchu z uzavřeného prostoru. Každý zdroj vysílá vlnění s charakteristickými parametry, mezi které patří amplituda vlnění, jeho průběh v čase a frekvenční spektrum. Díky tomu lze jednotlivé zdroje od sebe odlišit [2-7].

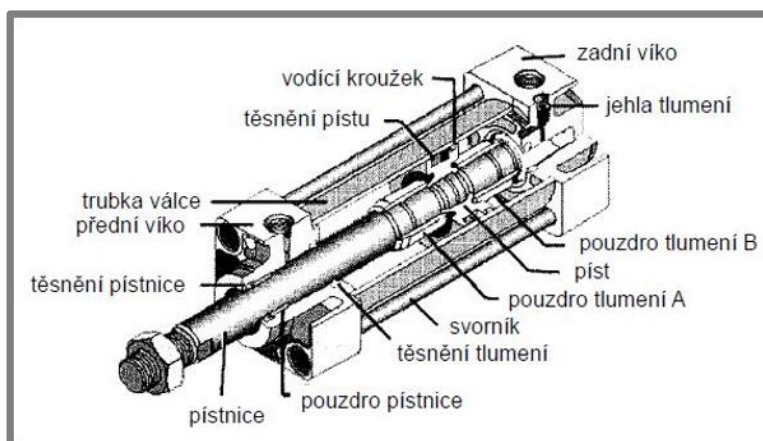
## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Pneumatické pohony

Pneumatické pohony jsou součástí mnoha strojírenských a dopravních zařízení. Pracují na principu přeměny tlakové energie vzduchu na kinetickou energii pístu. Práce pneumatických pohonů může být realizována buď jako lineární pohyb (přímočarý vratný), jako rotační pohyb vratný (kyvný) nebo jako rotační pohyb. Tato práce se bude věnovat pouze pneumatickým válcům, tedy pohonům s lineárním pohybem [8].

Pneumatické válce se také dělí na jednočinné a dvojčinné. Jednočinné válce mají přívod stlačeného vzduchu pouze na jedné straně pístu. Po přerušení přívodu stlačeného vzduchu do válce je pístnice vrácena do výchozí polohy silou pružiny. Ve srovnání s dvojčinnými válci mají menší spotřebu vzduchu. Síla šroubové pružiny působí proti síle vyvinuté tlakem vzduchu na plochu pístu, takže využitelná síla je menší o sílu pružiny. Doraz ve válci brání dosednutí závitů pružiny. Kvůli délce pružiny jsou také jednočinné válce proti dvojčinným se stejným průměrem a zdvihem delší.

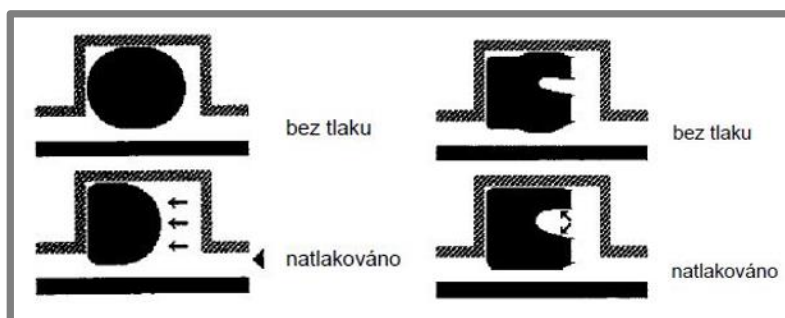
Síla vyvinutá tlakem vzduchu na plochu pístu dvojčinného válce (obr. 2.1) působí podle přívodu vzduchu střídavě v obou směrech pohybu pístu. Dvojčinné pneumatické válce se používají tam, kde mechanismus i při zpětném pohybu má vykonávat práci. Zdvih dvojčinných válců je teoreticky omezen pouze s ohledem na průhyb pístnice a vzpěrnou délku pístnice. Při zasouvání pístnice vyvine válec menší sílu než při jejím vysouvání, protože účinná plocha pístu je menší o plochu příčného průřezu pístnice.



Obr. 2.1 Řez dvojčinným pneumatickým válcem [8]

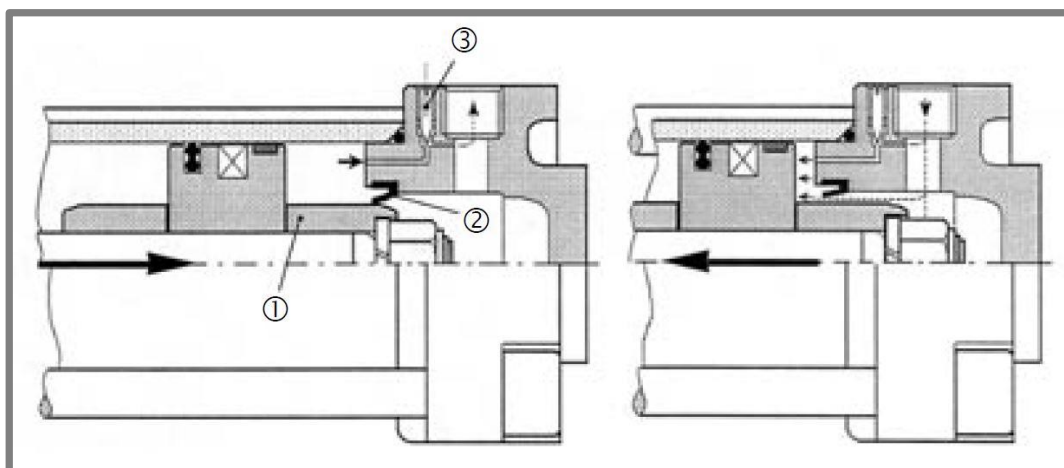
Těsnění brání únikům stlačeného vzduchu a zabezpečuje udržení vyvinuté síly. Podle použití se dělí na těsnění pro nepohyblivé součásti a pro pohyblivé součásti. Těsnění pro pohyblivé součásti musí být navíc schopno roztírat mazivo ve válci. Prvním druhem pohyblivého těsnění je vtlačené těsnění (obr. 2.2), které těsní v obou směrech, při montáži je předpruženo, takže zvyšuje tření. Používá se pro těsnění pístu.

Dalším druhem je břitové těsnění (obr. 2.2), které těsní pouze jedním směrem. Kontaktní tlak je nízký a závisí na tlaku vzduchu. Používá se pro těsnění pístnic.



Obr. 2.2 Těsnění vtačené (vlevo) a břitové (vpravo) [8]

Pneumatické válce mohou podle tlaku vzduchu pohybovat velkými hmotami velkou rychlostí. Z toho vyplývá, že na konci zdvihu má pístnice velkou kinetickou energii. U malých průměrů pneumatických válců se používají k tlumení kinetické energie v konci zdvihu podložky z pružného plastu – elastomeru. U větších válců se používá k tlumení vzduchový polštář, který se vytvoří zvýšením tlaku menšího objemu vzduchu a škrcením jeho odvodu (obr. 2.3).

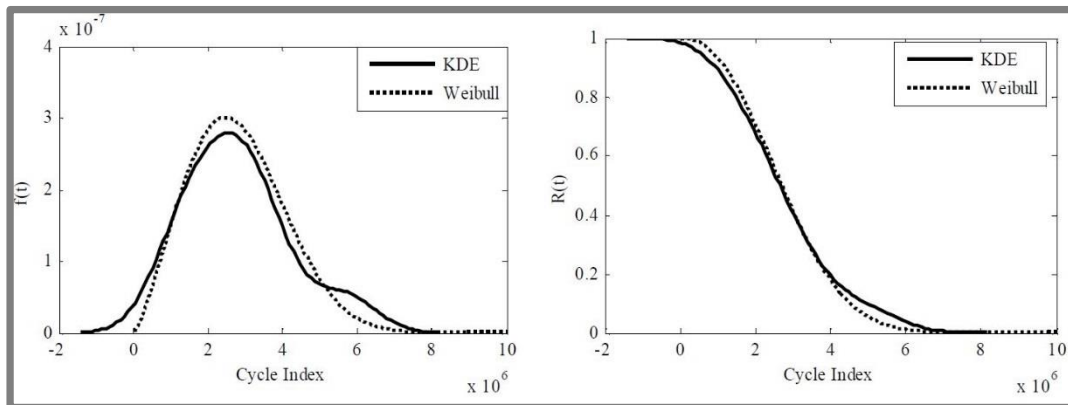


Obr. 2.3 Princip nastavitelného tlumení koncových poloh [8]

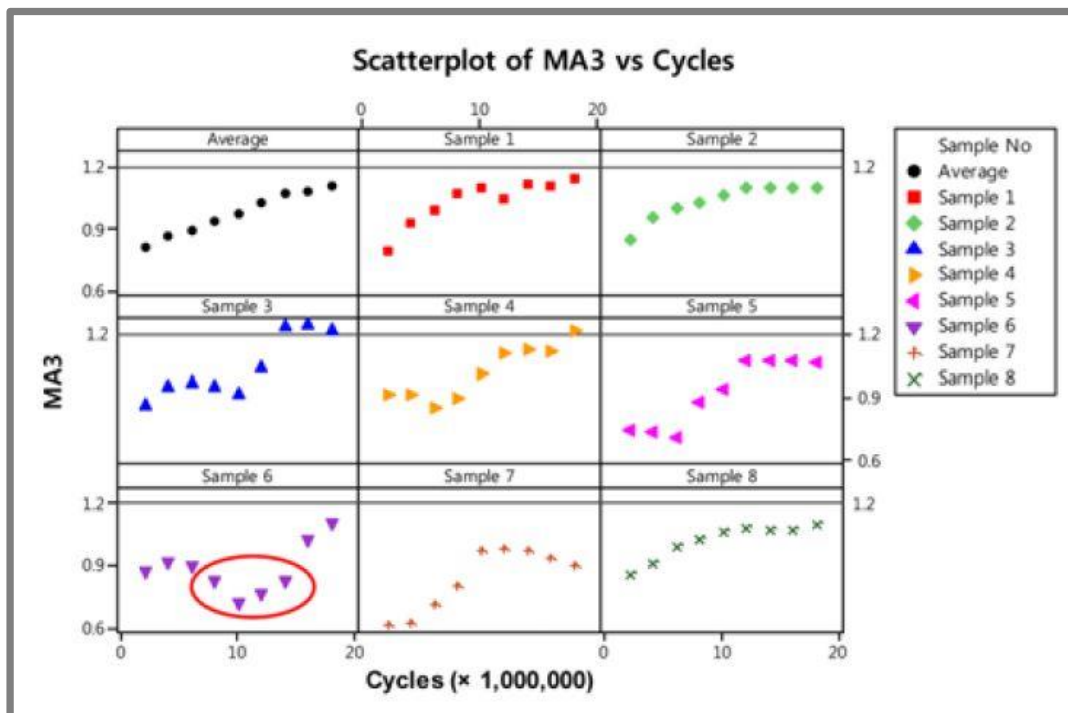
Jakmile se píst tlumení (1) před koncem zdvihu zasune do manžety těsnění (2), vytvoří se mezi pístem a dnem pneumatického válce komora, ze které je vzduch odváděn kanálem, jehož průřez je regulován kuželem šroubu (3). Kinetická energie zvýší tlak v komoře, a tak dochází na konci zdvihu válce k absorbování kinetické energie. Podle nastavení šroubu (3) se pohybuje píst v konci zdvihu menší či větší rychlostí. Při pohybu pístu doleva – vysouvání pístnice má manžeta těsnění pístu tlumení funkci zpětného ventilu. Tlak vzduchu zvedne manžetu a umožní tak průchod stlačeného vzduchu a jeho působení na celou plochu pístu pneumatického válce. Malý průřez mezi manžetou a průměrem pístu tlumení propustí menší množství stlačeného vzduchu, které se projeví malým zrychlením pohybu pístu. Proto má být dráha tlumení co nejkratší.

### 2.1.1 Životnost pneumatických pohonů

Jedním ze způsobů, jak odhadnout životnost pneumatických pohonů, jsou statistické metody. Ty jsou založeny na sledování počtu cyklů do porušení na dostatečně početné sadě vzorků. Zhang [9] a Jungong [10] zjistili, že životnosti pneumatických pohonů nejlépe odpovídá Weibullovo rozdělení a určili jeho parametry pro konkrétní testované pohony. Wang [11] testoval jiný typ pohonů a porovnal Weibullovo rozdělení se statistickou metodou nazývanou Kernel density estimation (KDE), která se ukázala pro požadovanou spolehlivost 0,6 více konzervativní (obr. 2.4).



Obr. 2.4 Porovnání KDE a Weibullova rozdělení. Hustota pravděpodobnosti poruchy (vlevo), funkce spolehlivosti (vpravo) [11]

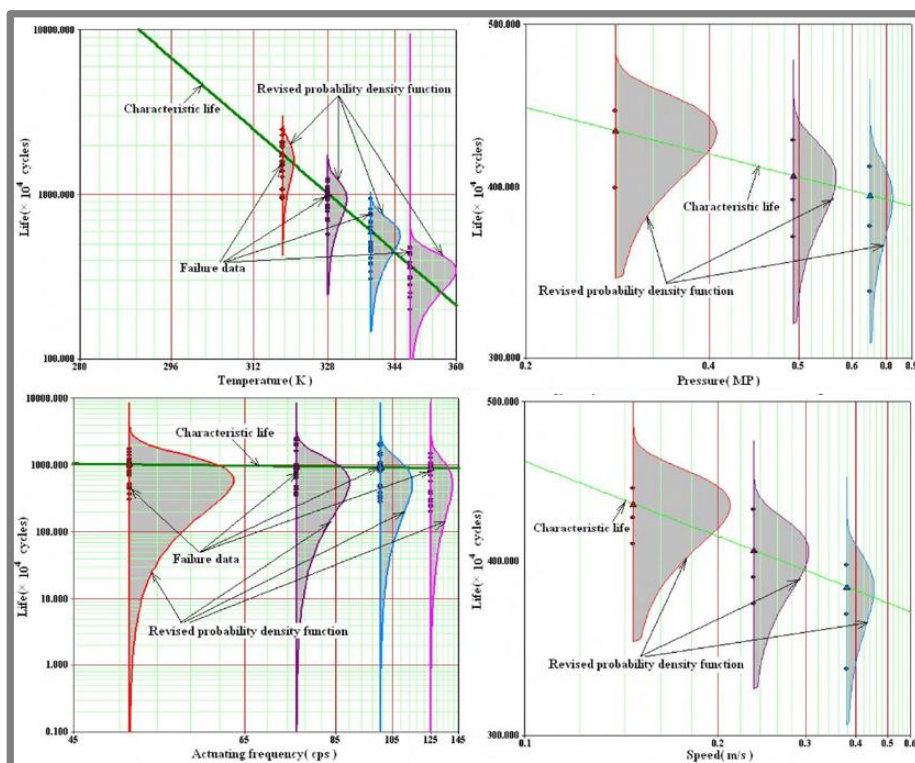


Obr. 2.5 Závislost minimálního operačního tlaku na počtu cyklů pohonu [13]. Na vertikální ose je tlak v barech, na horizontální ose je počet cyklů v milionech.



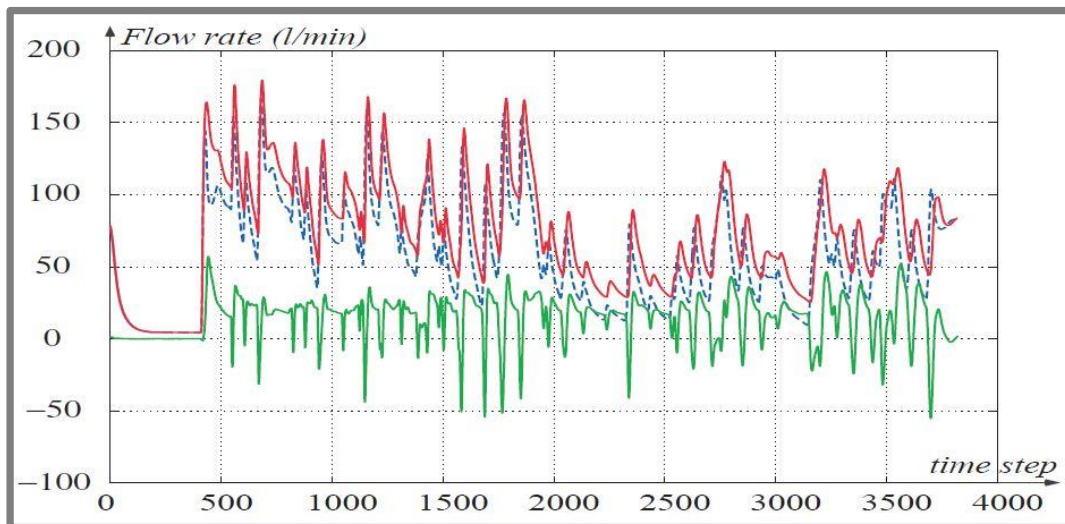
Metody založené na sledování počtu cyklů do porušení jsou zdlouhavé a drahé, protože při zničení každého pohonu lze získat pouze jednu hodnotu. Z těchto důvodů je vhodnější sledovat postupnou degradaci pohonů a získat tak z jednoho vzorku více měřených hodnot. Chen [12] navrhl pro tyto účely měřit minimální operační tlak (MOT), který je ještě při určitém počtu cyklů dostatečný pro uvedení pístu do pohybu. Chang [13] v jeho práci pokračoval. Při rostoucím počtu cyklů pneumatického pohonu se opotřebovává těsnění mezi pístem a vnitřním povrchem těla pohonu. To postupně ztrácí svou funkci a dochází k únikům vzduchu a zvýšení tření. Tím pádem MOT uvádějící píst do pohybu musí být větší, aby tyto ztráty kompenzoval. Závislost MOT na počtu cyklů pohonu je přibližně lineární (obr. 2.5).

Dalším způsobem, jak urychlit testování životnosti pneumatických pohonů, jsou akcelerované testy životnosti. Ty spočívají v provádění testů za nepříznivých podmínek, při kterých nastanou poruchy dříve. Poté lze zjistit závislost životnosti na jednotlivých podmínkách a odhadnout její hodnotu pro normální podmínky, při kterých by trvalo testování výrazně déle. Takovým testováním se zabýval Chen [14], který zkoumal životnost pohonů v závislosti na teplotě a tlaku vzduchu vpouštěného do válce, frekvenci zdvihu (času cyklu) a rychlosti pohybu pístnice (obr. 2.6). Zjistil, že největší vliv na životnost pohonu má teplota média, s jejíž rostoucí hodnotou životnost výrazně klesá. Ta klesá také s rostoucím tlakem média a rychlostí pohybu pístnice, avšak ne tak výrazně. Měnící se frekvence zdvihu životnost pohonu téměř neovlivňuje.



Obr. 2.6 Vliv teploty a tlaku plynu, frekvence zdvihu a rychlosti pohybu pístnice na životnost pohonu [14]

Zhang [15] se zabýval detekcí úniků vzduchu v pneumatických pohonech porovnáváním naměřených dat z průtokoměrů na poškozených a nepoškozených pohonech. U poškozených pohonů je spotřeba stlačeného vzduchu větší než u nepoškozených (obr. 2.7). Překvapivé ale je, že v určitých časových úsecích je tomu naopak (zelená křivka v záporných hodnotách průtoku), což neodpovídá realitě. Tento jev je dán nedokonalou synchronizací obou křivek. V pohonech, kde dochází k únikům, se snižuje tlak pod pístem a tím pádem i síla působící na píst, která ho uvádí do pohybu. Důsledkem toho je menší hodnota zrychlení i rychlosti pístu a také prodloužení času na cyklus. Správnou synchronizací dat lze tento jev odstranit.



Obr. 2.7 Spotřeba vzduchu poškozených (červeně) a nepoškozených (modře) pohonů. Rozdíl mezi nimi (zeleně) [15]

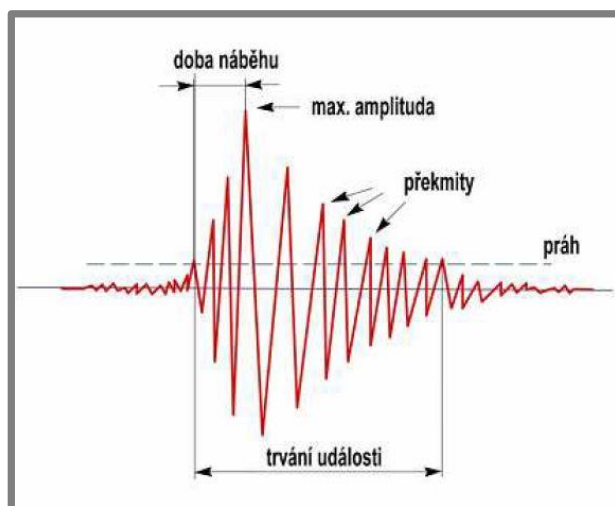
Na stejném principu, tedy monitorování průtoku vzduchu a porovnání naměřených dat s referenčními hodnotami, jsou založeny systémy pro detekování úniků vzduchu dvou největších světových výrobců pneumatických pohonů, kterými jsou německá firma Festo a japonská firma SMC [1,16].

Také Nakutis [17] se zabýval možnostmi on-line monitorování stavu pneumatických pohonů pomocí měření průtoku vzduchu. Opět porovnával naměřené hodnoty s referenčními, avšak ty není jednoduché určit, pokud je pohon testován přímo v místě použití, neboť pracovní podmínky válce (pracovní prostředí, kvalita stlačeného vzduchu, zatížení pístnice) se často liší od těch, za kterých byly naměřeny referenční hodnoty. Aby byly tyto vlivy eliminovány, je vhodné porovnávat a) průtok vzduchu na úplném začátku pracovního cyklu válce (ještě předtím, než se začne pohybovat pístnice), b) spotřebu vzduchu za definovaný časový podcyklus válce. Únik vzduchu může být charakterizován průměrem díry, skrz kterou vzduch uniká. Byla představena nepřímá metoda ke zjištění průměru otvoru zahrnující pracovní tlak a průtok vzduchu na začátku cyklu válce. Bylo zjištěno, že je obtížné detekovat úniky o průměru menším než 0,3 mm. Úniky o průměru 0,5 mm a 0,7 mm byly detekovány spolehlivě.

## 2.2 Akustická emise

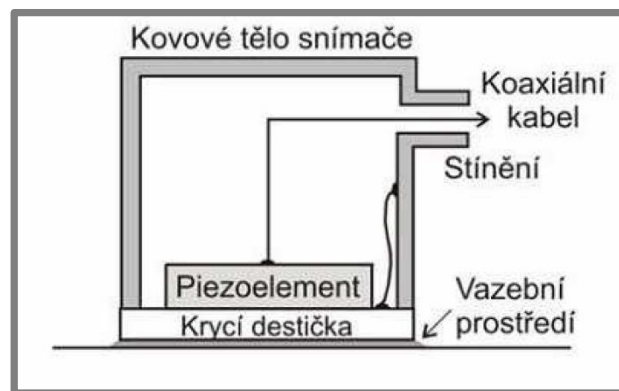
Akustická emise je nedestruktivní diagnostická metoda založená na stejnojmenném fyzikálním jevu. Plastická deformace materiálu vyvolává uvolňování mechanické energie, která se v podobě elastických akustických vln šíří materiálem k jeho povrchu, kde je lze detekovat snímači AE. Frekvence těchto vln se pohybuje od  $10^5$  Hz do  $10^7$  Hz. Na rozdíl od ostatních NDT metod se jedná o metodu pasivní, což znamená, že neovlivňuje měřený objekt, ale pouze zachycuje odezvu materiálu na vnější zatížení. Další výhodou je, že detekuje pouze aktivní vady, a to v celém objemu sledovaného materiálu. Použitím více snímačů lze lokalizovat zdroje signálu. Největší výhodou, ale zároveň i nevýhodou, je vysoká citlivost této metody. Na jednu stranu dokáže zachytit pohyby dislokací v řádech až  $10^{-14}$  m, na stranu druhou je obtížné její signál rozpoznat v šumu, který pochází z procesů v okolním prostředí. Velkým problémem je také složitá opakovatelnost metody. V dnešní době se tato metoda kromě sledování plastické deformace kovů používá k monitorování celé řady dalších procesů, např. netěsností tlakových nádob a potrubí, úniků médií pod tlakem, obrábění a svařování [2-7].

Detekci jedné rázové vlny vzniká v detekovaném signálu jeden izolovaný hit AE. Na základě časových odstupů jednotlivých hitů se signál AE dělí na spojitý a nespojitý. Nespojitý signál (obr. 2.8) je tvořen časově oddělenými hity, které lze od sebe jasně odlišit. Na zaznamenaném signálu vyhodnocujeme nejčastěji počet překmitů nad zvolenou prahovou úroveň za časový interval, maximální amplitudu signálu, dobu trvání události nebo energii signálu. Typickým zdrojem takového signálu je šíření trhlin v materiálu. Spojitý signál je charakteristický překrýváním jednotlivých hitů, jejich sčítáním a vznikem akustického šumu. Lze jej vyhodnocovat pomocí střední, efektivní nebo maximální hodnoty signálu, standardní odchylky, rozptylu nebo spektrální hustoty výkonu. Zdrojem toho typu signálu je např. únik natlakované tekutiny z uzavřeného prostoru.



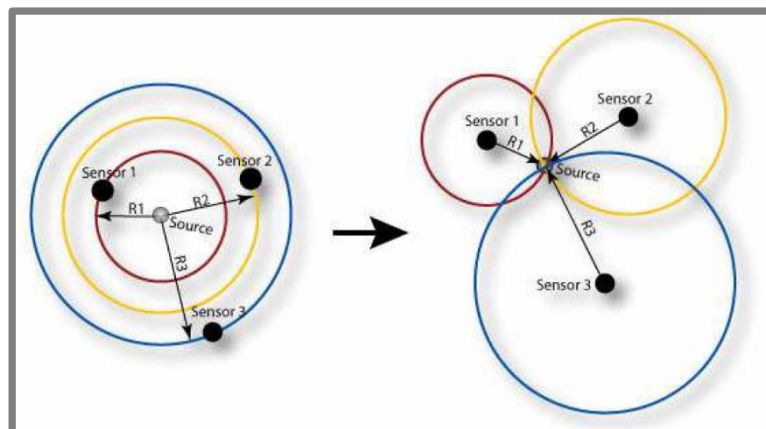
Obr. 2.8 Parametry nespojitého AE signálu [18]

Snímače AE se umísťují na povrch testované součásti, jejich funkcí je zachytit elastické napěťové vlnění a převést ho na nízkonapěťový elektrický signál. Snímače se liší v rozsahu frekvencí, které jsou schopny snímat a podle fyzikálního principu jejich funkce. Většina snímačů pracuje v rozsahu 30 kHz až 1 MHz a jsou založeny na piezoelektrickém jevu (obr. 2.9). Existují však i piezorezistivní, magnetostrikční, elektromagnetické, kapacitní, fotoakustické nebo elektroakustické snímače. Na kvalitu snímaných dat má velký vliv rovinnost a drsnost povrchu zkoušené součásti, ale také vazebné prostředí mezi snímačem a povrchem. Pokud není možná přímá instalace na povrch součásti (kvůli nedostatku prostoru nebo velmi vysoké teplotě povrchu), používají se vlnovody.



Obr. 2.9 Schéma piezoelektrického snímače [19]

Pro lokalizaci zdroje AE je nutné používat více snímačů, konkrétně 2 pro lokalizaci lineární, 3 pro plošnou (obr. 2.10) a 4 pro objemovou. Lokalizace se provádí nejčastěji na základě časového posunu příchodu signálu z jednoho zdroje k různě vzdáleným snímačům. K tomu je ovšem zapotřebí zkompletovat hity do skupin hitů, o nichž se předpokládá, že pochází z jednoho zdroje, což může být při vzájemném překrývání se signálu z různých zdrojů velmi složité. Navíc je zapotřebí vzít v úvahu rozdílnou rychlost šíření vln v různém prostředí nebo směru a odraz vln.



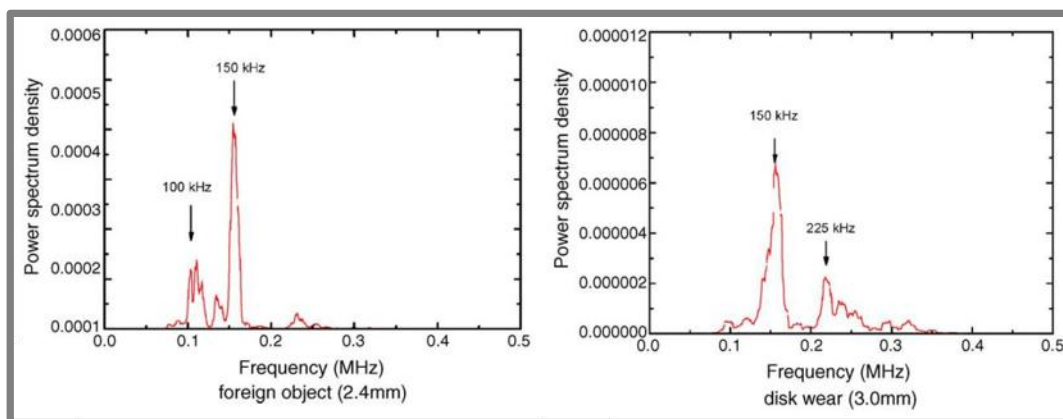
Obr. 2.10 Plošná lokalizace zdroje AE [20]

### 2.2.1 Využití AE v příbuzných aplikacích

Laodeno [21] se zabýval monitorováním úniků vzduchu z vysokotlakého potrubí. Konkrétně zjišťoval podobu signálu AE v závislosti na tvaru díry, kterou plyn uniká (válcová díra, válcová díra se zahlobením, kuželová díra), a na tloušťce potrubí. Amplituda signálu se zvyšuje s rostoucí tloušťkou potrubí a všechny typy děr mají charakteristický průběh signálu v amplitudovém i frekvenčním spektru, takže je lze od sebe rozlišit.

Kaewwaewnoi [22] zkoumal měnící se parametry signálu AE v závislosti na měnícím se průtoku a tlaku vzduchu proudícího skrz kulový ventil různého průměru. Zjistil, že s rostoucím tlakem a průtokem vzduchu a klesajícím průměrem ventilu se zvyšuje jak efektivní, tak i střední hodnota signálu. Dále přidal popis změny signálu při různém typu ventilu a proudící tekutině (voda, vzduch) a odvodil analytický model, který se shodoval s experimentálními daty. V další práci [23] zkonstruoval přenosné zařízení, kterým je možné monitorovat ventily přímo v místě jejich instalace bez nutnosti demontáže a transportu do laboratoře.

Lee [24] se věnoval diagnostice zpětných ventilů v jaderných elektrárnách. Metodou AE rozpoznal 4 uměle vytvořené vady (opotřebení zpětné klapky, opotřebení závěsného čepu, přítomnost cizího tělesa a nedokonalá montáž). Pokud dochází k propouštění média ve zpětném směru, objeví se ve frekvenčním spektru nová dominantní frekvence 150 kHz (obr. 2.11). Frekvenční spektrum se jinak nemění s měnícím se tlakem nebo velikostí úniku média, ale je závislé pouze na typu vady.

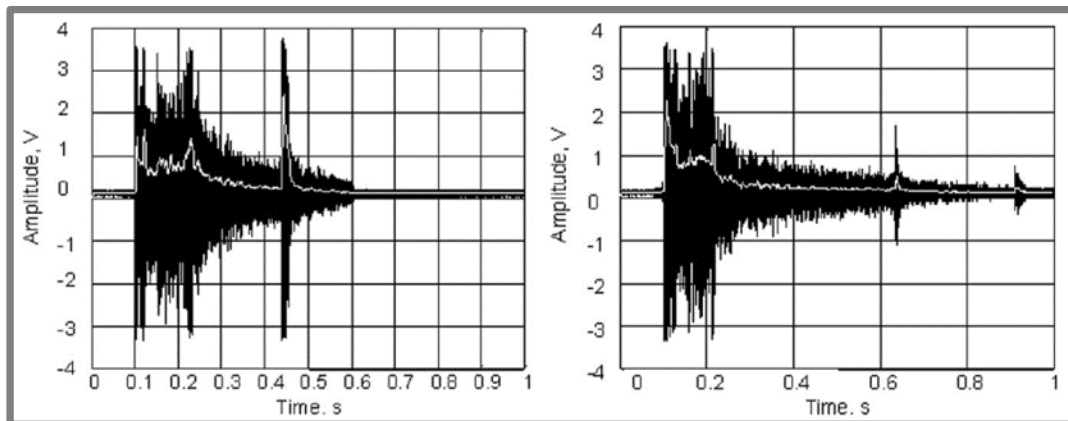


Obr. 2.11 Frekvenční spektrum při přítomnosti cizího tělesa (vlevo) a při opotřebení klapky (vpravo). Pro obě spektra je společná frekvence 150 kHz značící propouštění média ve zpětném směru [24]

Asamene [25] snímal AE signál generovaný třením dvou ocelových rovných desek o sebe. Ukázalo se, že tření je zdrojem signálu o frekvenci od 50 kHz do 400 kHz. Frekvence detekovaného signálu klesá s rostoucí drsností povrchu kontaktních ploch desek a naopak se zvyšuje s rostoucí relativní rychlostí, s jakou se po sobě ocelové desky pohybují, a s rostoucí třecí silou mezi nimi vyvolanou přítlačným tlakem.

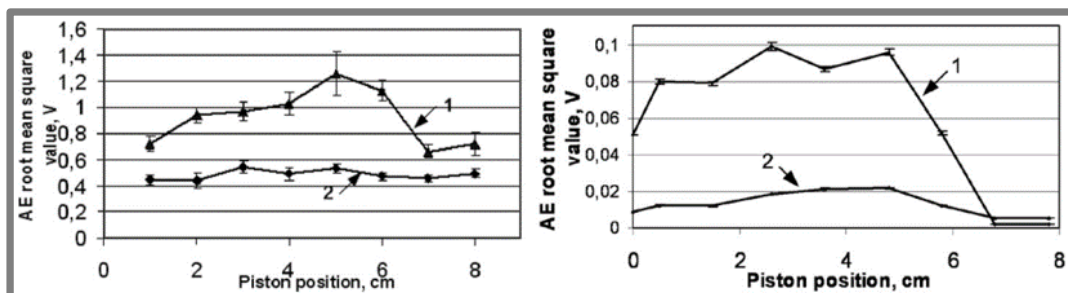


Monitorováním pneumatických pohonů metodou AE se zabýval Augustis [26]. Zdrojem AE v pneumatických pohonech je tření mezi pístem a vnitřní stěnou válce a proudění stlačeného vzduchu ve válci. Zjistili, že odezva nového a použitého pneumatického pohonu se liší (obr. 2.12). Doba trvání cyklu nového pohonu je kratší než použitého. To je důsledkem úniků média mezi pístem a vnitřní stěnou pohonu, který způsobuje snížení tlaku uvádějícího píst do pohybu. Bílou čarou je zobrazena efektivní hodnota signálu.



Obr. 2.12 AE signál nového (vlevo) a použitého (vpravo) pneumatického pohonu [26]

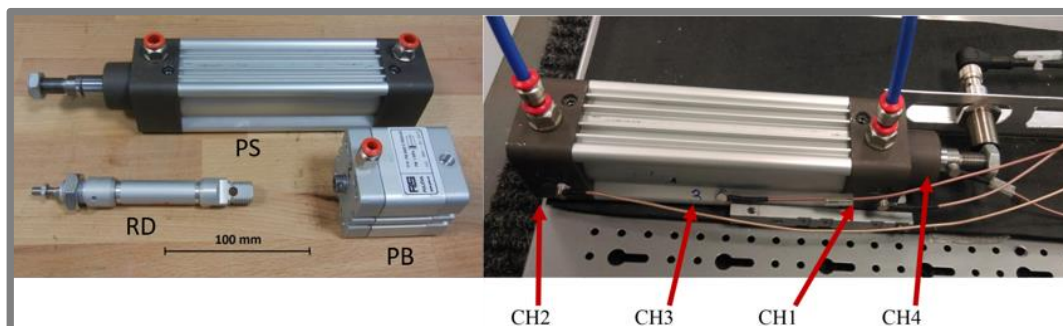
Pro lepší názornost byl zdvih válce (80 mm) rozdělen do úseků po 10 mm, a v každém z nich byla změřena intenzita AE signálu (obr. 2.13). Pokud je pohon nový nebo je míra opotřebení stejná po celé délce zdvihu, měla by intenzita signálu být také po celé délce stejná. Zatímco experiment s novým pohonem tuto teorii potvrzuje, u opotřebovaného pohonu si lze všimnout výrazného kolísání efektivní hodnoty AE signálu v průběhu zdvihu, které vzniká díky úniku stlačeného vzduchu v prostoru mezi pístem a vnitřní stěnou pohonu. K ověření této skutečnosti byl proveden experiment, kdy byla poloha pístnice zafixována (např. dojetím na překážku) a komora pod pístem byla natlakována. Tím bylo eliminováno tření a jediným zdrojem AE zůstal únik vzduchu. Opravdu si lze všimnout slabého signálu pocházejícího z proudění stlačeného média mezi pístem a stěnou válce, který má asi  $10\times$  menší efektivní hodnotu než sečtený signál vzniklý třením a únikem vzduchu. Tento experiment byl monitorován snímači AE umístěnými jak na povrchu pohonu, tak i uvnitř. Intenzita AE uvnitř válce je přibližně  $5\times$  menší než na povrchu.



Obr. 2.13 Celkový signál AE (tření + únik) použitého (1) a nového (2) pohonu (vlevo) a signál vzniklý pouze únikem (vpravo) měřený na povrchu pohonu (1) a uvnitř válce (2) [26]

## 2.3 Dosavadní průběh řešení projektu na ÚK

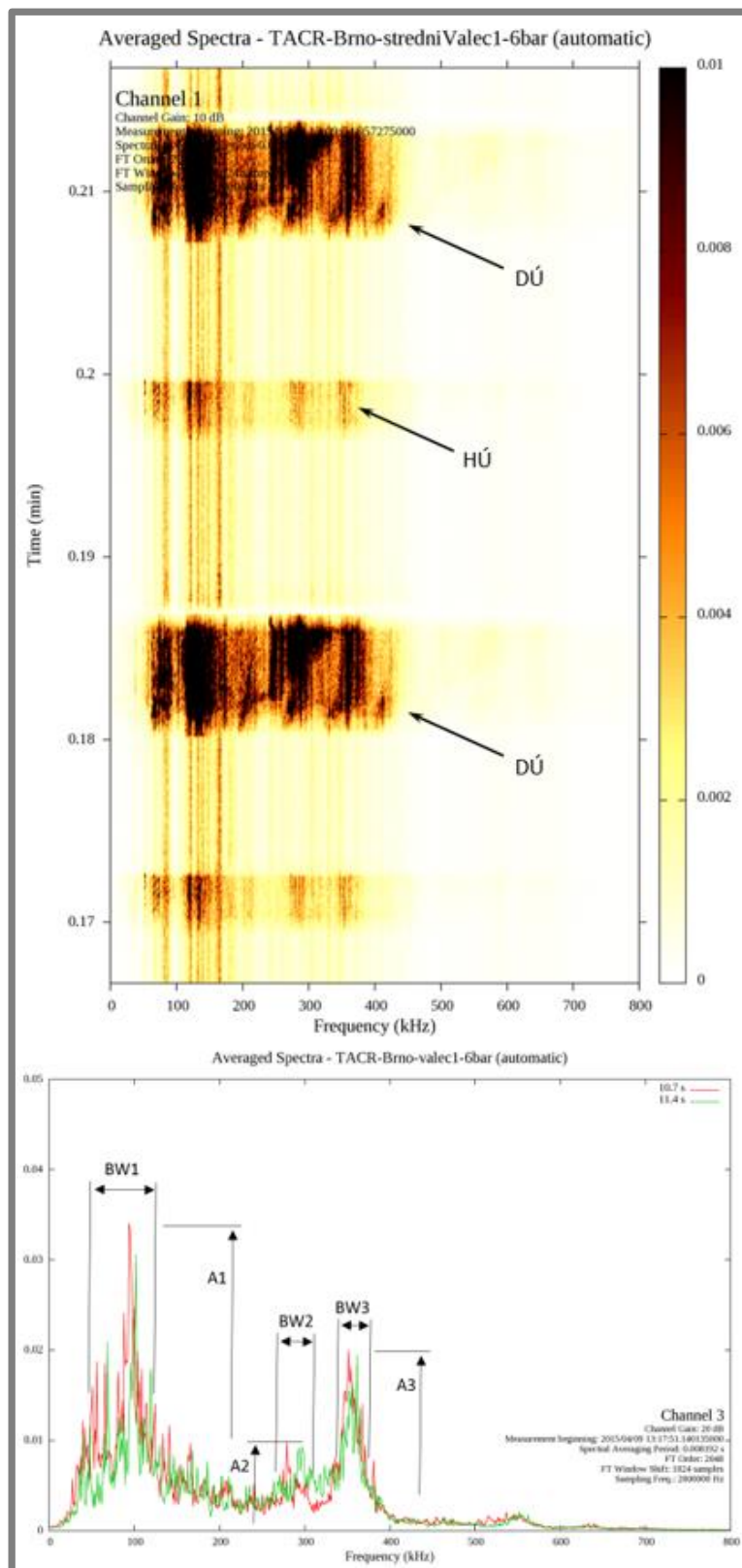
V této kapitole bude představen dosavadní průběh řešení projektu, který se v laboratoři akustické emise na ÚK FSI VUT v Brně řeší již od druhé poloviny roku 2014 [27-29]. Hlavním řešitelem projektu, společností Poličské strojírny a.s., byly dodány 3 typy pohonů ke zkoumání, dvojčinné pneumatické válce PS, na kterých byly provedeny veškeré testy uvedené dále v této kapitole, dvojčinné kompaktní válce PB, kterými se zabývá tato diplomová práce, a jednočinné válce RD, které prozatím na svůj výzkum čekají (obr. 2.14).



Obr. 2.14 Typy zkoumaných pneumatických pohonů (vlevo) a umístění snímačů AE na válci PS (vpravo) [27]

V první fázi byla v rámci jiné diplomové práce [33] vyrobena zkušební stanice pro testování válců. Ing. Houssam Mahmoud se ve své dizertační práci zabývá testováním válců typu PS na této stanici. Výrobce bylo dodáno 16 pohonů typu PS s uměle vytvořenými vadami, které se nejčastěji vyskytují při provozu. Na povrch pohonu byly umístěny celkem 4 snímače AE pro zjištění, které místo bude v budoucnu pro měření nejvhodnější (CH1 – přední víko válce, CH2 – zadní víko, CH3 – tělo válce a CH4 – uložení pístnice) (obr. 2.14). Bylo zjištěno (obr. 2.15), že intenzita signálu AE je největší v okamžiku dojetí pístu do dolní (DÚ) a horní úvrati (HÚ). Pomocí analýzy frekvenčního spektra signálu, který je snímán na povrchu válce, bylo zjištěno, jaké frekvence jsou v tomto signálu nejvíce zastoupené. Vzhledem k tomu, že frekvenční spektrum se pro jednotlivé vady výrazně lišilo, bylo dále použito pro jejich identifikaci.

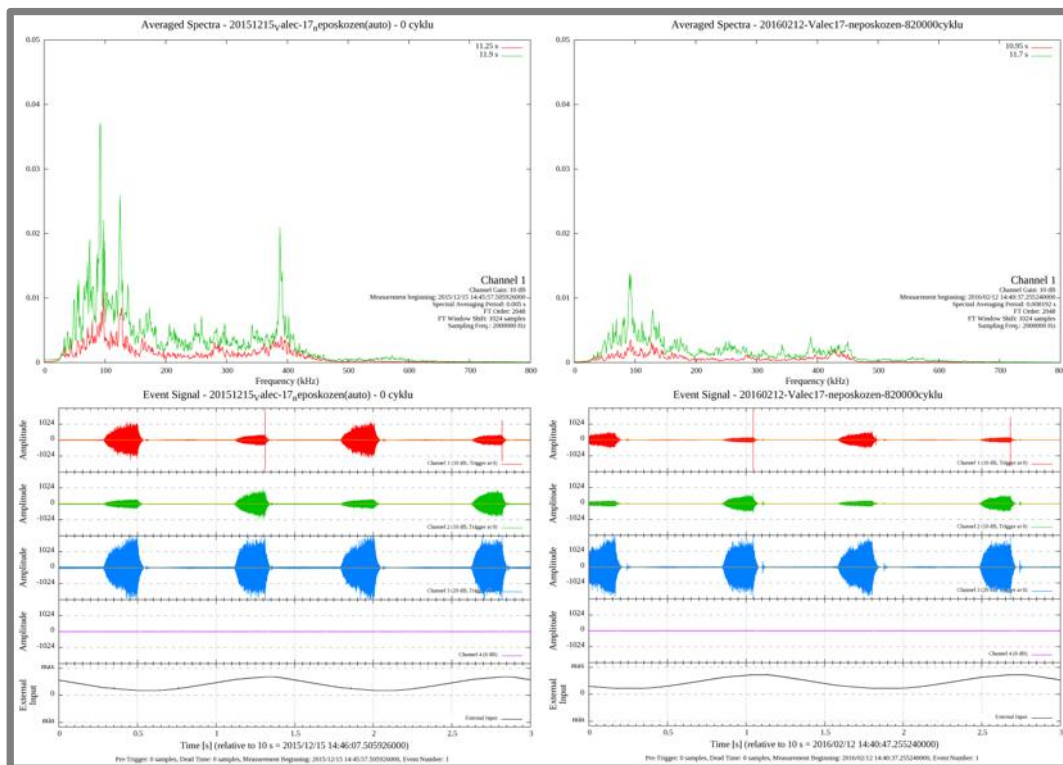
Ve frekvenčním spektru nepoškozeného válce (obr. 2.15) se vyskytují vždy 3 dominantní frekvence (okolo 100 kHz, 280 kHz a 360 kHz). Zvolením konkrétní prahové úrovně lze určit šířku každého dominantního pásma (BW1-3) a maximální amplitudu signálu (A1-3). Pro každý poškozený válec byla vypočítána procentuální změna šířky pásma a amplitudy signálu v porovnání s nepoškozeným a také byl sledován výskyt nových dominantních frekvencí. Tyto 3 faktory byly spojeny do nově zavedeného parametru  $D_{AE}$ , který vyjadřuje odhalitelnost vady metodou AE (čím odlišnější signál od nepoškozeného válce, tím větší odhalitelnost). Tento parametr nabývá hodnot od 1 (vada jistě odhalena) do 10 (neodhalitelná vada). Hodnota parametru  $D_{AE}$  je poté porovnána s hodnotou parametru  $D$ , který reflektuje zjistitelnost vady běžnými metodami. U 13 válců ze 16 platí, že  $D_{AE} < D$ , čímž je prokázána vhodnost metody AE pro identifikaci poškození pneumatických pohonů.



Obr. 2.15 Frekvenční spektrum v čase (nahore), zastoupení jednotlivých frekvencí v signálu (dole) a ukázka stanovení šířky pásma a maximální amplitudy, zeleně HÚ, červeně DÚ [27]



Dále byl zkoumán vliv počtu cyklů na obálku signálu (amplituda signálu v čase) a frekvenční spektrum (obr. 2.16). Po záběhové části (60 tis. cyklů) dochází k poklesu amplitudy v porovnání s novým válcem, s přibývajícím počtem cyklů se již amplituda signálu téměř nemění. Tento jev je nejvýraznější na snímačích umístěných na obou víkách válce (červeně a zeleně), na prostředním snímači (modře) se změna neprojevuje. Ve frekvenčním spektru kromě poklesu amplitudy je také výrazně utlumena dominantní frekvence okolo 380 kHz.

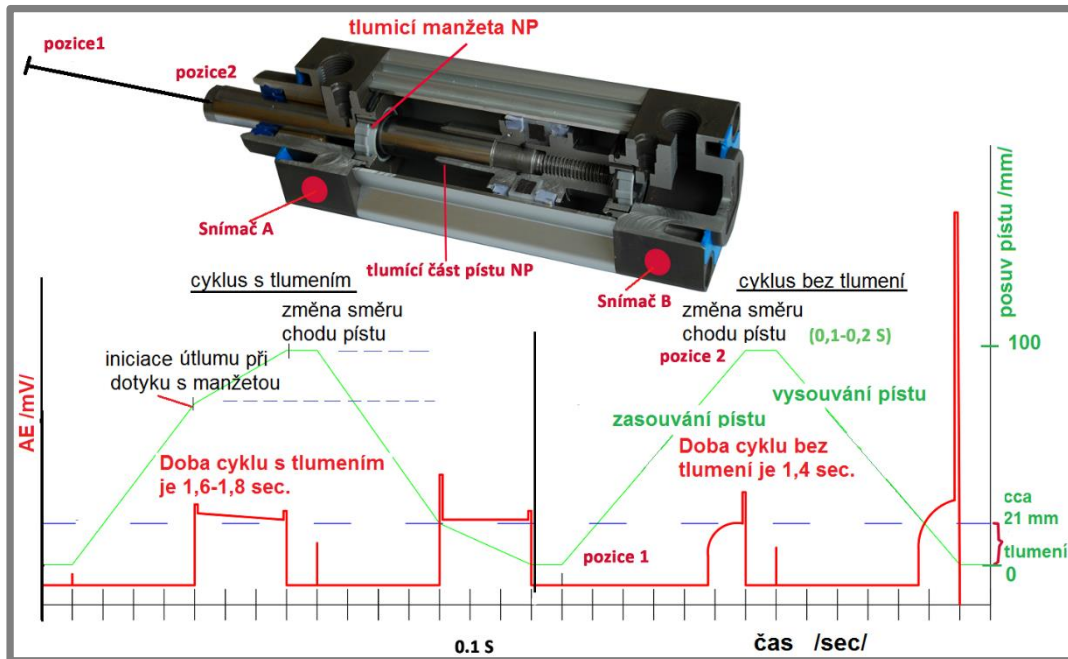


Obr. 2.16 Frekvenční spektrum (nahore) nového pohonu (vlevo) a po 820.tis cyklech (vpravo), obálka signálu (dole) nového pohonu (vlevo) a po 820.tis cyklech (vpravo) [28]

Během testování byla potvrzena opakovatelnost měření zejména na nepoškozených válcích, nicméně v nízkém počtu válců. Sledování změn frekvenčního spektra sice poskytuje důležité informace pro hodnocení stavu válců, ale je silně závislé na vlastní charakteristice snímačů a je velmi citlivé na jakékoliv změny v konfiguraci měření, např. montáž snímačů nebo místo uchycení. Z toho vyplývá, že jako spolehlivý faktor nebo ukazatel technického stavu sledovaného válce nespĺňuje kladené požadavky a má nedostatečnou vypovídající schopnost pro odhalení závady. Tyto závěry byly konzultovány se spoluřešitelem projektu ZD Rpety – DAKEL, který měl v tu dobu na starosti vývoj nového diagnostického zařízení.

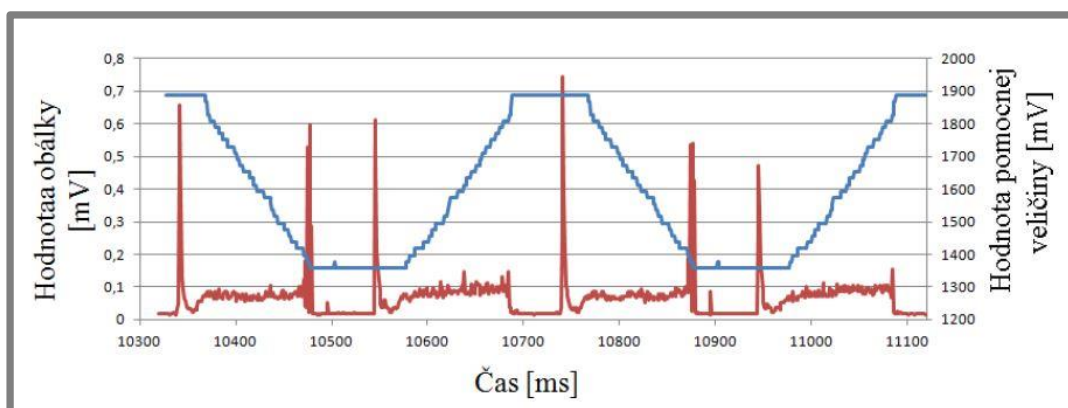
Na základě tohoto požadavku byl dodán nový typ analyzátoru, který kromě dříve používaných parametrů AE (obálka signálu a frekvenční spektrum) dokáže vyhodnotit i jiné parametry AE, např. ASL – průměrná hodnota usměrněného signálu, RMS – efektivní hodnota signálu a MAX\_sig – zobrazení maxima amplitudy signálu.

S novým analyzátozem byl zkoumán vliv tlumení na efektivní hodnou signálu AE (obr. 2.17). Princip tlumení je popsán v kapitole 2.1. Válcé bez tlumení mají odezvu prezentovanou výše, tzn. signál AE je detekován těsně před najetím do HÚ nebo DÚ a ukončen výrazným hitem. Při zapojení tlumení se odezva válce výrazně mění. Při najetí do fáze tlumení (21 mm před HÚ či DÚ) začíná být detekován signál AE a skončí až po najetí do HÚ či DÚ. Vzhledem k tomu, že hodnota RMS se u poškozených válců výrazně liší od nepoškozených, může být tento parametr dalším významným kritériem hodnocení vlastností pneumatických válců, zejména v kombinaci s již dříve představenými parametry.



Obr. 2.17 Schéma vlivu tlumení na signál AE [29]

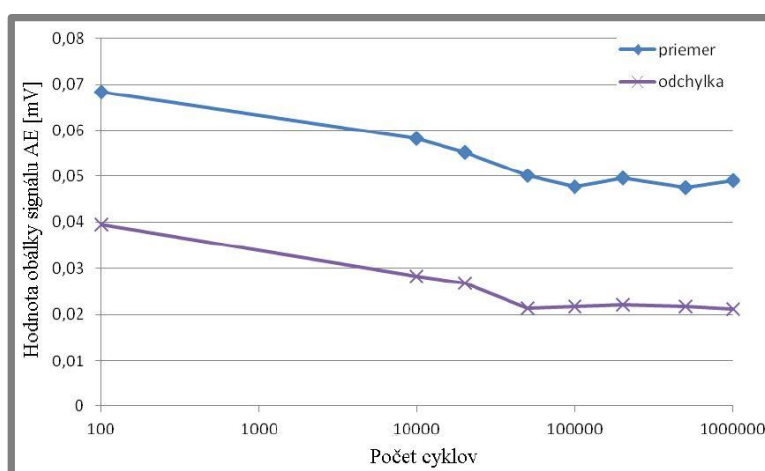
Bc. Denis Kojš se ve své diplomové práci [33] kromě konstrukce měřicí stanice zabýval také ověřením její funkčnosti. Nejprve popsal signál AE charakteristický pro nepoškozené válce typu PB (obr. 2.18). První maximum signálu je detekováno těsně před uvedením pístu do pohybu v DÚ. Při vysouvání je generován slabší signál, který



Obr. 2.18 Signál AE detekovaný za chodu nepoškozeného válce typu PB [33]

je ukončen druhým maximem při dojetí pístu do HÚ. V HÚ není detekován téměř žádný signál. Třetí maximum je detekováno těsně před uvedením pístu do pohybu z HÚ. Při pohybu pístu je opět zaznamenán slabší signál, který ovšem není ukončen maximem při dojetí do DÚ, jako je tomu při dojetí do HÚ. V DÚ opět není generován téměř žádný signál.

V druhé fázi se věnoval opakovatelnosti měření za použití navrženého držáku snímačů a bez jeho použití (snímače jsou na válec přilepeny). Zjistil, že za použití držáku mají výsledky lepší opakovatelnost. Dále zkoumal vliv počtu cyklů na hodnoty obálky signálu. Pro nový válec s rostoucím počtem cyklů klesá průměrná hodnota obálky signálu až do hodnoty 50 000 cyklů, kde dochází k jejímu ustálení. Oproti původní hodnotě se jedná o pokles téměř o 30 %.



Obr. 2.19 Vliv počtu cyklů na obálku signálu [33]

Při testování poškozených válců typu PB si všiml odlišností v porovnání s nepoškozenými jak v obálce signálu, tak ve frekvenčním spektru, jejich popisu se ale dále nevěnoval. Posledním testováním bylo měření válců se zatížením pístnice. Tato měření byla provedena na válcích typu PS. Bylo zjištěno, že zatížení pístnice má vliv na signál AE a u některých poškozených válců došlo k zvýrazněnému projevu vady v signálu AE v porovnání s měřením s nezatíženou pístnicí.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Pneumatické pohony lze diagnostikovat metodou AE díky odlišné odezvě na různé typy uměle vytvořených vad. Největším problémem je zaručení opakovatelnosti měření. Snímače AE jsou velmi citlivé na jakékoliv změny v konfiguraci měření (montáž snímačů a jejich přesné umístění). Dalším problémem je šum pocházející z procesů v okolním prostředí v případě testování pohonů ve výstupní kontrole výrobního závodu nebo přímo v místě jejich instalace v provozu. V neposlední řadě je nutné brát v úvahu počet již absolvovaných cyklů testovaného válce, protože i ten ovlivňuje signál AE. Velkým nebezpečím je i kumulace vad (více vad na 1 pohonu), ta může mít za následek zcela nepředvídatelné změny v detekovaném signálu. Proto je důležité nalézt vhodné parametry AE signálu, které jsou výše uvedenými vlivy nejméně ovlivněny.

### 3.2 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

Životnost pneumatických pohonů se udává v počtech cyklů a podobně jako u ložisek se jedná o statisticky určenou hodnotu. Ke zjištění aktuálního stavu monitorovaného pohonu se používá měření minimálního operačního tlaku nebo se porovnává naměřený průtok vzduchu pohonem s referenčními hodnotami. Žádná z těchto metod ale neumožňuje identifikovat ani lokalizovat případné poruchy pohonu.

Zdrojem AE v pneumatických pohonech je tření mezi pístem a vnitřní stěnou válce a případný únik vzduchu. Vlastnosti signálu AE pocházejících z obou zdrojů byly popsány v jiných aplikacích (tření mezi dvěma ocelovými deskami, průtok tekutiny kulovým ventilem). Nejčastěji vyhodnocovanými parametry signálu je průběh amplitudy v čase (obálka signálu), efektivní hodnota signálu v čase a frekvenční spektrum.

Díky velké citlivosti metody AE je možné popsat rozdíly v odezvách neporušených pohonů a pohonů s uměle vytvořenými poruchami. Stejně tak lze sledovat vývoj signálu s rostoucím počtem absolvovaných cyklů monitorovaného pohonu. Tyto skutečnosti potvrzují, že metoda AE může být použita k identifikaci a lokalizaci poškození pneumatických pohonů, velký důraz ale musí být kladen na dodržování stejných podmínek při testování v provozu jako při testování v laboratoři.

### 3.3 Podstata a cíle diplomové práce

Hlavním cílem práce je doplnit již schválenou certifikovanou metodiku identifikace typu poškození pneumatických pohonů válců typu PS o její aplikaci na válce typu PB.

Dílčí cíle diplomové práce:

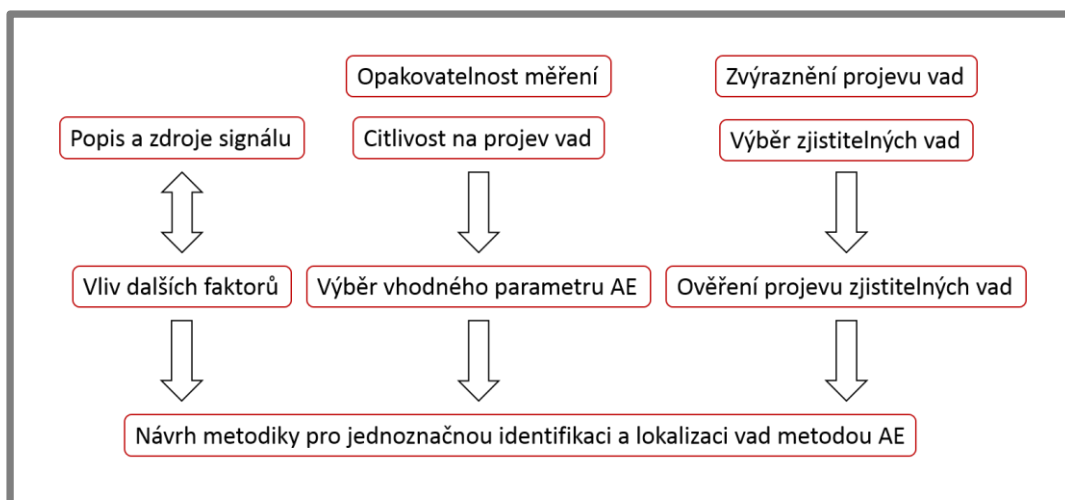
- Provést konstrukční úpravy stanice pro měření pneumatických válců typu PB
- Získání odezvy signálu AE nepoškozených i poškozených pneumatických pohonů typu PB
- Provedení experimentů za účelem ověření opakovatelnosti měření a zvýraznění projevu vad v signálu AE
- Výběr vhodných parametrů signálu AE a návrh kritérií pro jednoznačnou identifikaci vybraných vad

## 4 MATERIÁL A METODY

### 4.1 Postup řešení

Na obr. 4.1 je schematicky znázorněn postup řešení DP. První experimenty sloužily k popisu signálu AE a identifikování jeho zdrojů. Poté byl sledován vliv dalších faktorů na signál, mezi ně patří poloha snímačů na testovaném válci, rychlost pohybu pístitnice, tlak vzduchu a počet absolvovaných cyklů válce. Tyto faktory byly pro další experimenty nastaveny tak, aby došlo k co největšímu zvýraznění vad v signálu. Vzhledem k tomu, že metoda AE je velmi citlivá, byl kladen velký důraz na dobrou opakovatelnost měření, která je nezbytná pro využití metody v praxi. Byla ověřena opakovatelnost signálu v rámci 1 měření, v rámci různých měření na 1 válci (snímače AE byly mezi měřeními vždy odejmuty a válec byl vyjmut z měřicí stanice) a v rámci všech nepoškozených válců, které by měly mít stejnou odezvu v signálu AE. Dále byl zkoumán vliv typu snímače a vazebného média na výsledky měření. K měření byly použity jednak snímače typu MIDI, které se připevňují na povrch měřeného válce pomocí sekundového lepidla, jenž zároveň plní funkci vazebného média zajišťujícího kvalitní přenos signálu mezi válcem a snímačem, a také snímače typu MTR, u kterých plní funkci vazebného média vazelína. K připevnění těchto snímačů na povrch testovaného válce byl navržen a vytisknut na 3D tiskárně speciální držák.

Velmi důležitou částí DP byla volba vhodného parametru AE pro identifikaci vad. Vybraný parametr se musel vykazovat velmi dobrou opakovatelností, ale zároveň také citlivostí na různé typy vad. Studován byl parametr RMS, počet překmitů přes jednotlivé prahové úrovně a frekvenční spektrum signálu v rámci 1 pracovního cyklu válce. Při testování poškozených válců nedošlo u některých uměle vytvořených vad k výraznému odlišení signálu od nepoškozených válců, proto existovala snaha o zvýraznění jejich projevu. Za tímto účelem byla realizována experimenty se zatížením pístitnice a dojetím pístitnice na doraz v polovině zdvihu válce. Na nepoškozených válcích byly poté vytvořeny vybrané defekty a tyto válce byly znovu otestovány, což bylo důležité z hlediska ověření projevu vad v signálu. Po



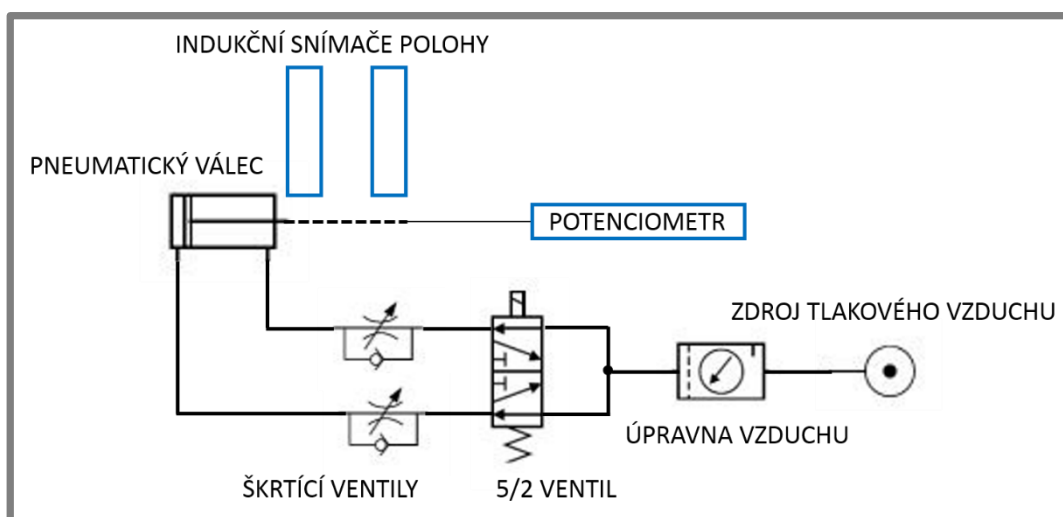
Obr. 4.1 Postup řešení

vyhodnocení všech výše popsaných experimentů byla navržena metodika pro jednoznačnou identifikaci vad metodou AE.

## 4.2 Měřicí stanice

4.2

Měřicí stanice pro testování různých typů pneumatických pohonů byla vyrobena v rámci jiné diplomové práce [33]. Stanice se skládá z mechanismu upínání válce, dvou indukčních snímačů, potenciometru a rozváděcího ventilu (obr. 4.2). Válec je upnut pomocí vertikální rychloupínky v gumovém lůžku, které zabraňuje přenosu signálu AE z ostatních částí stanice. Pro snímání koncových poloh pístnice jsou použity dva indukční snímače pulso-tronic 9984-4065. Jedná se o analogové snímače se snímací vzdáleností 20 mm. Signálem z těchto snímačů je ovládán rozváděcí ventil, který přivádí střídavě tlakový vzduch do obou komor válce. Použitý ventil je typu B9 581RF-1/8, což je monostabilní 5/2 ventil. Kromě zmíněného automatického chodu je však stanice vybavena i ručním ovládním tohoto ventilu. Součástí pneumatického okruhu stanice jsou také 2 škrťací ventily se zpětným ventilem a úpravna vzduchu s regulátorem tlaku. Pro snímání aktuální polohy pístnice je použit lineární potenciometr MSPLT-200-D5-K1-M s rozsahem 200 mm.



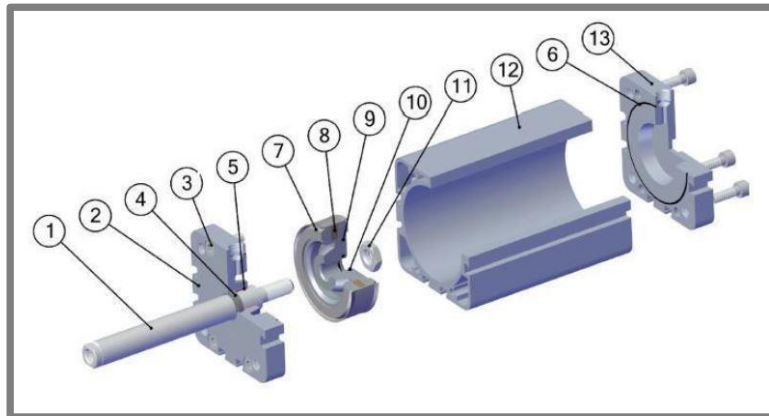
Obr. 4.2 Schéma měřicí stanice

## 4.3 Pneumatické válce PB6040C020

4.3

Pro výzkum v rámci této diplomové práce byly vybrány pneumatické pohony typu PB6040C020 od výrobce Poličské strojírny a.s. Jedná se o dvojčinné kompaktní válce s průměrem pístu 40 mm a zdvihem 20 mm [31]. Skládají se z těchto částí (obr. 4.3): 1-pístnice, 2-přední víko, 3-šroub, 4-těsnění pístnice, 5-vedení pístnice, 6-O-kroužek, 7-těsnění pístu, 8-magnet, 9-píst, 10-O-kroužek, 11-matice, 12-tělo válce, 13-zadní víko. Na rozdíl od válců typu PS tedy nedisponují žádným typem tlumení kromě pružného těsnění pístu.





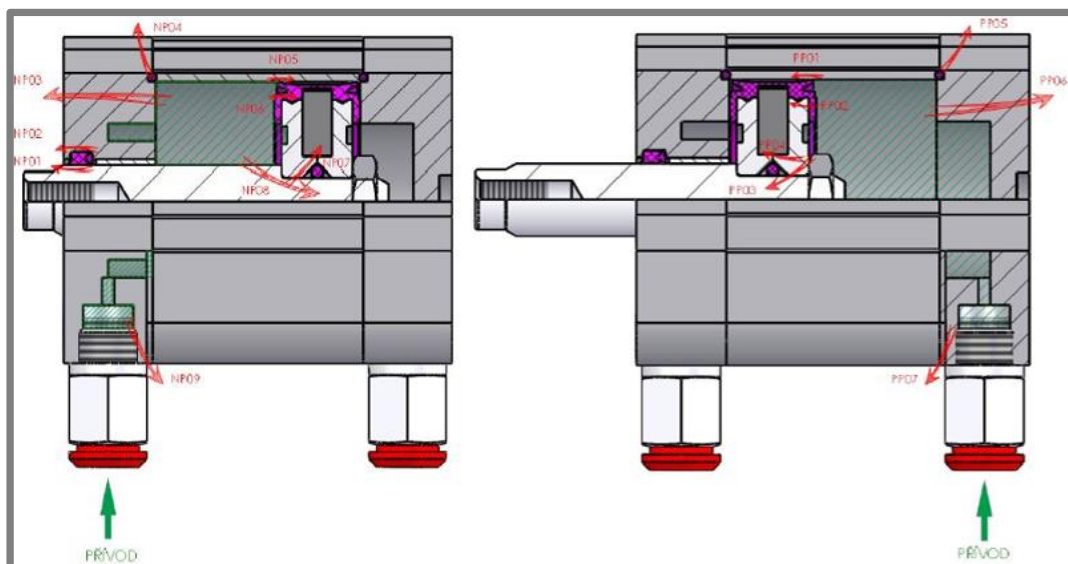
Obr. 4.3 Součásti pneumatického válce typu PB [34]

### 4.3.1 Vady pneumatických válců PB

Výrobce byl vytvořen seznam nejčastějších vad, které mohou vzniknout při výrobě, provozním opotřebením nebo poškozením vnější silou. Vady se dělí na tyto 3 kategorie [34].

#### 4.3.1.1 Netěsnost

Netěsnost je způsobena zhoršením nebo ztrátou funkce těsnění, poškozením těsnící plochy na součásti nebo únikem vzduchu skrze součást. Místa možného vzniku netěsnosti jsou dána konstrukcí válce a jsou uvedena v přehledu níže (obr. 4.4, tab. 4.1, 4.2). V tomto přehledu jsou vyloučeny závady, které jsou rozpoznatelné kontrolou vně válce, např. šroubení a spojovací šrouby jsou utaženy a není zřejmé mechanické poškození válce.



Obr. 4.4 Vady PB válců nad pístem (NP, vlevo) a pod pístem (PP, vpravo) [34]



Tab. 4.1 Vady PB válců nad pístem (NP) [34]

| č.vady | součást                            | místo úniku            | příčina  |
|--------|------------------------------------|------------------------|--|
| 01     | těsnění pístnice v předním víku    | okolo pístnice         | poškozené těsnění<br>poškozený povrch pístnice   |
| 02     | těsnění pístnice v předním víku    | v zápichu víka         | poškozené těsnění<br>poškozený povrch v zápichu  |
| 03     | přední víko                        | přes víko              | porezita odlitku nebo výlisku  |
| 04a    | těsnění trubky v předním víku      | okolo trubky           | poškozené těsnění<br>poškozený povrch trubky   |
| 04b    | těsnění trubky na předním víku     | v zápichu víka         | poškozené těsnění<br>poškozený povrch v zápichu  |
| 05     | těsnění předního pístu v trubce    | okolo trubky           | poškozené těsnění<br>poškozený povrch trubky   |
| 06     | těsnění předního pístu v trubce    | okolo pístu            | poškozené těsnění<br>poškozený povrch pístu  |
| 07     | těsnění předního a zadního pístu   | mezi písty             | poškozené těsnění<br>poškozený povrch předního pístu<br>poškozený povrch zadního pístu<br>povolený píst – nedostatečný přítlak těsnění |
| 08     | těsnění předního pístu na pístnici | okolo pístnice         | poškozené těsnění<br>poškozený povrch pístnice<br>povolený píst – nedostatečný přítlak těsnění   |
| 09     | těsnění šroubení                   | mezi šroubením a víkem | poškozené těsnění<br>poškozený povrch předního víka  |

Tab. 4.2 Vady válců PB pod pístem (PP) [34]

| č.vady | součást                           | místo úniku            | příčina  |
|--------|-----------------------------------|------------------------|--|
| 01     | těsnění zadního pístu v trubce    | okolo trubky           | poškozené těsnění<br>poškozený povrch trubky   |
| 02     | těsnění zadního pístu v trubce    | okolo pístu            | poškozené těsnění<br>poškozený povrch pístu  |
| 03     | těsnění zadního pístu na pístnici | okolo pístnice         | poškozené těsnění<br>poškozený povrch pístnice<br>povolený píst – nedostatečný přítlak těsnění   |
| 04     | těsnění předního a zadního pístu  | mezi písty             | poškozené těsnění<br>poškozený povrch předního pístu<br>poškozený povrch zadního pístu<br>povolený píst – nedostatečný přítlak těsnění |
| 05a    | těsnění trubky v zadním víku      | okolo trubky           | poškozené těsnění<br>poškozený povrch trubky   |
| 05b    | těsnění trubky na zadním víku     | v zápichu víka         | poškozené těsnění<br>poškozený povrch v zápichu  |
| 06     | zadní víko                        | přes víko              | porezita odlitku nebo výlisku  |
| 07     | těsnění šroubení                  | mezi šroubením a víkem | poškozené těsnění<br>poškozený povrch zadního víka   |

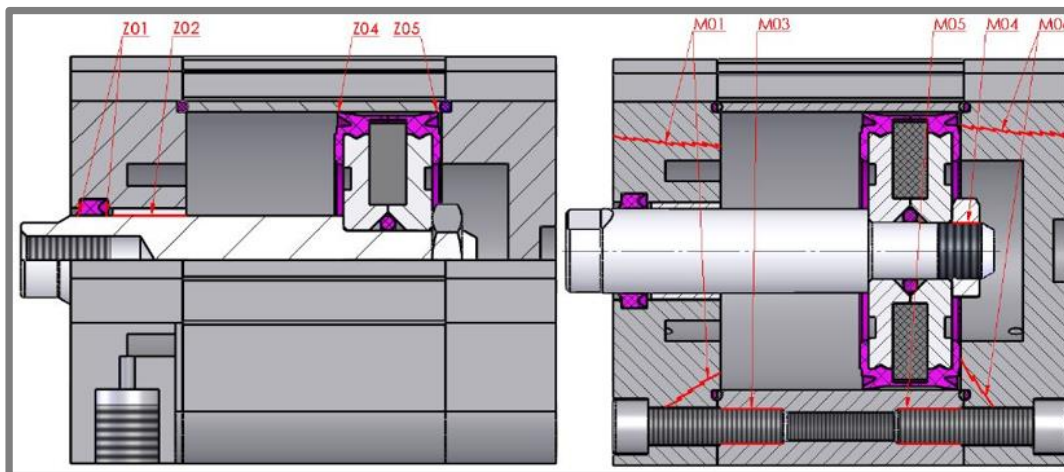
#### 4.3.1.2 Zadírání

Při provozu může na kluzných plochách dojít ke zhoršení třecích podmínek. Následkem je zhoršení chodu válce (trhavý pohyb pístnice), snížení síly působící na pístnici při vysouvání i zasouvání, nežádoucí zvukové projevy, případně úplná ztráta funkce (zadření). Kluzné plochy jsou mezi pohyblivými se pevnými díly. Příčiny

zhoršení třecích podmínek mohou být různé např. degradace maziva, vniknutí cizího tělesa, smísení maziva s částicemi vzniklými opotřebením atd. (obr. 4.5, tab. 4.3).

#### 4.3.1.3 Mechanické závady

Mezi mechanické závady můžeme zařadit poškození dílů vnější silou, ztrátu předpětí závitových spojů s jejich následným uvolněním nebo poškození dílů vysokocyklovou únavou (obr. 4.5, tab. 4.4).



Obr. 4.5 Vady PB válců, zadírání (Z, vlevo), mechanické závady (M, vpravo) [34]

Tab. 4.3 Vady válců PB – zadírání [34]

| č.vady | součást                         | místo úniku                     |
|--------|---------------------------------|---------------------------------|
| 01     | těsnění pístnice v předním víku | pístnice                        |
| 02     | pouzdro v předním víku          | pístnice                        |
| 04     | trubka válce                    | těsnění předního pístu v trubce |
| 05     | trubka válce                    | těsnění zadního pístu v trubce  |

Tab. 4.4 Vady válců PB – mechanické závady [34]

| č.vady | popis                         |
|--------|-------------------------------|
| 01     | poškození předního víka       |
| 03     | uvolnění šroubů předního víka |
| 04     | uvolnění pístu                |
| 05     | uvolnění šroubů zadního víka  |
| 06     | poškození zadního víka        |

Výrobce bylo dodáno 16 válců PB s uměle vytvořenými vadami z výše uvedeného seznamu (tab. 4.5). Na některých válcích je vytvořeno více vad současně, vždy tak, aby jejich projev byl patrný v opačných provozních stavech (vzduch nad pístem – NP a vzduch pod pístem – PP). Některé typy vad mohou mít více příčin, proto se vyskytují vícekrát [35].

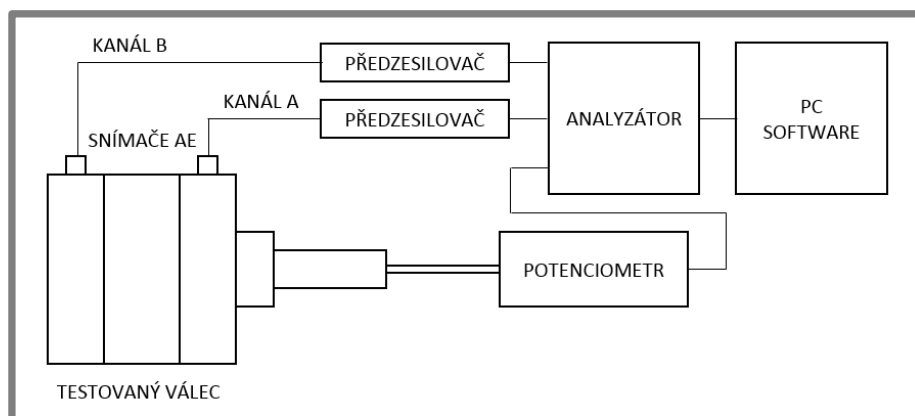
Tab. 4.5 Vady uměle vytvořené na válcích PB [35]

| č. válce | typ vady        | popis vady   |
|----------|-----------------|--|
| 1        | NP 02<br>PP 05a | Poškozený zápich<br>Poškozené těleso válce                                 |
| 2        | NP 01<br>PP 05a | Přestřížená manžeta<br>Přestřížený o-kroužek                               |
| 3        | NP 01<br>PP 05b | Poškozený vnitřní břit manžety<br>Poškozený zápich v zadním víku           |
| 4        | M 05            | Povolený píst o 1 otáčku   |
| 5        | NP 08           | Přestřížený o-kroužek na pístu   |
| 6        | NP 05           | 2 výřezy na manžetě NP   |
| 7        | PP 01           | 2 výřezy na manžetě PP   |
| 8        | NP 09<br>PP 07  | Chybějící o-kroužek na šroubení NP<br>Přestřížený o-kroužek na šroubení PP |
| 9        | NP 09<br>PP 07  | Přestřížený o-kroužek na šroubení NP<br>Chybějící o-kroužek na šroubení PP |
| 10       | M 04            | Povolení 4 šroubů na víku o 0,5 otáčky PP                                  |
| 13       | Bez vady        | Válec z výroby   |
| 14       | Bez vady        | Válec z výroby   |
| 15       | Bez vady        | Válec z výroby   |
| 16       | Bez vady        | Válec z výroby   |
| 17       | Bez vady        | Válec z výroby   |
| 18       | Bez vady        | Válec z výroby   |

#### 4.4 Měřicí řetězec

4.4

Na obr. 4.6 je schéma použitého měřicího řetězce. Signál AE z testovaného válce je zachycován 2 snímači AE. Vzhledem k použitému typu snímačů je nutné zařadit předzesilovače signálu. Společně se signálem AE z obou kanálů je do analyzátoru přiveden signál z potenciometru, který zaznamenává aktuální polohu pístnice. Data z analyzátoru jsou vyhodnocována v PC pomocí softwaru ZDaemon od společnosti Dakel dodávaného společně s analyzátoru.

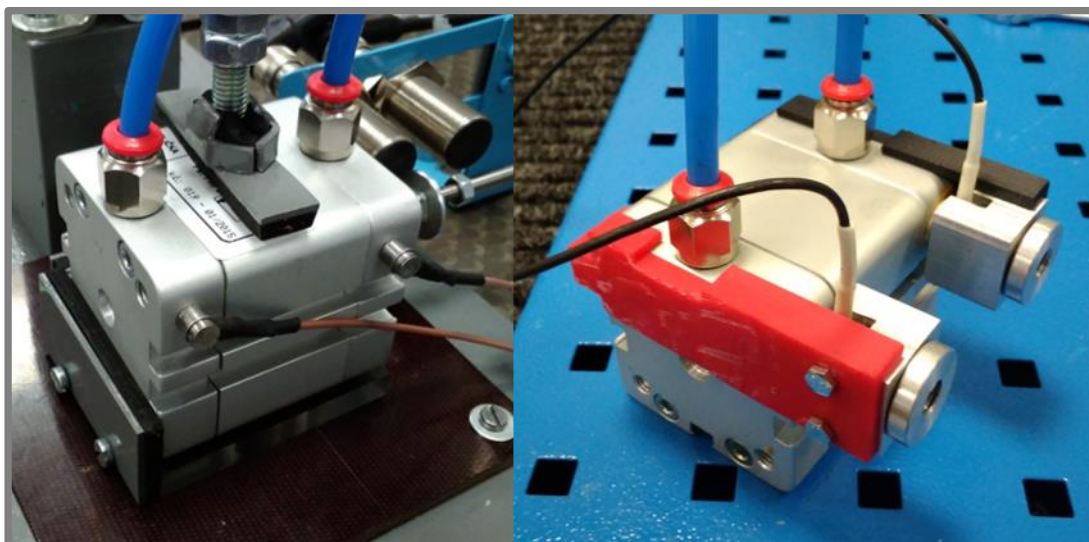


Obr. 4.6 Schéma měřicího řetězce

#### 4.4.1 Snímače AE

K měření AE byly použity 2 snímače typu MIDI od společnosti Dakel [32]. Tento typ snímačů je pro tuto aplikaci vhodný díky svým malým rozměrům (průměr snímače 6 mm, výška 6,3 mm). Pouzdro snímače je vyrobeno z nerezové oceli, což zajišťuje jeho dobrou mechanickou odolnost. Používá se pro laboratorní měření AE na malých měřených objektech. Kvůli svým malým rozměrům není vybaven předzesilovačem, který je tedy nutné zařadit externě. K připevnění na měřený objekt se používá sekundové lepidlo, které zároveň plní funkci vazebného média a zajišťuje tak přenos signálu mezi měřeným objektem a snímačem AE.

Dalšími použitými snímači byl typ MTR od stejného výrobce. Jeho průměr je 16 mm, výška 17 mm. K připevnění těchto snímačů na povrch válce byl navržen speciální držák z plastu vyrobený 3D tiskem. Tento materiál byl zvolen z důvodu své nízké pevnosti, která zajišťuje, že dojde k poškození držáku dříve než k poškození snímače, jehož cena je mnohonásobně vyšší. K tomuto držáku byla přišroubována hliníková kostka s válcovým vybráním pro snímač. Funkci vazebného média zde plní vazelína, která je před každým měřením nanesena na činnou plochu snímače.



Obr. 4.7 Použití lepených snímačů MIDI (vlevo) a snímačů MTR s plastovým držákem (vpravo)

#### 4.4.2 Analyzátor

Ke zpracování měřených dat byl použit analyzátor ZEDO od společnosti Dakel. Jedná se o nejnovější typ analyzátoru od této společnosti. Disponuje 2 nezávislými kanály pro měření AE a dalším kanálem pro záznam pomocných veličin. Celkové zesílení bylo 44 dB (34 předzesilovač a 10 zesilovač analyzátoru). Vzorkovací frekvence byla 2 MHz, perioda pro výpočet parametrů AE 2 ms. Filtrování signálu v intervalu 50-400 kHz, pouze pro měření frekvenčního spektra byly tyto filtry zrušeny, ale signál mimo tento interval nebyl zaznamenán. Nastavení pro zaznamenávání jednotlivých hitů je irrelevantní, neboť se jedná o kontinuální signál.

## 4.4.2.1 Vyhodnocované parametry signálu AE [36]

- **RMS** (root mean square) – efektivní hodnota signálu přepočtená na vstup předzesilovače, vypočtená podle vzorce:

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

- **ASL** (average signal level) – průměrná úroveň signálu přepočtená na vstup předzesilovače, vypočtená podle vzorce:

$$U_{ASL} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |u_i|$$

- **Power** – výkon signálu vztažený k 1  $\Omega$  přepočtený na vstup předzesilovače, vypočtený podle vzorce:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2$$

- **Maximum** – nejvyšší hodnota signálu (kladná obálka)
- **Minimum** – nejnižší hodnota signálu (záporná obálka)
- **Maximum absolutní hodnoty** – nejvyšší hodnota usměrněného signálu
- **Count rate** – počet překmitů na defaultních nebo volitelných prazích
- **Frekvenční spektrum signálu**

Všechny výše uvedené parametry jsou vztaženy na periodu pro výpočet parametrů AE, která byla nastavena na 2 ms. Hodnota  $N$  ve výše uvedených vzorcích je tedy součinem této hodnoty a vzorkovací frekvence.

## 4.4.3 PC Software

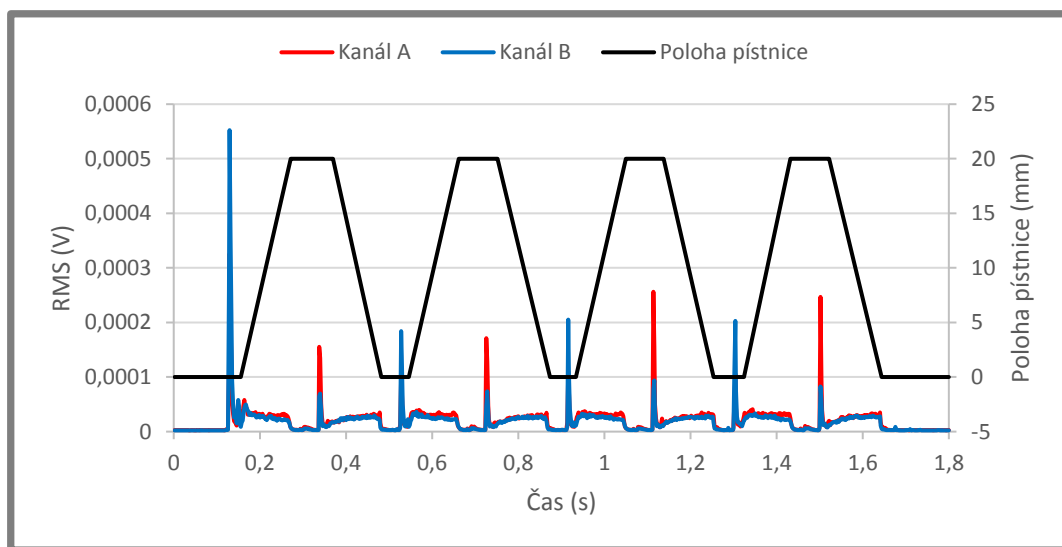
4.4.3

Měření i vyhodnocování signálu AE bylo prováděno v software ZDaemon od společnosti Dakel. Tento program slouží také k ovládání analyzátoru, lze zde měnit např. vzorkovací frekvenci, periodu pro výpočet parametrů AE, hodnoty jednotlivých prahových úrovní nebo přepočítat napětí potenciometru na posuv písnice. Při měření zobrazuje signál online, což umožňuje včas zpozorovat případné chyby při nastavení měření. Uložený signál lze vyhodnocovat přímo v tomto programu, kde je k vizualizaci dat připraveno grafické prostředí, anebo lze využít exportu dat a k jejich zpracování využít např. Microsoft Excel.

## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Popis signálu AE v průběhu pracovního cyklu válce PB

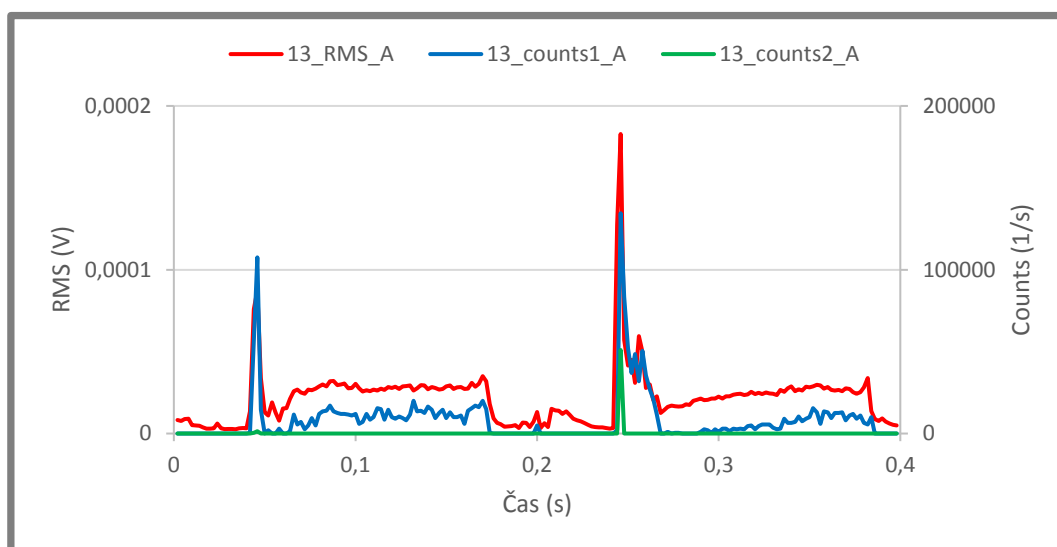
Na obr. 5.1 je zaznamenán signál AE během 4 pracovních cyklů nepoškozeného válce typu PB (válec č. 13). Na levé vertikální ose grafu je zobrazena hodnota parametru RMS ve voltech, na pravé vertikální ose poloha pístitnice v milimetrech a na horizontální ose čas v sekundách měřený od začátku měření. Před začátkem pracovního cyklu je detekován téměř nulový signál. Několik milisekund před uvedením pístitnice do pohybu je zaznamenáno první výrazné maximum signálu, jehož zdrojem je začátek proudění vzduchu do komory pod pístem. Amplituda signálu je vyšší na kanálu B, neboť snímač na kanálu B je umístěn blíže ke šroubení, kterým proudí vzduch do komory pod pístem. Při vysouvání pístitnice hodnota parametru RMS klesá na  $30 \mu\text{V}$ . Tato hodnota je pro oba kanály téměř totožná. V horní úvrati je opět detekován téměř nulový signál. Před uvedením pístitnice do pohybu zpět je zaznamenáno druhé maximum signálu, tentokrát s vyšší amplitudou na kanálu A. Při zasouvání pístitnice signál opět klesá asi na  $30 \mu\text{V}$  na obou kanálech a po dojetí do dolní úvrati hodnota RMS klesá téměř na nulu. Tento průběh signálu se opakuje během dalších 4 pracovních cyklů, což dokazuje dobrou opakovatelnost výsledků v rámci jednoho měření. Jediným rozdílem je výrazně vyšší amplituda signálu před prvním uvedením pístitnice do pohybu, proto pro vyhodnocení nebyl nikdy použit první pracovní cyklus. Jeden pracovní cyklus válce trvá 0,4 s.



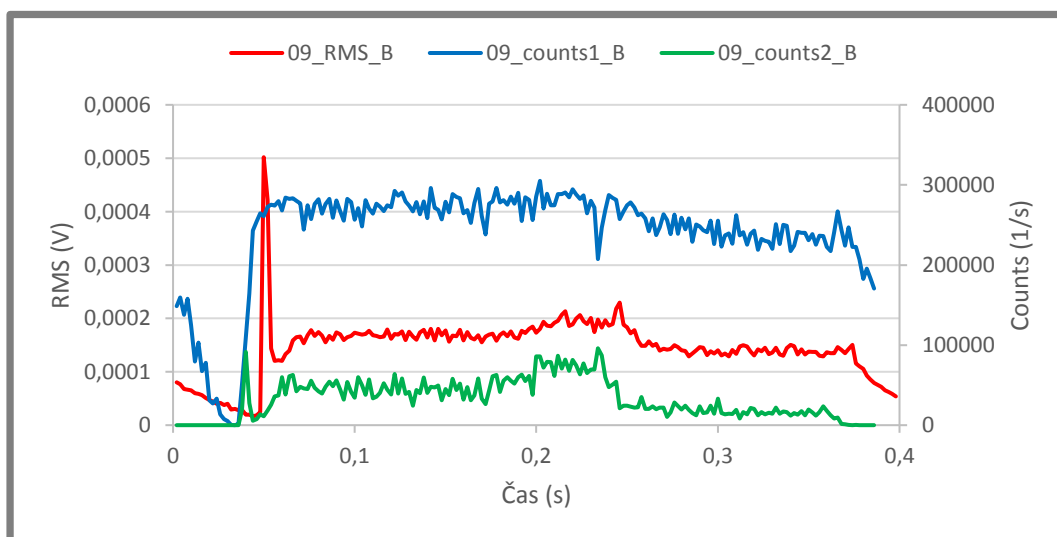
Obr. 5.1 Průběh parametru RMS a polohy pístitnice během 4 pracovních cyklů nepoškozeného válce typu PB

## 5.2 Výběr vhodného parametru AE

Na obr. 5.2 je zobrazeno porovnání parametru RMS s počtem překmitů přes 2 definované prahové úrovně (1. úroveň  $63 \mu\text{V}$ , 2. úroveň  $315 \mu\text{V}$ ) pro nepoškozený válec č. 13. Průběh počtu překmitů přes první práh se téměř shoduje s průběhem parametru RMS. Aktivita na druhé prahové úrovni je zaznamenána pouze v obou špičkách souvisejících se začátkem proudění stlačeného vzduchu do válce. Prahové úrovně byly zvoleny tak, aby první úroveň zaznamenala téměř jakoukoliv aktivitu AE, zatímco druhá měla zaznamenat tak vysokou intenzitu signálu, která již není charakteristická pro standardní chod nepoškozeného válce.



Obr. 5.2 Srovnání parametru RMS s počtem překmitů přes prahové úrovně pro nepoškozený válec č. 13, kanál A

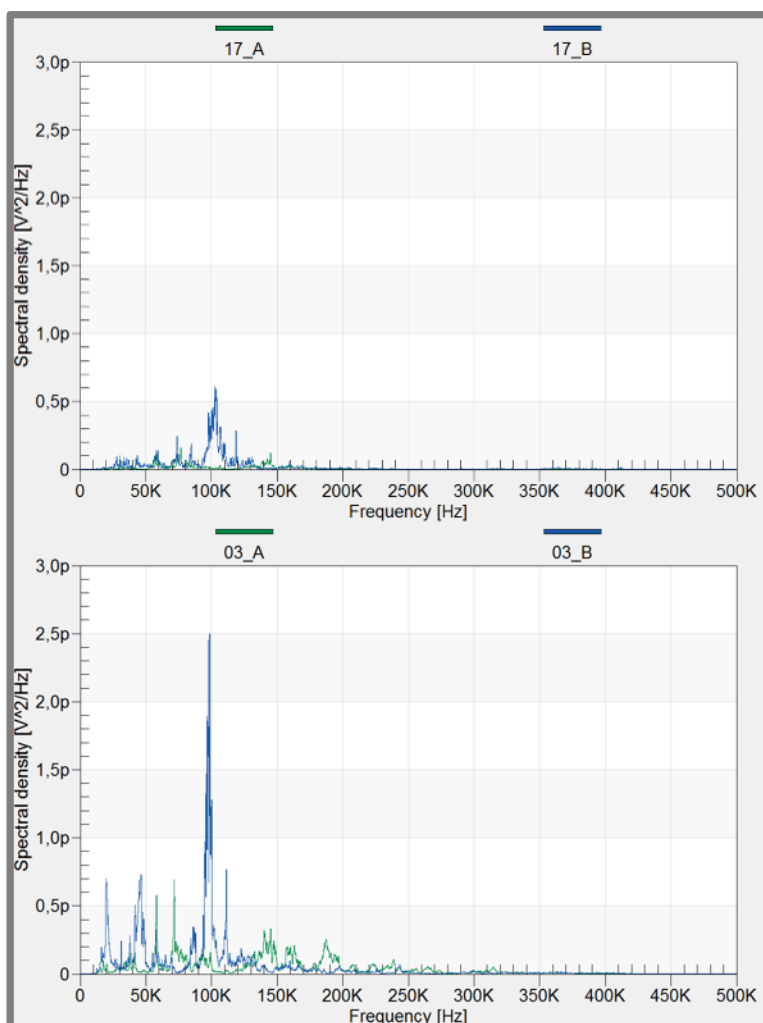


Obr. 5.3 Srovnání parametru RMS s počtem překmitů přes prahové úrovně pro poškozený válec č. 09, kanál B



Na obr. 5.3 je zobrazeno porovnání stejných dvou parametrů pro poškozený válec č. 9. Zde si lze všimnout zvýšené aktivity AE i na druhé prahové úrovni. Průběh počtu překmitů přes obě prahové úrovně se ale opět téměř neliší od průběhu parametru RMS. Porovnání těchto dvou parametrů signálu bylo provedeno pro všechny válce a bylo zjištěno, že parametr RMS má stabilnější průběh v porovnání se sledováním počtu překmitů přes jednotlivé prahy. Vyhodnocování pomocí parametru RMS je také jednodušší, neboť stačí sledovat pouze jednu hodnotu, zatímco u počtu překmitů je nutné sledovat obě, což vede k většímu objemu naměřených dat.

Dalším zkoumaným parametrem bylo frekvenční spektrum signálu za 1 pracovní cyklus válce. Na obr. 5.4 nahoře je zobrazeno frekvenční spektrum nepoškozeného válce č. 17. Lze si zde všimnout jediné dominantní frekvence okolo 100 kHz. Frekvence vyšší než 200 kHz nejsou v signálu výrazně zastoupeny. Průběh frekvenčního spektra byl u všech 6 nepoškozených válců velmi podobný. Na obr. 5.4 dole je zobrazeno frekvenční spektrum poškozeného válce č. 3. Dominantní frekvence okolo 100 kHz zůstává, avšak její amplituda je daleko vyšší v porovnání s nepoškozenými válci. Dále se zde objevují nové dominantní frekvence, z nichž



Obr. 5.4 Frekvenční spektrum signálu nepoškozeného válce č. 17 (nahore) a poškozeného válce č. 3 (dole)



nejvýraznější je ta okolo 45 kHz. Frekvence vyšší než 300 kHz již nejsou v signálu výrazně zastoupeny. Takto byla porovnána frekvenční spektra všech dostupných válců a bylo zjištěno, že na jejich základě lze zřetelně odlišit od nepoškozených menší počet válců než v případě parametru RMS, proto byl k dalšímu vyhodnocení vybrán tento parametr.

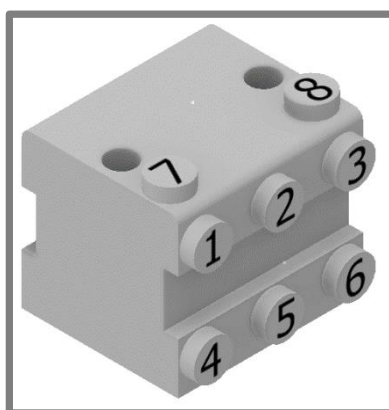
### 5.3 Vliv dalších faktorů na signál AE

5.3

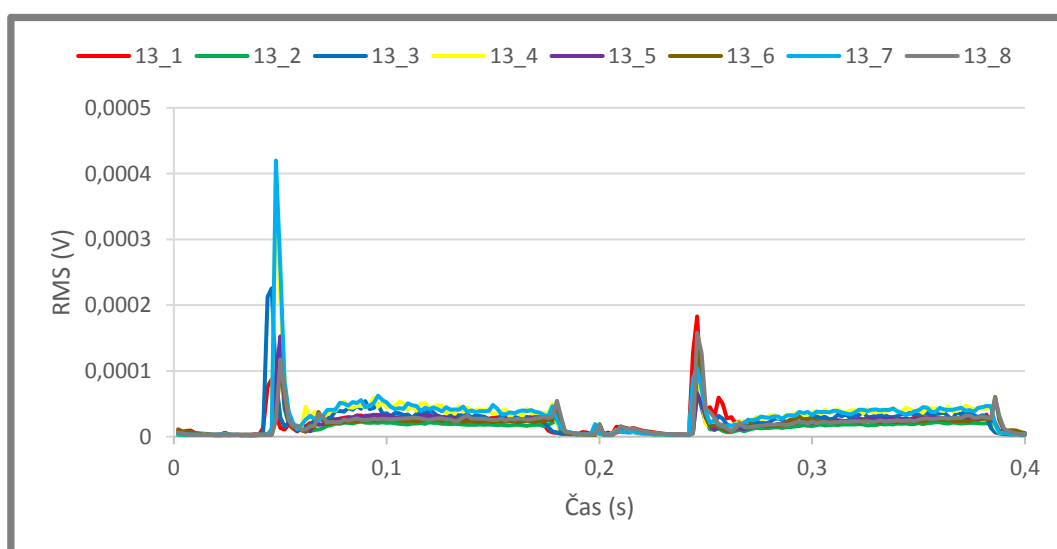
#### 5.3.1 Vliv umístění snímače

5.3.1

V další fázi bylo nutné nalézt vhodnou polohu pro umístění snímačů na testovaný válec. Proto byla provedena série experimentů s různou polohou snímačů. Snímače byly na válci rozmístěny podle obr. 5.5. Čelní strany předního i zadního víka byly z výběru vyloučeny, neboť ty slouží ve většině případů k upevnění válce k okolním dílům.



Obr. 5.5 Umístění snímačů na válci

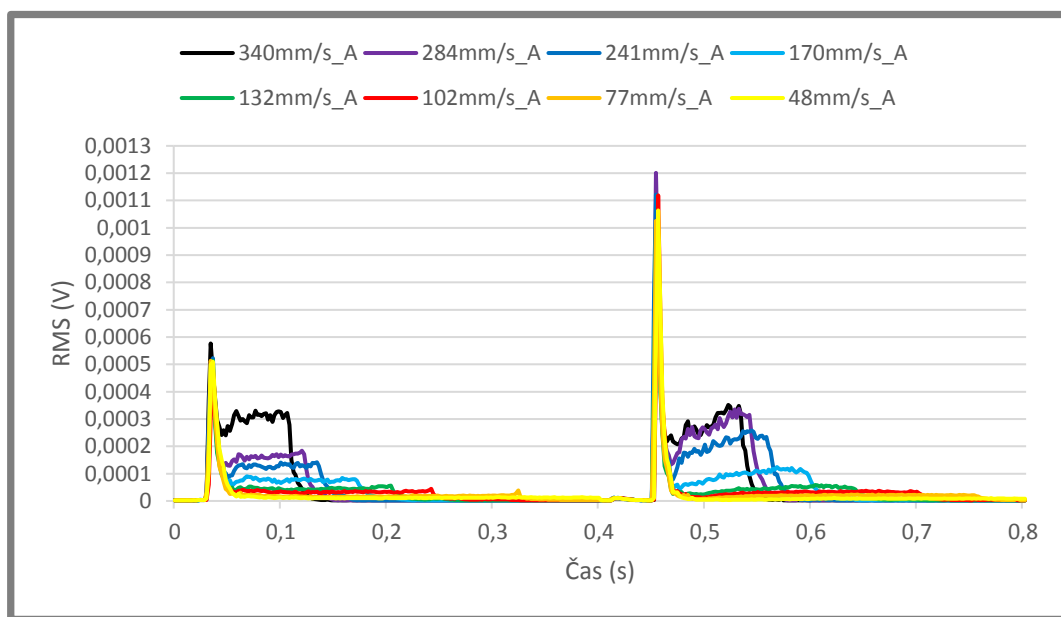


Obr. 5.6 Vliv umístění snímače na podobu signálu

Z výsledků (obr. 5.6) je vidět, že poloha snímače nemá na podobu signálu velký vliv. Jedinou výraznou odlišností je různá maximální hodnota obou špiček, které souvisejí s počátkem proudění stlačeného vzduchu do válce. Platí, že čím blíže ke šroubení snímač leží, tím větší hodnotu zaznamená. Pro další experimenty byly použity pozice 1 a 3, přičemž snímač na předním víku byl připojen k analyzátoru na kanálu A, zatímco snímač na zadním víku byl připojen na kanálu B. Tato měření byla realizována na nepoškozeném válci č. 13.

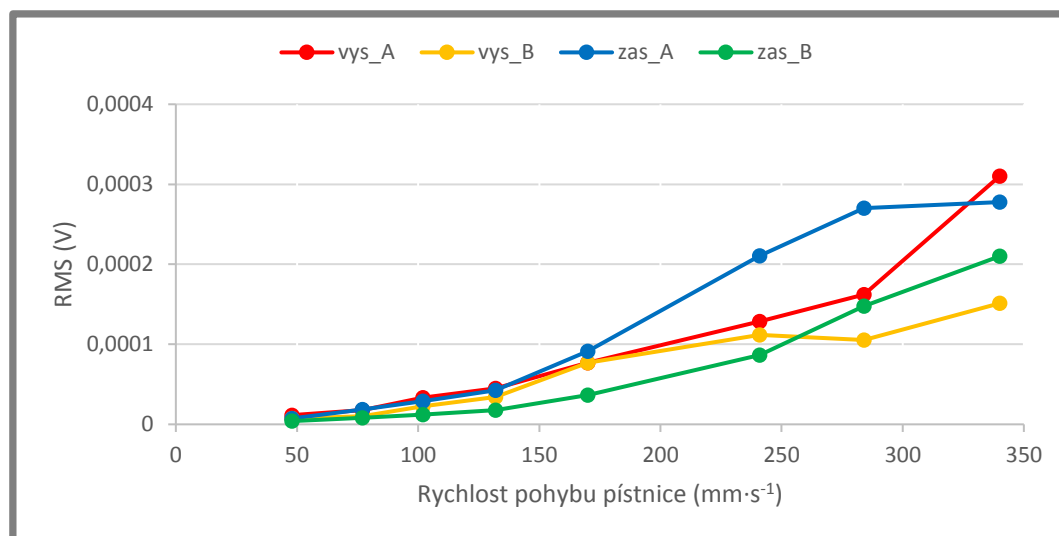
### 5.3.2 Vliv rychlosti pohybu pístnice

Dále byl zkoumán vliv rychlosti pohybu pístnice na podobu signálu. Oběma šroubením byl předřazen jednosměrný škrťící ventil, který reguloval průtok vzduchu odtékajícího z válce. Maximální hodnota rychlosti  $340 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  byla dosažena při zcela otevřeném škrťícím ventilu. Oba škrťící ventily byly vždy v průběhu experimentu nastaveny na stejnou hodnotu regulace. Z výsledků na obr. 5.7 lze vyčíst výrazný vliv rychlosti pohybu pístnice na amplitudu signálu. S rostoucí rychlostí pohybu amplituda signálu výrazně roste. Při nejnižších rychlostech do  $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  téměř nelze podle tvaru signálu rozeznat fáze pohybu pístnice od výdrže v horní nebo dolní úvratí. Zde uvedené výsledky byly zaznamenány na kanálu A, na kanálu B byl ovšem zjištěn stejný trend. Tato měření byla realizována na nepoškozeném válci č. 16.



Obr. 5.7 Vliv rychlosti pohybu pístnice na podobu signálu AE

Na obr. 5.8 je zobrazena závislost průměrné hodnoty parametru RMS při vysouvání a zasouvání (na obou kanálech) na rychlosti pohybu pístnice. S rostoucí rychlostí se tato hodnota obecně exponenciálně zvyšuje, několik hodnot při nejvyšších rychlostech ovšem tomuto trendu neodpovídá. Rozdíl v hodnotách pro rychlosti  $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  a  $350 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  může být až 50násobný. Další experimenty byly prováděny při rychlosti  $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , neboť při této rychlosti již lze zřetelně rozeznat fázi vysouvání a zasouvání od výdrže v horní či dolní úvratí. Zároveň hodnoty, kterých



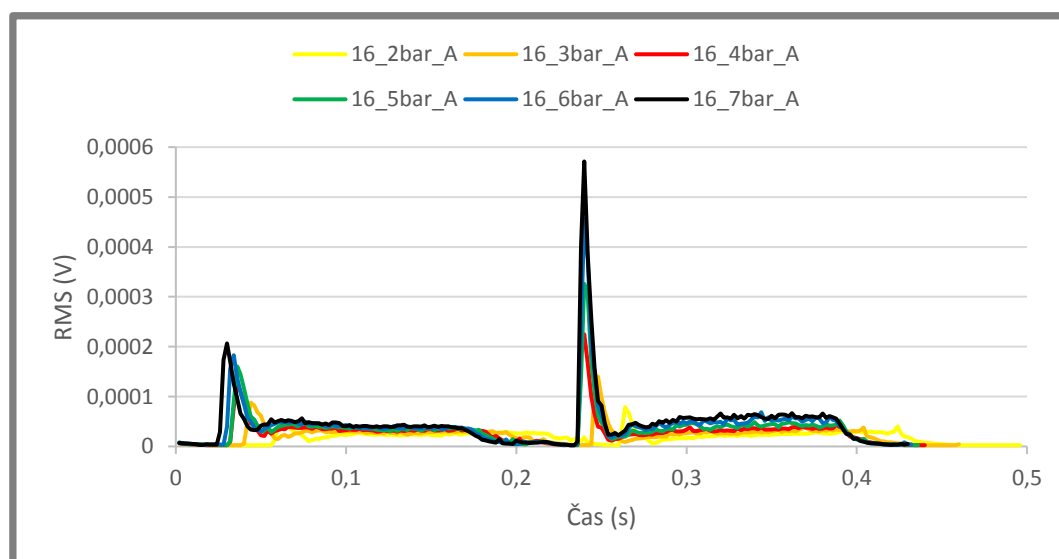
Obr. 5.8 Vliv rychlosti pohybu pístnice na průměrnou hodnotu parametru RMS při vysouvání a zasouvání

parametr RMS, dosahuje, nejsou tak vysoké, aby v nich zanikl projev úniku vzduchu, který nastává u některých uměle vytvořených vad.

### 5.3.3 Vliv tlaku vzduchu

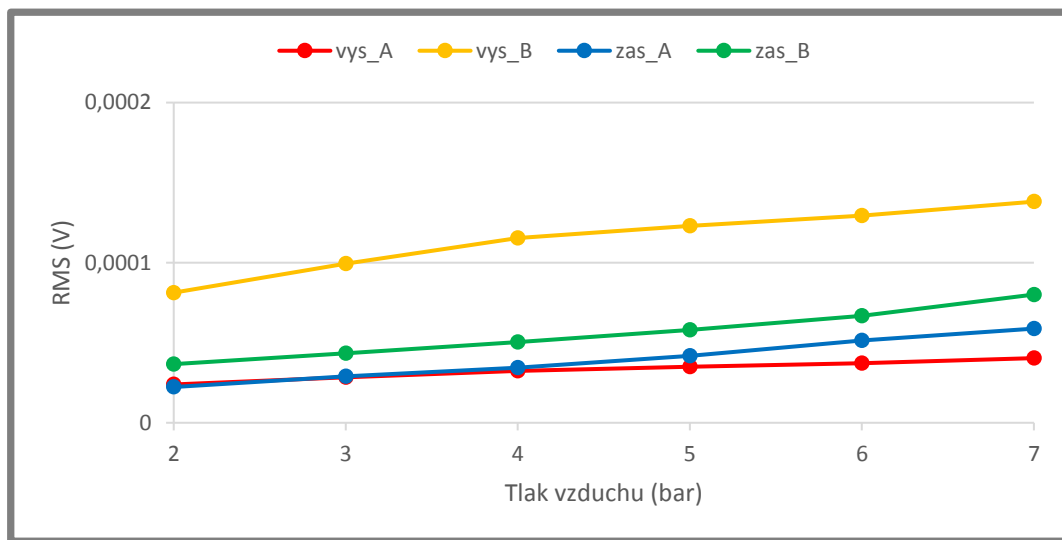
5.3.3

Díky přítomnosti regulačního ventilu na úpravě vzduchu v laboratoři byl zdokumentován také vliv tlaku vzduchu na signál AE. Z výsledků na obr. 5.9 je patrné, že s rostoucím tlakem vzduchu se zvyšuje také amplituda signálu, avšak daleko méně výrazně než v případě rychlosti pohybu pístnice. Při nejnižších tlacích (2-3 bary) se také mírně prodlužuje délka cyklu. Zde uvedené výsledky byly zaznamenány na kanálu A, na kanálu B byl ovšem zjištěn stejný trend. Tato měření byla realizována na nepoškozeném válci č. 16.



Obr. 5.9 Vliv tlaku vzduchu na podobu signál AE

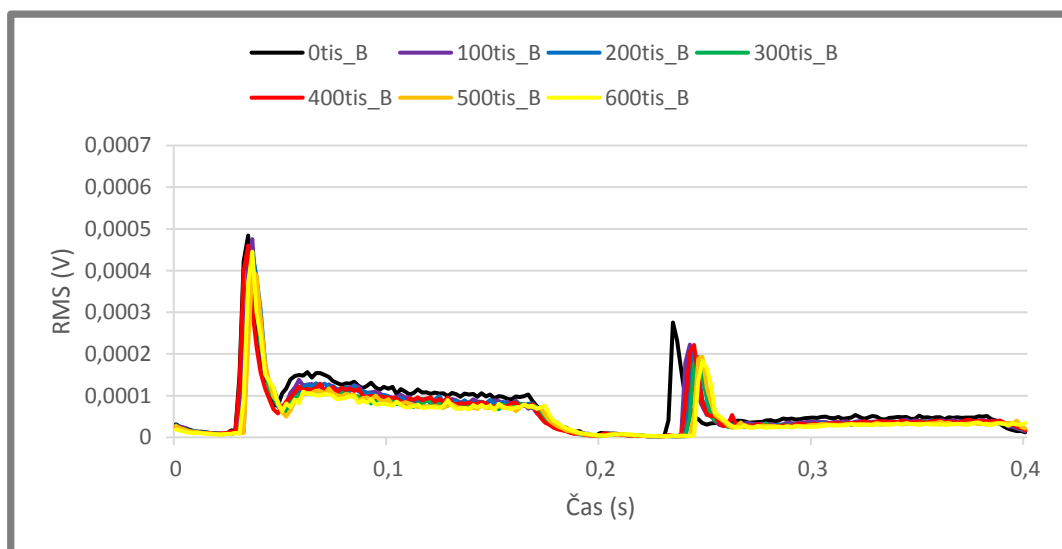
Na obr. 5.10 je zobrazena závislost průměrné hodnoty parametru RMS při vysouvání a zasouvání (na obou kanálech) na tlaku vzduchu. S rostoucím tlakem se tato hodnota lineárně zvyšuje. Rozdíl v hodnotách pro tlaky 2 až 7 barů je průměrně 2násobný. Další experimenty byly prováděny při tlaku vzduchu 6 barů, neboť tento tlak je běžně dostupný v rozvedech tlakového vzduchu a zároveň je dostatečně velký na to, aby zvýraznil v signálu projevy úniku vzduchu, který nastává u některých uměle vytvořených vad.



Obr. 5.10 Vliv tlaku vzduchu na průměrnou hodnotu parametru RMS při vysouvání a zasouvání

### 5.3.4 Vliv počtu absolvovaných cyklů

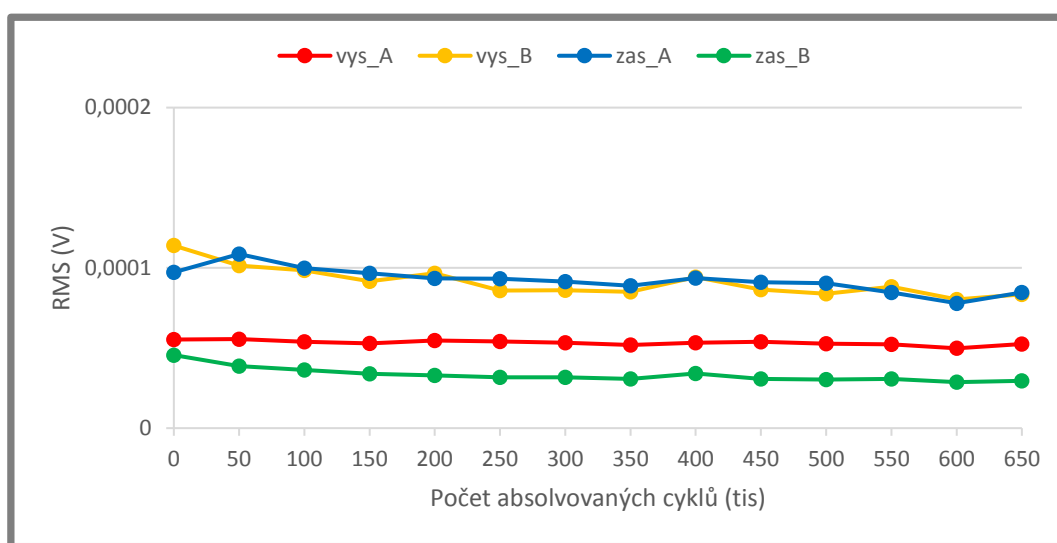
Další otázkou bylo, jak počet absolvovaných cyklů válce ovlivňuje signál AE. Proto byla provedena dlouhodobá zkouška, v jejímž průběhu vždy po určitém počtu cyklů byl změřen signál AE. V průběhu prvních 100 tisíc cyklů bylo měření



Obr. 5.11 Vliv počtu absolvovaných cyklů na signál AE

realizováno po každých 10 tisících cyklech, dále už pouze po každých 50 tisících cyklech. Z výsledků na obr. 5.11 lze vyčíst velmi malý vliv počtu absolvovaných cyklů na signál AE. Zde zobrazené výsledky jsou z kanálu B, kde s rostoucím počtem cyklů velmi mírně klesá amplituda signálu AE. Na kanálu A není tento jev vůbec rozeznatelný. Měření byla realizována na nepoškozeném válci č. 17.

Na obr. 5.12 je zobrazena závislost průměrné hodnoty parametru RMS při vysouvání a zasouvání (na obou kanálech) na počtu absolvovaných cyklů. S rostoucím počtem cyklů se tato hodnota téměř nemění. Rozdíl v hodnotách pro 0 až 650 tisíc cyklů je maximálně 1,5násobný.



Obr. 5.12 Vliv počtu absolvovaných cyklů na průměrnou hodnotu parametru RMS při vysouvání a zasouvání

## 5.4 Ověření opakovatelnosti měření

5.4

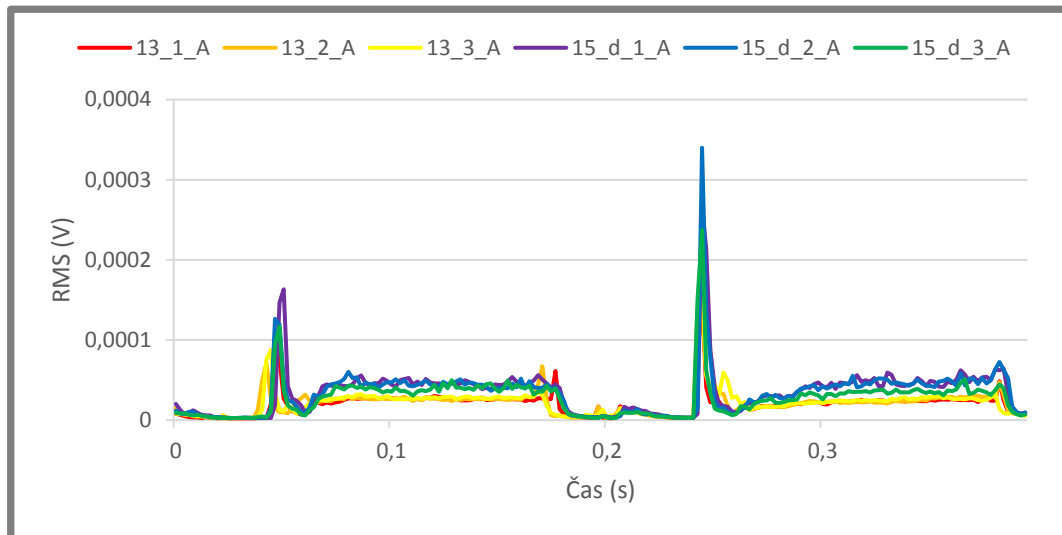
### 5.4.1 Opakovatelnost měření za použití různých typů snímačů

5.4.1

Jedním z předpokladů pro použití metody v praxi je dobrá opakovatelnost při měření na stejném válci. Pro měření na pneumatických válcích se na ÚK používaly snímače typu MIDI od výrobce Dakel, které se na povrch testovaného pohonu připevňují pomocí sekundového lepidla plnicího zároveň funkci vazebního média. Tento způsob upevnění však nezaručuje při opakovaném měření stejnou přítlačnou sílu mezi snímačem a povrchem testovaného válce, což má za následek odlišnou intenzitu signálu AE. Z toho důvodu byl vyroben plastový držák (viz kap. 4.3.1), který umožnil použití snímačů typu MTR od stejného výrobce, u nichž plní funkci vazebního média vazelína.

Na nepoškozeném válci č. 13 byla provedena 3 měření za použití snímačů MIDI (červený, oranžový a žlutý záznam), zatímco na nepoškozeném válci č. 15 byla provedena 3 měření za použití snímačů typu MTR (fialový, modrý a zelený záznam). Ve výsledcích (obr. 5.13) lze vidět shodný průběh signálu za použití obou typů snímačů. Jediným rozdílem je mírně zvýšená intenzita signálů získaných snímači

MTR, což je dáno právě vyšší přítlačnou silou snímače na válec. Uvedené výsledky pochází ze snímačů na kanálu A, na kanálu B byl ovšem zjištěn stejný průběh. Vypočítáním průměrných hodnot parametru RMS při vysouvání a zasouvání pístnice a porovnáním nejvyšší a nejnižší hodnoty pro oba typy snímačů bylo zjištěno, že rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou je maximálně 1,4násobný, což prokazuje dobrou opakovatelnost metody. Další experimenty byly díky lepší manipulovatelnosti a minimalizaci chyb při upevnění držáku na zkoumaný válec realizovány za použití lepených snímačů MIDI.



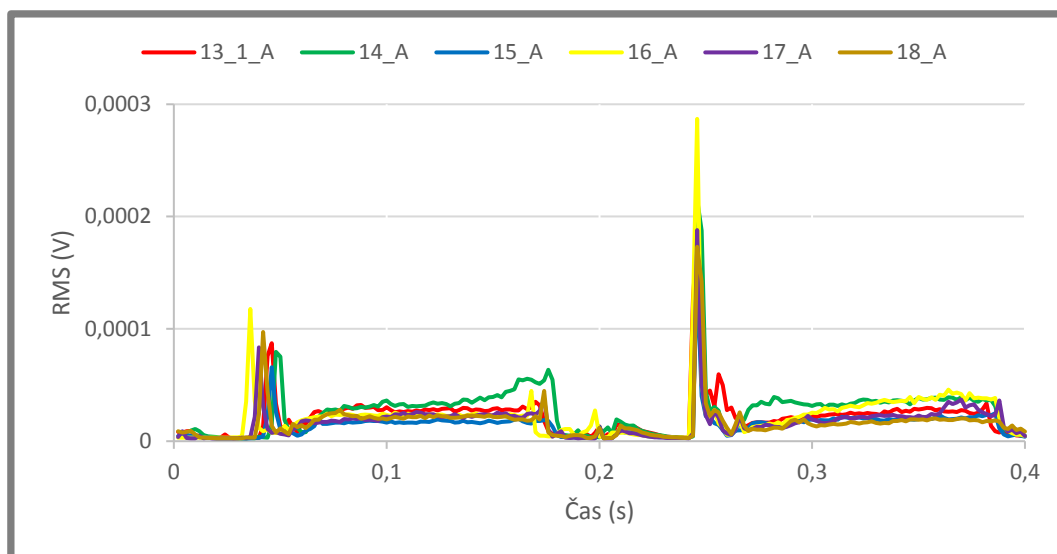
Obr. 5.13 Opakovatelnost měření za použití různých typů snímačů

#### 5.4.2 Opakovatelnost měření u všech nepoškozených válců

Pro identifikaci vad je velmi důležitá shodná podoba signálu ze všech nepoškozených válců. Na obr. 5.14 jsou srovnány signály ze všech nepoškozených válců na kanálu A, na kanálu B jsou ovšem výsledky obdobné. U všech těchto válců je průběh signálu shodný, tzn. že lze jasně odlišit fázi pohybu pístnice od výdrži v horní či dolní úvratí. Vypočítáním průměrných hodnot parametru RMS při vysouvání a zasouvání pístnice a porovnáním nejvyšší a nejnižší hodnoty pro všechny válce bylo zjištěno, že rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou je průměrně 2,3násobný, což prokazuje dostatečnou opakovatelnost metody.

#### 5.5 Signál poškozených válců

U poškozených válců byl nejprve s ohledem na jejich uměle vytvořené vady vytvořen předpoklad, jakým způsobem se přítomná vada projeví v signálu AE. Měřením byl posléze tento předpoklad potvrzen nebo vyvrácen. V této kapitole je uveden průběh signálu pouze pro jeden poškozený válec, signály ostatních válců se z důvodu přehlednosti textu nachází v PŘÍLOZE I.



Obr. 5.14 Opakovatelnost měření na všech nepoškozených válcích

### Válec č.: 1

**Vada:** Poškozený zápich v uložení pístnice

**Důsledek vady:** Únik vzduchu v oblasti uložení pístnice

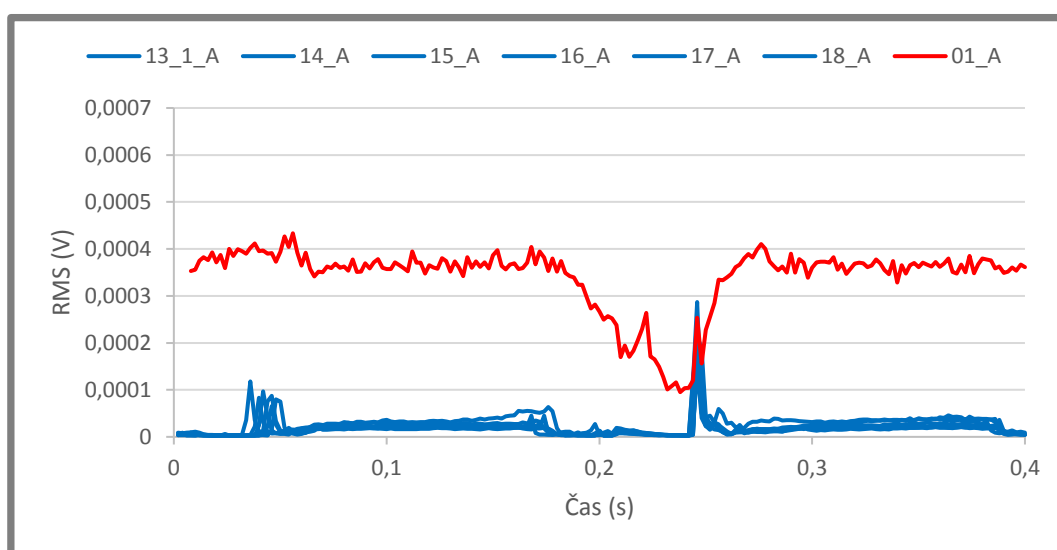
**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu při vysouvání i zasouvání pístu a také při setrvání pístu v DÚ, výraznější projev na kanálu A

**Vada:** Poškozené těleso válce v oblasti těsnění mezi tělesem válce a zadním víkem

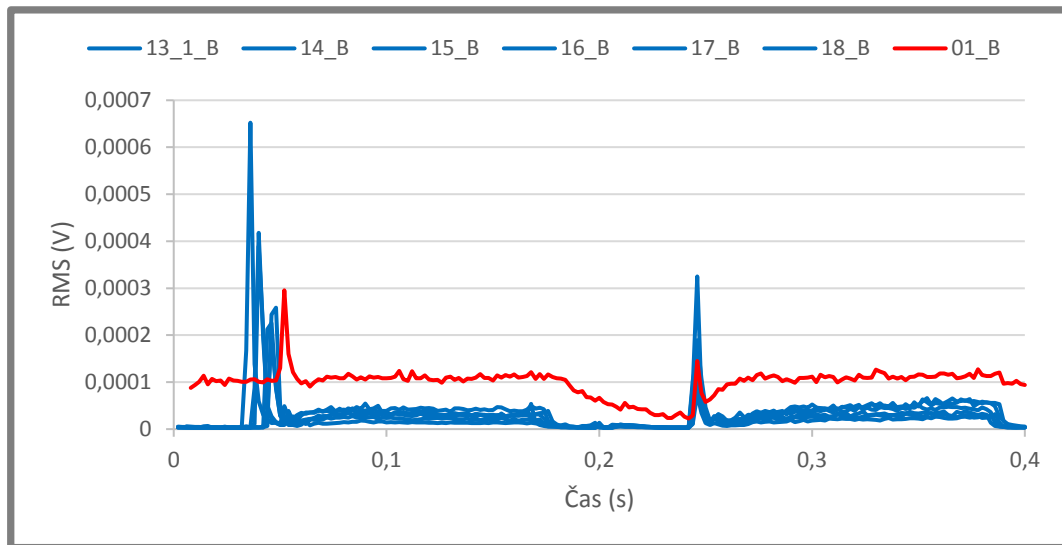
**Důsledek vady:** Únik vzduchu mezi tělesem válce a zadním víkem

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu při vysouvání i zasouvání pístu a také při setrvání pístu v HÚ, výraznější projev na kanálu B

**Posouzení výsledků:** Výsledky (obr. 5.15, 5.16) se shodují s předpokladem projevu uměle vytvořené vady nad pístem. Projev vady je natolik silný, že došlo k jasnému odlišení od nepoškozených válců. K úniku vzduchu pod pístem nedošlo.



Obr. 5.15 Srovnání signálu poškozeného válce č.1 s nepoškozenými válci, kanál A



Obr. 5.16 Srovnání signálu poškozeného válce č.1 s nepoškozenými válci, kanál B

#### Válec č.: 2

**Vada:** Přestřižená manžeta v uložení pístnice

**Důsledek vady:** Únik vzduchu v oblasti uložení pístnice

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu při vysouvání i zasouvání pístu a také při setrvání pístu v DÚ, výraznější projev na kanálu A

**Vada:** Přestřižený o-kroužek v oblasti těsnění mezi tělesem válce a zadním víkem

**Důsledek vady:** Únik vzduchu mezi tělesem válce a zadním víkem

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu při vysouvání i zasouvání pístu a také při setrvání pístu v HÚ, výraznější projev na kanálu B

**Posouzení výsledků:** Výsledky (PŘÍLOHA I) nevykazují žádnou odlišnost od nepoškozených válců. Lze se tedy domnívat, že v důsledku uměle vytvořených vad k žádným únikům vzduchu nedošlo.

#### Válec č.: 3

**Vada:** Poškozený vnitřní břit manžety v oblasti uložení pístnice

**Důsledek vady:** Únik vzduchu v oblasti uložení pístnice

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu při vysouvání i zasouvání pístu a také při setrvání pístu v DÚ, výraznější projev na kanálu A

**Vada:** Poškozený zápch v zadním víku v oblasti těsnění mezi tělesem válce a zadním víkem

**Důsledek vady:** Únik vzduchu mezi tělesem válce a zadním víkem

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu při vysouvání i zasouvání pístu a také při setrvání pístu v HÚ, výraznější projev na kanálu B

**Posouzení výsledků:** Výsledky (PŘÍLOHA I) se shodují s předpokladem projevu uměle vytvořené vady nad pístem. Projev vady je natolik silný, že došlo k jasnému odlišení od nepoškozených válců. K úniku vzduchu pod pístem nedošlo. V porovnání s válcem č. 1 je tento projev slabší.

#### Válec č.: 4

**Vada:** Povolený píst o 1 otáčku

**Důsledek vady:** Vzájemný pohyb dvou částí pístu, únik vzduchu skrz píst



**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Obtížné určit

**Posouzení výsledků:** Ve výsledcích (PŘÍLOHA I) si lze všimnout mírně zvýšené intenzity signálu, zejména na kanálu B, při pohybu pístnice. Změna oproti nepoškozeným válcům je velmi malá, tuto vadu tedy nelze pomocí parametru RMS jednoznačně identifikovat.

**Válec č.: 5**

**Vada:** Přestřižený o-kroužek na pístu

**Důsledek vady:** Únik vzduchu z komory s větším tlakem vzduchu do komory s menším tlakem vzduchu

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu AE při vysouvání i zasouvání pístnice na obou kanálech

**Posouzení výsledků:** Ve výsledcích (PŘÍLOHA I) si lze všimnout lokálně zvýšené hodnoty RMS při pohybu pístu na obou kanálech, avšak jde o tak nevýraznou změnu v porovnání s nepoškozenými válci, že nelze jednoznačně identifikovat tuto vadu.

**Válec č.: 6**

**Vada:** 2 zářezy v manžetě nad pístem

**Důsledek vady:** Únik vzduchu při natlakování komory nad pístem

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu AE při zasouvání pístnice a při výdrži v DÚ na obou kanálech, v závislosti na poloze pístu

**Posouzení výsledků:** Výsledky (PŘÍLOHA I) ukazují zvýšenou intenzitu signálu AE při setrvání pístu v DÚ, což je ve shodě s předpokladem. V nesouladu s ním naopak je skutečnost, že lokální maxima jsou detekována při vysouvání pístnice, nikoliv při zasouvání. Důvodem tohoto jevu by mohla být to, že při výdrži v DÚ se prostor mezi pístem a stěnou válcem naplní vzduchem. Při vysouvání pak stlačený vzduch z tohoto prostoru uniká do komory nad pístem, což zvýší intenzitu signálu. Ve srovnání s nepoškozenými válci jsou tyto změny v signálu rozeznatelné.

**Válec č.: 7**

**Vada:** 2 zářezy v manžetě pod pístem

**Důsledek vady:** Únik vzduchu při natlakování komory pod pístem

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu AE při vysouvání pístnice a při výdrži v HÚ na obou kanálech, v závislosti na poloze pístu

**Posouzení výsledků:** Ve výsledcích (PŘÍLOHA I) je vidět zvýšená intenzita signálu AE při setrvání pístu v HÚ, což odpovídá předpokladům. Stejně jako v případě válce č. 6 je detekována vyšší intenzita signálu při zasouvání, což je přesný opak oproti očekávání. Navíc lze pozorovat mírně zvýšenou aktivitu AE i v DÚ, což také nesouhlasí. Při porovnání s válcem č. 6, na kterém byl vytvořen stejný typ vady, pouze na opačné straně pístu, si lze všimnout silnějších hodnot signálu. Lze se tedy domnívat, že rozsah poškození nebyl stejný. Při porovnání s nepoškozenými válci se jedná o poměrně velké změny v signálu, avšak jejich původ musí být dále objasněn.

**Válec č.: 8**

**Vada:** Přestřižený o-kroužek na šroubení pod pístem

**Důsledek vady:** Únik vzduchu okolo šroubení

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu při vysouvání i zasouvání pístu a také při setrvání pístu v HÚ, výraznější projev na kanálu B

**Vada:** Chybějící o-kroužek na šroubení nad pístem

**Důsledek vady:** Únik vzduchu okolo šroubení

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu při vysouvání i zasouvání pístu a také při setrvání pístu v DÚ, výraznější projev na kanálu A

**Posouzení výsledků:** Výsledky (PŘÍLOHA I) vykazují zvýšenou intenzitu signálu AE během celého pracovního cyklu válce, což odpovídá předpokladům. Při setrvání v HÚ klesá intenzita signálu na kanálu A, neboť v tu chvíli vzduch uniká pouze šroubením pod pístem, od něhož je snímač na kanálu A více vzdálen. Obdobná situace nenastává v případě setrvání pístu v DÚ na kanálu B z důvodu většího úniku přes šroubení nad pístem, při němž větší vzdálenost snímače na kanálu B nehraje takovou roli.

**Válec č.: 9**

**Vada:** Chybějící o-kroužek na šroubení pod pístem

**Důsledek vady:** Únik vzduchu okolo šroubení

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu při vysouvání i zasouvání pístu a také při setrvání pístu v HÚ, výraznější projev na kanálu B

**Vada:** Přestřižený o-kroužek na šroubení nad pístem

**Důsledek vady:** Únik vzduchu okolo šroubení

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu při vysouvání i zasouvání pístu a také při setrvání pístu v DÚ, výraznější projev na kanálu A

**Posouzení výsledků:** Ve výsledcích (PŘÍLOHA I) si lze všimnout zvýšené intenzity signálu AE během celého cyklu, kromě setrvání pístu v DÚ. V tu chvíli totiž vzduch uniká šroubením nad pístem, na kterém je přestřižený o-kroužek, což má za následek pouze malý únik vzduchu. Signál AE je silnější na kanálu B, což je v souladu s očekáváním. Signál má stejný průběh jako v případě válce č.8, ale vyšší intenzitu.

**Válec č.: 10**

**Vada:** Povoleny 4 šrouby na zadním víku o ½ otáčky

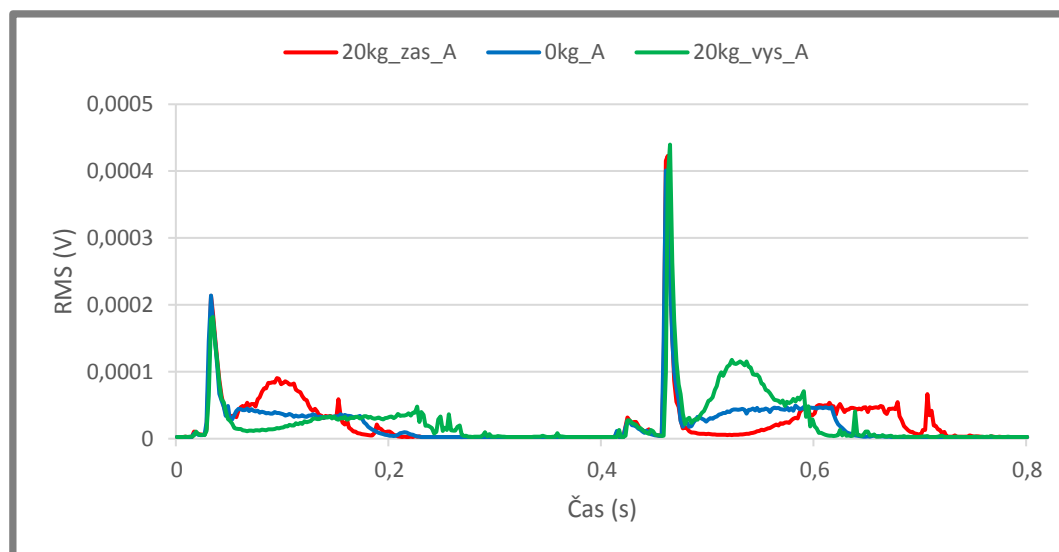
**Důsledek vady:** Únik vzduchu mezi tělesem válce a zadním víkem

**Předpokládaný projev vady v signálu AE:** Zvýšená intenzita signálu při vysouvání i zasouvání pístu a také při setrvání pístu v HÚ, výraznější projev na kanálu B

**Posouzení výsledků:** Výsledky (PŘÍLOHA I) vykazují zvýšenou intenzitu signálu na kanálu A při pohybu pístu, což je v zásadním rozporu s předpoklady. V porovnání s nepoškozenými válci jde o poměrně výrazné změny v signálu, musí ale být objasněny příčiny těchto změn.

## 5.6 Experimenty za účelem zvýraznění vad v signálu AE

Vzhledem k tomu, že při standardním testování nebyly některé poškozené válce rozeznány od nepoškozených, existovaly snahy o zvýraznění projevů jejich vad v signálu AE. Proto byly realizovány experimenty se zatížením pístnice. Pro tyto účely byla vyrobena ocelová deska, která byla přišroubována k měřicí stanici tak, aby jeden její konec přečníval přes okraj stanice. Na tento volný konec desky byl přišroubován testovaný válec s osou pohybu směřující vertikálně. Do vnitřního závitu pístnice byla přes vyrobenou závitovou redukci přišroubována tyč, na kterou bylo zavěšeno závaží o celkové hmotnosti 20 kg. Zatížení bylo postupně aplikováno v obou směrech, tedy při vysouvání i zasouvání pístnice. V prvním případě je z důvodu nižší rychlosti pístnice na počátku vysouvání zachycen signál o nižší amplitudě v porovnání



Obr. 5.17 Vliv zatížení na signál AE

s nezatíženým stavem (obr. 5.17). Celá fáze vysouvání trvá delší dobu. Při zasouvání je naopak pístnice urychlena působícím závažím, což má za následek zvýšení intenzity signálu a zkrácení této fáze. Při aplikování zátěže v opačném směru je její vliv na signál stejný, taktéž mezi kanály není v signálu žádný rozdíl. Při porovnání výsledků ze všech válců bylo zjištěno, že u žádného z nich nedošlo ke zvýraznění jejich vad v signálu.

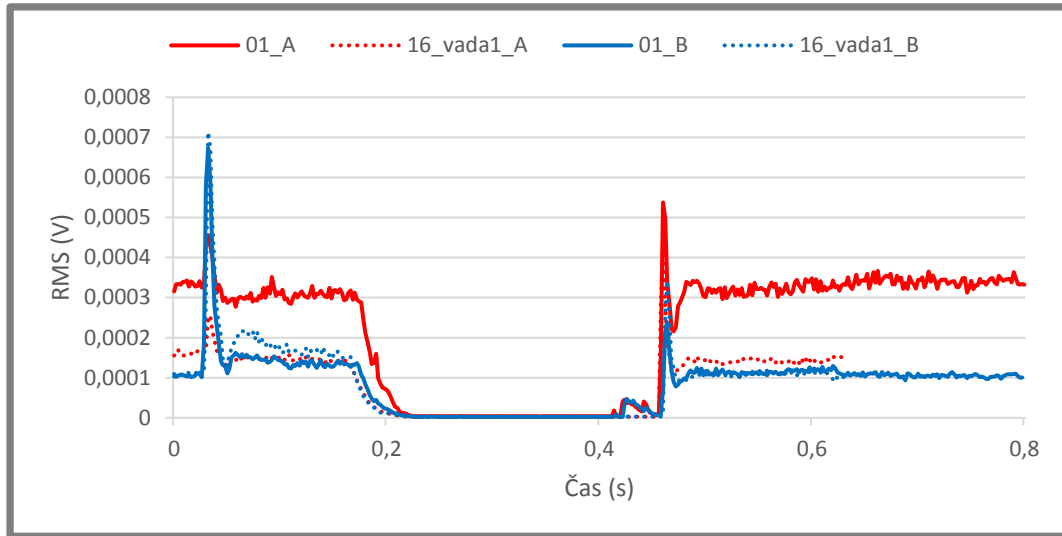
Také byly provedeny experimenty, při kterých byl pohyb pístnice v průběhu vysouvání i zasouvání zastaven dojetím na pevnou překážku. Při těchto experimentech se měly projevit úniky vzduchu skrz píst z jedné komory do druhé, které se při dosavadních experimentech projevit nemohly. Avšak bylo zjištěno, že u žádného z válců k takovému úniku nedošlo.

## 5.7 Výběr zjistitelných vad a ověření jejich projevu v signálu

5.7

V poslední fázi bylo přistoupeno k demontáži válců, prohlédnutí vad a dalším experimentům, které měly vést k objasnění podoby signálu. Válec č. 1 měl poškozený zápich v uložení pístnice a poškozené těleso válce v oblasti těsnění mezi tělesem válce a zadním víkem. V signálu AE se projevila pouze první z uvedených vad. Po demontáži válce bylo zjištěno, že zadní těsnění je mírně poškozené, ale natolik, aby ztratilo svou funkci, zde tedy k žádnému úniku nedošlo. Tuto vadu nelze diagnostikovat metodou AE. Pro ověření projevu první vady byl stejně poškozen nepoškozený válec č. 16 a otestován. Ve výsledcích (obr. 5.18) si lze všimnout velmi podobného průběhu signálu v porovnání s válcem č. 1. Dochází tedy k úniku vzduchu při vysouvání i zasouvání pístnice a také při výdrži pístu v DÚ. Jediný rozdíl spočívá v nižší amplitudě signálu na kanálu A (na kanálu B je shodný tvar i amplituda signálu). Tuto vadu tedy lze spolehlivě diagnostikovat metodou AE.

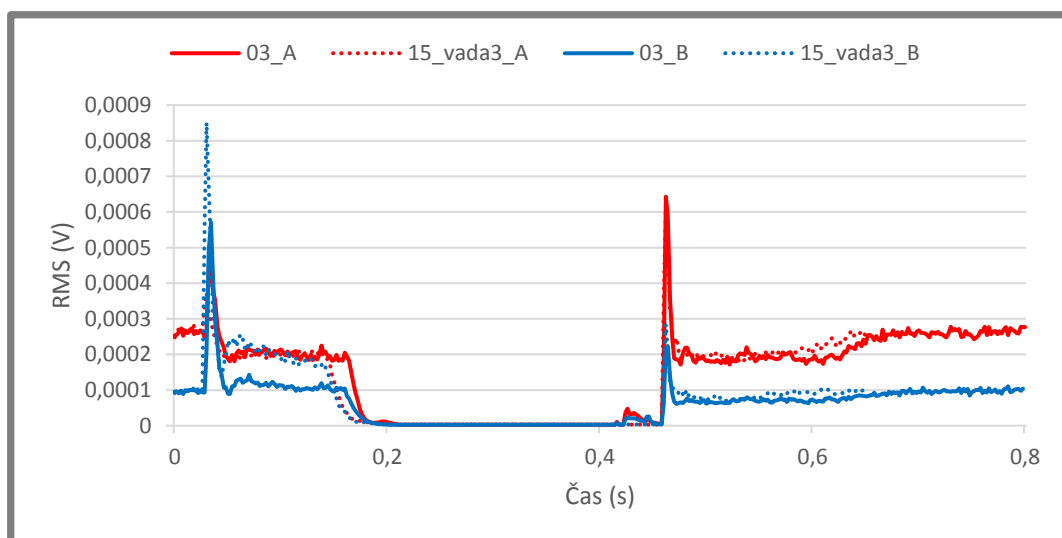
Válec č. 2 měl přestřížený vnitřní břit manžety v oblasti uložení pístnice a přestřížený o-kroužek mezi tělesem válce a zadním víkem. Po demontáži válce bylo



Obr. 5.19 Opakovatelnost projevu vady NP02

zjištěno, že přestřížení těsnění nemá vliv na jejich funkčnost. Tyto vady nelze diagnostikovat metodou AE.

Válec č. 3 měl poškozený vnitřní břit manžety v oblasti uložení pístnice a poškozenou drážku pro o-kroužek v zadním víku. V signálu AE se projevila pouze první z uvedených vad. Po demontáži válce bylo zjištěno, že poškození drážky nemá vliv na zadní těsnění, které zůstává na svém místě a nepoškozené, zde tedy k žádnému úniku nedošlo. Tuto vadu nelze diagnostikovat metodou AE. Pro ověření projevu první vady byl stejně poškozený nepoškozený válec č. 15 a otestován. Ve výsledcích (obr. 5.19) si lze všimnout velmi podobného průběhu signálu v porovnání s válcem č. 3. Dochází tedy k úniku vzduchu při vysouvání i zasouvání pístnice a také při výdrži pístu v DÚ. Jediný rozdíl spočívá ve vyšší amplitudě signálu při vysouvání na kanálu B. Tuto vadu tedy lze spolehlivě diagnostikovat metodou AE.

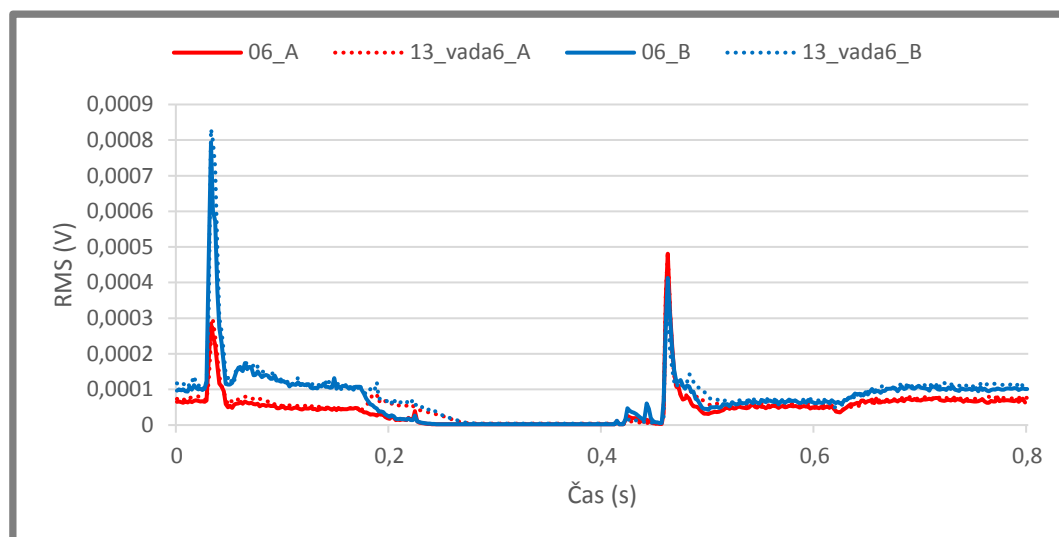


Obr. 5.18 Opakovatelnost projevu vady NP01

Válec č. 4 měl povolený píst o 1 otáčku. Projev této vady v signálu byl také nevýrazný, takže nedošlo k odlišení tohoto válce od nepoškozených válců. Tato vada byla tedy vytvořena také na jednom z nepoškozených válců, ale opět nedošlo k žádnému jejímu projevu v signálu. Tento typ vady tedy nelze diagnostikovat.

Válec č. 5 měl přestřížený o-kroužek mezi písty. V důsledku této vady k žádnému úniku vzduchu nedošlo, neboť prostor mezi písty je dostatečně utěsněn díky utažení matice. Dále také lze předpokládat, že přestřížené těsnění nemá na jeho funkčnost vliv, stejně jako v případě válce č. 2. Tuto vadu tedy nelze diagnostikovat metodou AE.

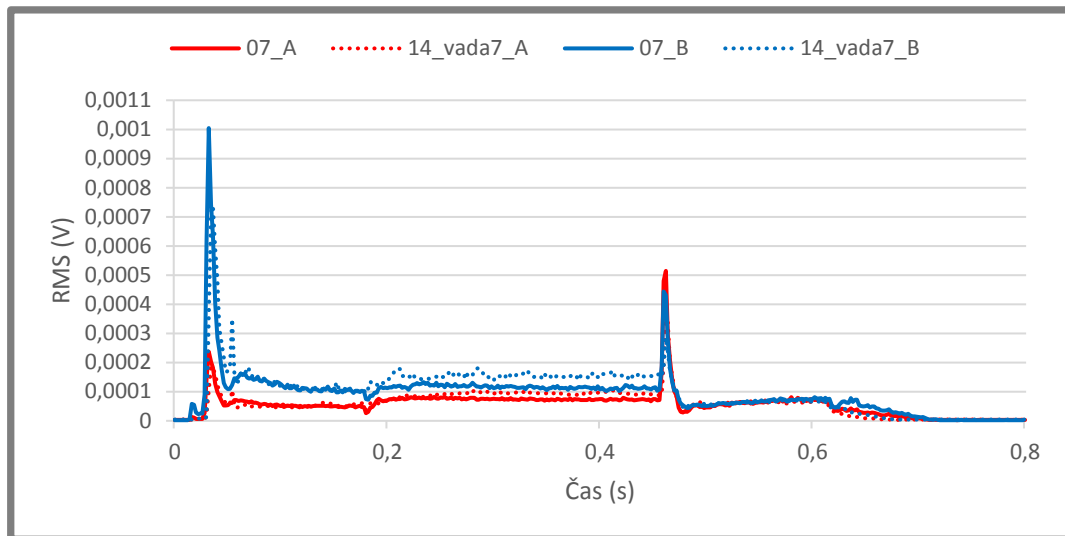
Válec č. 6 měl 2 výřezy v manžetě nad pístem. V důsledku této vady došlo ke změnám v signálu, které jsou jasně odlišitelné od nepoškozených válců. Pro ověření projevu první vady byl stejně poškozen nepoškozený válec č. 13 a otestován. Ve výsledcích (obr. 5.20) si lze všimnout velmi podobného průběhu signálu v porovnání s válcem č. 6. Dochází tedy k úniku vzduchu při výdrži pístu v DÚ. Tuto vadu tedy lze spolehlivě diagnostikovat metodou AE.



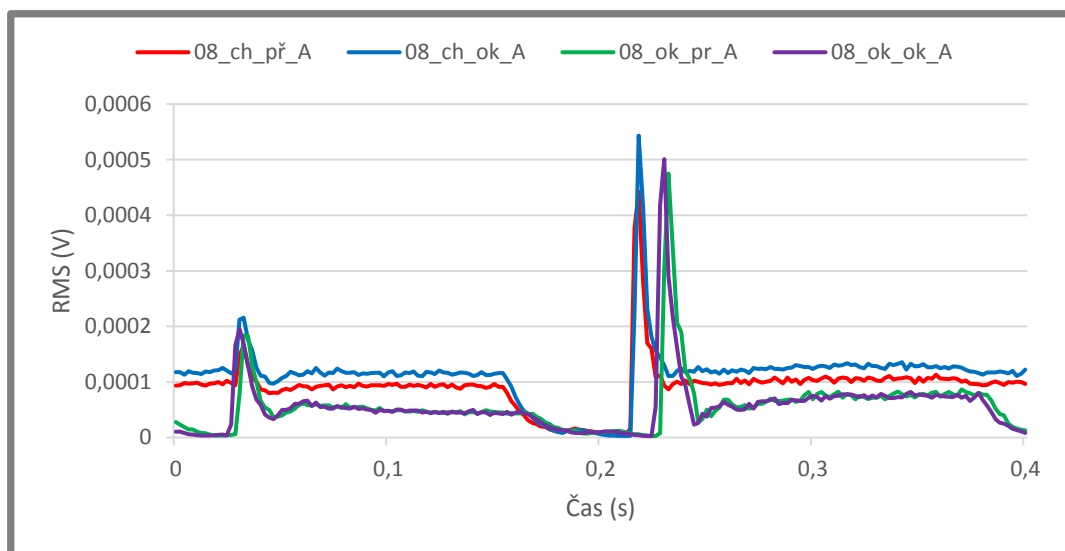
Obr. 5.20 Opakovatelnost projevu vady NP05

Válec č. 7 měl 2 výřezy v manžetě pod pístem. V důsledku této vady došlo ke změnám v signálu, které jsou jasně odlišitelné od nepoškozených válců. Pro ověření projevu první vady byl stejně poškozen nepoškozený válec č. 14 a otestován. Ve výsledcích (obr. 5.21) si lze všimnout velmi podobného průběhu signálu v porovnání s válcem č. 7. Dochází tedy k úniku vzduchu při výdrži pístu v HÚ. Tuto vadu tedy lze spolehlivě diagnostikovat metodou AE.

Válce č. 8 a 9 měly závady na šroubení. Pro bližší pochopení jejich vlivu na signál AE byly postupně obě vyměněny za nepoškozené. Při sledování výsledků (obr. 5.22) bylo zjištěno, že k úniku vzduchu dochází pouze v případě chybějícího těsnění. Přestřížené těsnění nemá žádný vliv na signál AE. Tuto vadu tedy nelze diagnostikovat pomocí AE, zatímco chybějící o-kroužek na šroubení ano.



Obr. 5.21 Opakovatelnost projevu vady PP01



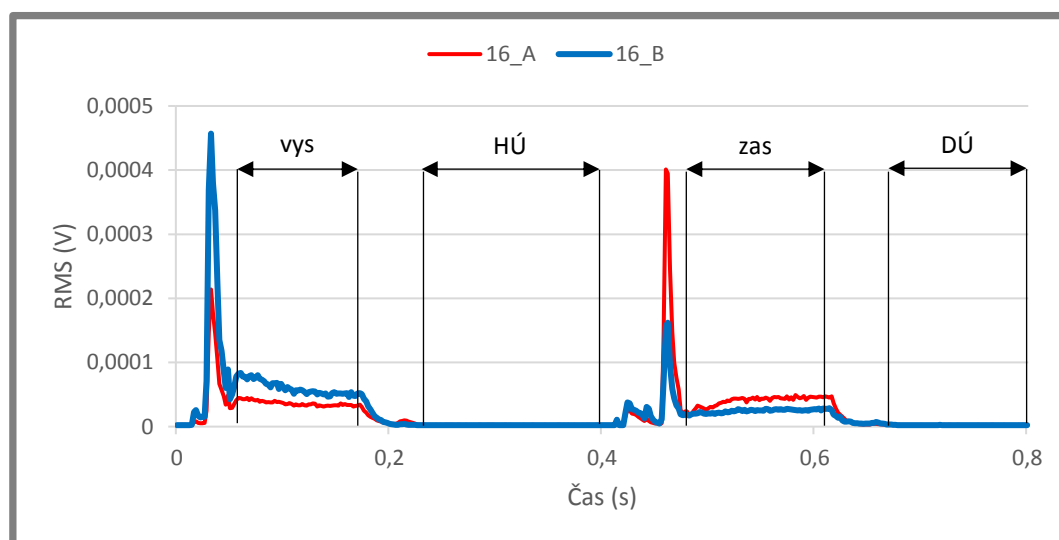
Obr. 5.22 Experimenty s poškozeným šroubením, válec č. 8

Válec č. 10 měl povolené šrouby na zadním víku o  $\frac{1}{2}$  otáčky. Projev této vady v signálu byl nevýrazný, neboť nedošlo k oddělení tělesa válce od zadního víka. Při povolení šroubů o celou otáčku dochází k velkému úniku, který je patrný i bez použití snímačů AE. K tomu dochází v důsledku plastické deformace o-kroužku, který vyskočí z drážky v zadním víku. Tím ztratí svou funkci a dochází k velkému úniku mezi tělesem válce a zadním víkem. K opravení této vady nestačí pouze utáhnout šrouby na zadním víku, ale je zapotřebí odšroubovat zadní víko a zasunout o-kroužek zpět do drážky. Po opětovném smontování a utáhnutí šroubů je signál válce nerozlišitelný od nepoškozených. Stejný případ nastává při povolení šroubů na předním víku. Tento typ vady tedy nelze diagnostikovat předtím, než dojde k velkému úniku.

## 5.8 Návrh kritérií pro jednoznačnou lokalizaci a identifikaci vad

Při návrhu metodiky pro jednoznačnou lokalizaci a identifikaci vad jsem vycházel z výsledků výše popsaných experimentů. K vyhodnocování byl vybrán parametr RMS, který se vykazoval nejlepší opakovatelností měření a zároveň největší citlivostí na projevy uměle vytvořených vad. Snímače AE musí být připevněny na testovaný válec podle kap. 5.3.1, tedy snímač na kanálu A je připevněn na boční straně předního víka v jeho horní polovině (nad T-drážkami blízko šroubení) a snímač na kanálu B se nachází ve stejné pozici na zadním víku. Použitý typ snímače není pro výsledky měření podstatný. Rychlost pohybu pístnice výrazně ovlivňuje podobu signálu zejména nepoškozených válců, proto je nutné měření provádět při rychlosti vysouvání i zasouvání pístnice  $150 \pm 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Prodleva mezi začátky vysouvání a zasouvání pístnice by měla být alespoň 0,4 s, aby došlo k ustálení hodnoty parametru RMS při výdrži v dolní nebo horní úvrati. K vyhodnocení lze použít jakýkoliv jiný než první pracovní cyklus válce při měření, neboť ten se vykazuje mírně odlišnou podobou signálu od dalších cyklů. Tlak vzduchu výrazně ovlivňuje podobu signálu zejména poškozených válců, u nichž dochází k úniku vzduchu. Proto je důležité provádět experimenty při tlaku 6 bar, který je běžně dostupný v rozvodech stlačeného vzduchu. Počet absolvovaných cyklů válce pro výsledky měření není důležitý. Experimenty se zatížením pístnice a dojetím na překážku v polovině zdvihu válce nevedly ke zvýraznění projevu vad v signálu AE, proto je doporučeno provádět experimenty bez zatížení a v plném pracovním zdvihu válců.

Válce jsou posuzovány na základě průměrné hodnoty parametru RMS ve fázích vysouvání a zasouvání pístnice a výdrži v dolní a horní úvrati. Úsek signálu vyhodnocovaný při vysouvání a zasouvání začíná po ustálení hodnoty RMS po předchozím výrazném maximu v signálu, jehož zdrojem je počátek proudění vzduchu do válce, a končí před dojetím pístu do koncové polohy, které je doprovázeno výrazným poklesem signálu. Úsek signálu vyhodnocovaný při výdrži pístu v dolní a horní úvrati začíná po ustálení hodnoty signálu po předchozím pohybu a končí před nárůstem hodnoty parametru RMS způsobené počátkem proudění vzduchu do válce.



Obr. 5.23 Fáze pro vyhodnocení během pracovního cyklu nepoškozeného válce



Pokud v těchto fázích pracovního cyklu válce nedochází k úniku vzduchu, je hodnota parametru RMS vždy stejná a není ovlivněna žádným z faktorů zmíněných výše (tlak vzduchu, rychlost pístnice, počet absolvovaných cyklů, poškození válce). Tato hodnota činí 2-5  $\mu\text{V}$ .

První skupinu tvoří válce nepoškozené společně s válci poškozenými vadami, které jsou v předchozí kapitole označeny jako neodhalitelné. Signál charakteristický pro tuto skupinu válců je zobrazen na obr. 5.23. **Pro tuto skupinu válců platí, že:** Průměrná hodnota parametru RMS na obou kanálech při zasouvání i vysouvání pístnice je nejméně 2 $\times$  vyšší než průměrná hodnota parametru RMS při výdrži v dolní i horní úvrati.

Druhou skupinu tvoří válce poškozené vadami, které jsou v předchozí kapitole označeny jako odhalitelné a nacházejí se pod pístem (válce č. 7 a 9). Pro tyto válce je společná zvýšená aktivita AE při výdrži v HÚ, neboť při ní dochází k úniku vzduchu. K jednoznačnému určení, zda-li je válec poškozen vadou PP01 (2 výřezy na manžetě pod pístem) nebo PP07 (chybějící o-kroužek na šroubení pod pístem), je ale zapotřebí dalšího kritéria. V tomto případě bylo využito skutečnosti, že při zasouvání pístnice v případě vady PP01 nedochází k úniku vzduchu. Jediným zdrojem signálu v této fázi cyklu je tedy tření vyvolané pohybem pístnice, které vyvolá na obou kanálech velmi podobnou aktivitu AE. Zatímco v případě vady PP07 dochází k úniku vzduchu zadním šroubením, který má za následek zvýšenou aktivitu signálu na kanálu B.

**Pro válec poškozený vadou PP01 (2 výřezy na manžetě pod pístem) platí, že:** Průměrná hodnota parametru RMS při setrvání pístu v DÚ je nejméně 2 $\times$  menší než průměrná hodnota parametru RMS při setrvání pístu v HÚ i při vysouvání i zasouvání pístnice (na obou kanálech). A zároveň: Průměrná hodnota parametru RMS na kanálu B při zasouvání pístnice není více než 1,5 $\times$  vyšší než na kanálu A.

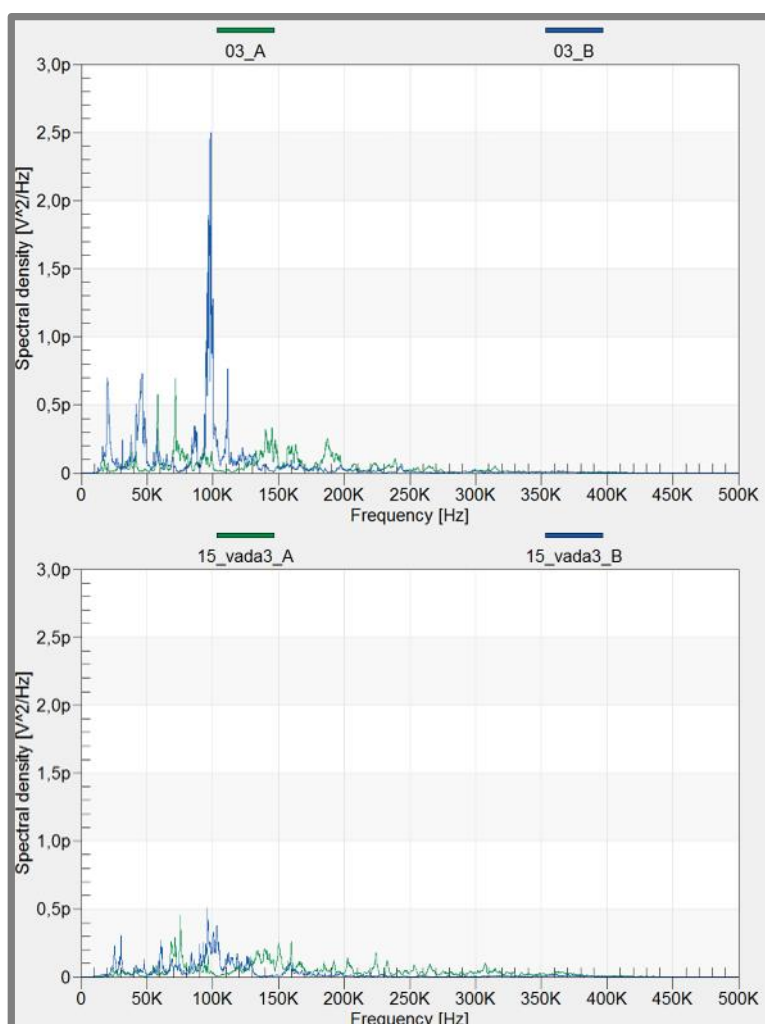
**Pro válec poškozený vadou PP07 (chybějící o-kroužek na šroubení pod pístem) platí, že:** Průměrná hodnota parametru RMS při setrvání pístu v DÚ je nejméně 2 $\times$  menší než průměrná hodnota parametru RMS při setrvání pístu v HÚ i při vysouvání i zasouvání pístnice (na obou kanálech). A zároveň: Průměrná hodnota parametru RMS na kanálu B při zasouvání pístnice je více než 1,5 $\times$  vyšší než na kanálu A.

Třetí a poslední skupinu tvoří válce poškozené vadami, které jsou v předchozí kapitole označeny jako odhalitelné a nacházejí se nad pístem (válce č. 1, 3, 6 a 8). Pro tyto válce je společná zvýšená aktivita AE při výdrži v DÚ, neboť při ní dochází k úniku vzduchu. K jednoznačnému určení, o jakou z vad se jedná, je opět zapotřebí dalšího kritéria. Pro identifikaci vady NP05 (2 výřezy na manžetě nad pístem) bylo využito podobné skutečnosti jako v případě stejné vady pod pístem. Při výdrži v DÚ dochází v případě této vady k úniku vzduchu skrz píst, který se nachází v blízkosti snímače na kanálu B, na němž je tedy projev úniku výraznější. U ostatních válců v této skupině dochází k únikům skrz uložení pístnice nebo skrz šroubení na předním víku, které jsou naopak výraznější na kanálu A.



**Pro válec poškozený vadou NP05 (2 výřezy na manžetě nad pístem) platí, že:** Průměrná hodnota parametru RMS při setrvání pístu v HÚ je nejméně 2× menší než průměrná hodnota parametru RMS při setrvání pístu v DÚ i při vysouvání i zasouvání pístnice (na obou kanálech). A zároveň: Průměrná hodnota parametru RMS na kanálu B při setrvání pístu v DÚ je vyšší než na kanálu A.

Zbylé 3 válce (a jejich vady) v této skupině se pomocí parametru RMS nepodařilo od sebe rozlišit, neboť v jejich případě dochází k úniku vzduchu na velmi podobném místě a ve stejných fázích pracovního cyklu válce. Dále tedy byla prověřena možnost, zda-li vady lze od sebe rozeznat pomocí frekvenčního spektra. Na obr. 5.24 je zobrazeno frekvenční spektrum válce č. 3 a válce č. 15 poškozeného stejně jako válec č. 3. Podoba frekvenčního spektra je pro tyto 2 válce naprosto odlišná, což platí i o ostatních dvojicích válců v této skupině. Na základě frekvenčního spektra tedy také nelze zmíněné 3 válce a jejich vady od sebe rozeznat. Alespoň ale lze lokalizovat oblast, kterou vzduch z válců uniká.



Obr. 5.24 Frekvenční spektrum válce č. 3 (nahore) a válce č. 15 poškozeného stejně jako válec č. 3 (dole)

**Pro válec poškozený vadou NP02 (poškozený zápich pro těsnění v oblasti těsnění pístnice) nebo NP01 (poškozený vnitřní břit manžety v oblasti těsnění pístnice) nebo NP09 (chybějící o-kroužek na šroubení nad pístem) platí, že: Průměrná hodnota parametru RMS při setrvání pístu v HÚ je nejméně 2× menší než průměrná hodnota parametru RMS při setrvání pístu v DÚ i při vysouvání i zasouvání pístnice (na obou kanálech). A zároveň: Průměrná hodnota parametru RMS na kanálu B při setrvání pístu v DÚ je nižší než na kanálu A.**

## 6 DISKUZE

Jednou z příčin selhávání pneumatických válců v provozu je jejich nekvalitní výroba nebo montáž ve výrobním závodě. Současné diagnostické metody bohužel neumožňují spolehlivé odhalení zmetkových kusů v rámci výstupní kontroly. Implementací metody akustické emise bude umožněno přímo identifikovat nebo alespoň lokalizovat typ poškození a zmetkový kus opravit. Menší procento zmetkových kusů posílí důvěru zákazníků v dodavatele a taktéž zabrání nákladným odstávkám strojů způsobeným nutnou výměnou těchto součástí. V neposlední řadě bude také posílena bezpečnost strojů využívajících pneumatické pohony.

Výrobce pneumatických pohonů, společnost Poličské strojírný, věnuje velké úsilí zvyšování kvality produkce, a proto připravila projekt s názvem „Nový systém bezdemontážní diagnostiky pneumatických a hydraulických komponent“, který je financován Technologickou agenturou ČR. Součástí tohoto projektu je i tato diplomová práce, která se zabývá konkrétně rozšířením již schválené a certifikované metodiky identifikace typu poškození pneumatických pohonů metodou akustické emise o další typ válců. K testování byly vybrány hlavním řešitelem projektu, společností Poličské strojírný a.s., pneumatické pohony typu PB z její vlastní produkce. Výrobce bylo dodáno 16 těchto válců, z nichž 6 bylo nepoškozeno a 10 bylo uměle poškozeno nejčastějšími vadami vzniklými nesprávnou výrobou či montáží jejich komponent. K testování byla po drobných úpravách využita měřicí stanice vyrobena v rámci jiné diplomové práce a součástí měřicího řetězce dodal spoluřešitel projektu, společnost Dakel.

Z rešeršní části práce vyplynulo, že nejčastěji používanými parametry AE jsou efektivní hodnota signálu (RMS), počet překmitů přes prahové úrovně a frekvenční spektrum signálu. Původní idea byla taková, že k lokalizaci vad v pohonu by mohl sloužit parametr RMS nebo počet překmitů přes definované prahové úrovně, které lze jednoduše vykreslit v závislosti na čase a poloze pístu a tím získat informaci o tom, v jaké fázi pracovního cyklu dochází k úniku vzduchu. Frekvenční spektrum signálu by bylo využito k identifikaci vad, stejně jako je tomu v pracích [21, 24]. Ukázalo se ale, že frekvenční spektrum signálu dvou stejně poškozených válců se velmi liší, což jej dělá nepoužitelným pro tuto aplikaci. Ke stejnému závěru došli i autoři zabývající se válci PS [27, 28]. Ze zbývajících dvou parametrů byl vybrán parametr RMS, který se vykazoval podobnou citlivostí na projev vad v signálu jako počet překmitů přes prahové úrovně, ale měl lepší opakovatelnost a jeho vyhodnocování je jednodušší, neboť vede k menšímu objemu naměřených dat.

První experimenty na nepoškozených válcích sloužily k popisu signálu v průběhu pracovního cyklu a identifikaci jeho zdrojů. Na začátku pracovního cyklu, ještě před uvedením pístu do pohybu, je detekováno výrazné maximum v signálu AE. Tato špička reflektuje počátek proudění stlačeného vzduchu do komory pod pístem. Poté signál klesá a v průběhu vysouvání pístnice je konstantní. Zdrojem signálu v této fázi je podle [26] tření mezi pístem a vnitřní stěnou válce a také proudění vzduchu ve válci. Dojezd do horní úvrati není navzdory očekávání [29, 33] ukončen dalším maximem v signálu. Po dojetí do horní úvrati signál klesá téměř na nulu a na této úrovni zůstává až do počátku fáze zasouvání pístnice, která má naprosto stejný průběh jako popsaná

fáze vysouvání. Takový průběh signálu je naprosto odlišný od válců typu PS, u nichž je signál detekován především těsně před dojetím pístu do konečných poloh [29].

Dále bylo nutné definovat podmínky, za kterých byly pozdější experimenty prováděny. Poloha snímačů AE na válcích PB nemá na podobu signálu vliv, což je v rozporu s výzkumem na válcích PS [27]. Tento fakt by mohl být zapříčiněn menšími rozměry válců PB. Snímače tedy byly umístěny z boční strany předního a zadního víka válce, aby byly co nejbližší místům, ve kterých dochází u poškozených válců k únikům vzduchu. Amplituda signálu při vysouvání i zasouvání pístu nepoškozených válců s rostoucí rychlostí jeho pohybu exponenciálně roste, což je ve shodě s autory [22], kteří totéž dokázali v případě zvyšujícího se průtoku vzduchu kulovým ventilem. Rozdíl mezi rychlostmi  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $340 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  je až 50násobný. Pro vypracování metodiky byla zvolena rychlost  $150 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , při níž již lze zřetelně rozlišit fáze vysouvání a zasouvání od výdrže v úvratích a zároveň signál nedosahuje takových hodnot, aby v něm zanikly projevy úniků, ke kterým dochází v případě některých poškozených válců.

Tlak vzduchu nemá na signál nepoškozených válců velký vliv, což je v rozporu s prací [22], kde autoři sledovali zvýšenou aktivitu signálu při zvyšování tlaku vzduchu proudícího kulovým ventilem. Výrazný vliv ale má v případě, kdy dochází k únikům vzduchu, tam amplituda signálu s rostoucím tlakem výrazně roste a tím pádem projev úniku v signálu se stává výraznějším. Proto byl pro metodiku zvolen tlak 6 bar, který je dostatečně velký pro detekci vad a zároveň je nejběžnější pro provoz pneumatických pohonů. Vliv počtu absolvovaných cyklů válce na podobu signálu je zanedbatelný, což bude důležité pro zjišťování stavu pneumatických pohonů v provozu, které souvisí s dalším pokračováním projektu a je nad rámec této práce. Nebyl tedy potvrzen předpoklad, že zhruba po 50 tisících cyklech dochází k záběhu válce a výraznému poklesu aktivity AE [28, 33].

Za účelem zlepšení opakovatelnosti měření byl vyroben držák snímačů, který umožnil použití snímačů typu MTR, u nichž zajišťuje kvalitní přenos signálu mezi povrchem válce a snímačem AE vrstva vazelíny. V porovnání se snímači MIDI, u kterých slouží k upevnění a zároveň přenosu signálu sekundové lepidlo, ale nedošlo ke zlepšení opakovatelnosti, na rozdíl od práce [33]. U obou typů snímačů ale byla opakovatelnost dostatečná. Signál všech nepoškozených válců měl shodný průběh, což je základní předpoklad pro použití metody v praxi.

Při testování poškozených válců došlo pomocí parametru RMS u 6 z 10 válců k jasnému odlišení od nepoškozených. Průběh signálu u těchto 6 válců odpovídal očekávání, která byla vytvořena na základě uměle vytvořených vad na těchto pohonech. Ostatní válce, u kterých se vady v signálu neprojeví, byly podrobeny zkouškám se zatížením pístnice, které měly projev vad v signálu zvýraznit, k čemuž ovšem, na rozdíl od válců typu PS [33], nedošlo. Aby se mohly projevit úniky vzduchu z jedné komory do druhé okolo pístu, byly provedeny experimenty s dojetím pístnice na překážku uprostřed pracovního zdvihu. Inspirací pro provedení těchto experimentů byla práce [26]. Ani v tomto případě však k rozeznání dalších vad v signálu nedošlo.

Pro ověření projevu detekovatelných vad v signálu AE byly tyto vady vytvořeny na nepoškozených válcích a znovu otestovány. Ověření dopadlo velmi dobře, neboť takto vytvořené vady měly ve všech případech stejný projev v signálu jako vady původní. Jediným rozdílem byla mírně odlišná amplituda signálu, která byla daná odlišným rozsahem poškození.

Samotná metodika pro jednoznačnou lokalizaci a identifikaci poškození pneumatických pohonů je založena na porovnávání průměrných hodnot parametru RMS ve fázích vysouvání pístu, výdrž v horní úvratí, zasouvání pístu a výdrž v dolní úvratí. Maxima signálu související s počátkem proudění vzduchu do válce není vhodné vyhodnocovat, neboť jejich amplituda je značně proměnlivá. Na základě poměru průměrných hodnot parametru RMS v jednotlivých fázích pracovního cyklu lze určit, ve kterých fázích dochází k úniku vzduchu. Pokud dochází v případě více vad k úniku ve stejných fázích cyklu, ale liší se výrazně místo úniku, lze je rozlišit pomocí porovnání hodnot mezi oběma snímači, neboť vyšší intenzitu signálu zaznamená snímač, který je místu úniku blíže. Pokud se shoduje i místo úniku, nelze při současném stavu poznání vady od sebe rozlišit, lokalizovat je však ano. Na obr. 6.1 je souhrn všech uměle vytvořených vad výrobcem, z nichž 9 se v signálu AE dostatečně neprojevovalo (červeně), 3 vady se povedlo lokalizovat (žlutě) a 3 vady lze jednoznačně identifikovat (zeleně).

| č.válce | popis vady  |
|---------|---|
| 1       | poškozený zápich pro manžetu těsnění pístnice         |
|         | poškozené těleso válce v oblasti těsnění zadního víka |
| 2       | přestřížená manžeta těsnění pístnice                  |
|         | přestřížený o-kroužek těsnění zadního víka            |
| 3       | poškozený vnitřní břit manžety těsnění pístnice       |
|         | poškozený zápich v zadním víku                        |
| 4       | povolený píst o 1 otáčku                              |
| 5       | přestřížený o-kroužek mezi písty                      |
| 6       | 2 výřezy na manžetě NP                                |
| 7       | 2 výřezy na manžetě PP                                |
| 8       | chybějící o-kroužek na šroubení NP                    |
|         | přestřížený o-kroužek na šroubení PP                  |
| 9       | přestřížený o-kroužek na šroubení NP                  |
|         | chybějící o-kroužek na šroubení PP                    |
| 10      | povolání 4 šroubů na víku o 1/2 otáčky PP             |

Obr. 6.1 Souhrn identifikovatelných, lokalizovatelných a nedetekovatelných vad

## 7 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce spadající do projektu „Nový systém bezdemontážní diagnostiky pneumatických a hydraulických komponent“ financovaného Technologickou agenturou ČR bylo navrhnout metodiku pro jednoznačnou lokalizaci a identifikaci poškození pneumatických pohonů metodou akustické emise. Hlavním řešitelem projektu, společností Poličské strojírny a.s., byl vybrán typ válců i nejčastější vady vzniklé v procesu výroby a montáže ve výrobním závodě. Měřicí aparatura byla dodána spoluřešitelem projektu, společností Dakel.

V rešeršní části práce byl, vzhledem k nedostatku prací zabývajících se měřením signálu AE na pneumatických pohonech, věnován prostor současným metodám určení životnosti pneumatických pohonů, jiným diagnostickým metodám schopným zjistit aktuální stav pneumatických válců a podobným aplikacím AE, jako jsou například úniky tekutin z potrubí nebo identifikace vad zpětných ventilů. Část rešerše se také zabývala dočasným řešením projektu na ÚK, který probíhal na jiném typu válců.

V experimentální části práce byla nejprve popsána podoba signálu v průběhu pracovního cyklu pneumatického válce zkoumaného typu a určeny zdroje tohoto signálu. Na základě opakovatelnosti a citlivosti na projevy uměle vytvořených vad v signálu byl poté vybrán vhodný parametr AE k vyhodnocení. Dále byly zkoumány vlivy ostatních faktorů na signál AE (poloha snímačů AE na válci, rychlost pohybu pístnice a tlak vzduchu) a pro další experimenty byly nastaveny tak, aby umožňovaly co nejvýraznější projevy vad v signálu. Dlouhodobou zkouškou bylo zdokumentován vliv počtu absolvovaných cyklů na podobu signálu. Studován byl také vliv typu snímače, vazebného média a způsobu upevnění na povrch měřeného pohonu.

Ověření opakovatelnosti na všech nepoškozených válcích proběhlo úspěšně a většina poškozených válců vykazovala takové odlišnosti v signálu, že bylo možné je od nepoškozených jednoznačně rozlišit. Válce s vadami, které nebylo možné odlišit od nepoškozených, byly podrobeny dalším experimentům za účelem zvýraznění jejich projevu v signálu, které však nebyly úspěšné. Posledními experimenty byl ověřen projev zjištělých vad v signálu. Stejně vady byly vytvořeny na nepoškozených pohonech a jejich projev v signálu se shodoval s těmi původně vytvořenými. Základem navržené metodiky je porovnávání průměrných hodnot parametru RMS z jednotlivých fází pracovního cyklu a z jednotlivých snímačů. Díky tomuto postupu lze snadno lokalizovat a v některých případech přímo identifikovat typ poškození.

Cíle diplomové práce byly splněny. Zde prezentovaná metodika bude implementována do výstupní kontroly výrobního závodu, čímž pomůže zvýšit odhalitelnost zmetkových kusů. Dosažené výsledky budou také prezentovány na konferenci EWGAE v Senlis ve Francii v září roku 2018. Do budoucna se nabízí vývoj mobilní zkušební aparatury, která by umožňovala diagnostiku pneumatických prvků přímo v místě jejich použití bez nutnosti demontáže a nákladného odstavení stroje.

**8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] Festo [online]. [cit 2017-03-17]. Dostupné z: <https://www.festo.com>
- [2] ZEMANOVÁ, L. *Identifikace únavového poškození Al slitiny zpracované technologií SLM s využitím metody akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 66 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [3] BANČÁK, M. *Snímání signálu akustické emise s využitím vlnovodů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 56 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [4] STEIN, P. *Kategorizace signálu akustické emise při cyklickém namáhání dílců*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [5] CHARVÁT, V. *Konstrukce přípravku pro ověřování parametrů snímačů akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 64 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [6] CHARVÁT, V. *Systém pro snímání signálu AE při zkouškách kontaktní únavy na zařízení R-mat*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 33 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [7] SCHREIER, J. *Vliv parametrů vazebného média a struktury povrchu na kvalitu snímaného signálu akustické emise*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc.
- [8] SMC. *SMC training: Stlačený vzduch a jeho využití*. 2.vyd.
- [9] ZHANG, Jun Zhao, Cong Ling WANG a Xue Fa FANG. Reliability Analysis of a Small Pneumatic Cylinder Life. *Applied Mechanics and Materials*. 2011, vol. 110-116, pp. 4240-4245. ISSN 1662-7482.
- [10] JUNGONG, Ma a Oneyama NAOTAKE. Test Method of Pneumatic Cylinder's life. In: *2007 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments*. IEEE, 2007, vol. 1, pp. 544-547. ISBN 978-1-4244-1135-1.
- [11] WANG, Jie, Ping YANG, Qian LI, Jian Bao WANG a Song YU. Prediction of Cylinder Fatigue Lifetime with Kernel Density Estimation Theory. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 644-650, pp. 547-552. ISSN 1662-7482.



- [12] CHEN, Juan, Chunwen SONG, Xiaoye QI a Wei WU. Path classification and estimation model based prognosis of pneumatic cylinder lifetime. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2012, vol. 25, no. 2, pp. 392-397. ISSN 1000-9345.
- [13] CHANG, Mu Seong, Jung Hun SHIN, Young Il KWON, Byung Oh CHOI, Choong Sung LEE a Bo Sik KANG. Reliability estimation of pneumatic cylinders using performance degradation data. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2013, vol. 14, no. 12, pp. 2081-2086. ISSN 2234-7593.
- [14] CHEN, Juan, Xiaoye QI, Bohong LIU a Deyi WANG. Analysis of failure mechanism and stress influence on cylinder. In: *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. IEEE, 2011, pp. 3543-3546. ISBN 978-1-61284-087-1.
- [15] ZHANG, Kunbo, Masayoshi TOMIZUKA, Imin KAO, Sachin KAMBLI a Christian BOEHM. Experimental studies on intelligent fault detection and diagnosis using sensor networks on mechanical pneumatic systems. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2008, vol. 6932, no. 47, pp. 1-9. DOI: 10.1117/12.797198.
- [16] SMC [online]. [cit 2017-03-17]. Dostupné z: <https://www.smc.eu>
- [17] NAKUTIS, Ž., KAŠTONAS, P. An approach to pneumatic cylinder on-line conditions monitoring. In: *Mechanika*. 2008, vol. 72, no. 4, pp. 41-47. ISSN 1392-1207.
- [18] *Preditest* [online]. [cit 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.preditest.cz>
- [19] PŘIBÁN, Miroslav. *Metoda akustické emise I: obecná část – základní principy*. Brno: Česká společnost pro NDT, 2010.
- [20] *NDT Resource Center* [online]. [cit 2017-03-21]. Dostupné z: [https://www.nde-ed.org/index\\_flash.htm](https://www.nde-ed.org/index_flash.htm)
- [21] LAODENO, R.N., NISHINO, H., YOSHIDA, K. Characterization of AE signals generated by gas leak on pipe with artificial defect at different wall thickness. In: *Materials Transactions*. 2008, vol. 49, no. 10, pp. 2341-2346. DOI: 10.2320/matertrans.MRA2008175.
- [22] KAEWWAEWNOI, W., A. PRATEEPASEN a P. KAEWTRAKULPONG. Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage. In: *Measurement*. 2010, vol. 43, no. 2, pp. 274-282. ISSN 02632241.



- [23] PRATEEPASEN, A., W. KAEWWAEWNOI a P. KAEWTRAKULPONG. Smart portable noninvasive instrument for detection of internal air leakage of a valve using acoustic emission signals. In: *Measurement*. 2011, vol. 44, no. 2, pp. 378-384. ISSN 02632241.
- [24] LEE, Joon-Hyun, Min-Rae LEE, Jung-Teak KIM, Vincent LUK a Yoong-Ho JUNG. A study of the characteristics of the acoustic emission signals for condition monitoring of check valves in nuclear power plants. In: *Nuclear Engineering and Design*. 2006, vol. 236, no. 13, pp. 1411-1421. ISSN 00295493.
- [25] ASAMENE, Kassahun a Mannur SUNDARESAN. Analysis of experimentally generated friction related acoustic emission signals. In: *Wear*. 2012, vol. 296, pp. 607-618. ISSN 00431648.
- [26] AUGUTIS, V a M SAUNORIS. Investigation into acoustic emission of pneumatic cylinders. In: *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2007, vol. 49, no. 8, pp. 476-480. ISSN 1354-2575.
- [27] VLAŠIC, F. a P. MAZAL. *Souhrnné vyhodnocení nepoškozených a poškozených pneumatických válců – část II*. Brno: 2015. Číslo zprávy: VUT FSI 13290/2015 – 10.
- [28] VLAŠIC, F., H. MAHMOUD a P. MAZAL. *Stanovení omezeného souboru sledovaných parametrů, konstrukce zjednodušeného zařízení pro snímání dat a vývoj vyhodnocovacího software: Výběr vhodných parametrů*. Brno: 2016. Číslo zprávy: VUT FSI 13290/2016 – 05.
- [29] VLAŠIC, F., H. MAHMOUD a P. MAZAL. *Stanovení omezeného souboru sledovaných parametrů, konstrukce zjednodušeného zařízení pro snímání dat a vývoj vyhodnocovacího software: Příklady základních souborů experimentálních dat*. Brno: 2016. Číslo zprávy: VUT FSI 13290/2016 – 06.
- [30] Česká republika. *Hodnocení výsledků výzkumných organizací a hodnocení výsledků ukončených programů*. In: 1417/2013-RVV. Praha, 2013, č. 475.
- [31] *Poličské strojírny* [online]. [cit 2017-04-27]. Dostupné z: <http://pos.cz/>
- [32] *Dakel* [online]. [cit 2017-04-27]. Dostupné z: <http://www.dakel.cz/>
- [33] KOJŠ, D. *Konstrukce zkušební stanice pro diagnostiku poškození a úniků médií z pneumatických systémů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 67 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Mazal, CSc..
- [34] KALÁNEK, L. *Vady přímočarých pneumotorů PB*. Poličské strojírny, a.s., 2015.

- [35] KALÁNEK, L. *Vady vytvořené na válcích PB*. Poličské strojírny, a.s., 2015.
- [36] DAKEL. *Dakel-Zedo: Instalační a uživatelská příručka*. 2017.

**9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN****9**

---

|          |   |   |
|----------|---|---|
| AE       |   | akustická emise                                 |
| NDT      |   | nedestruktivní testování                        |
| TAČR     |   | Technologická agentura České republiky          |
| KDE      |   | Kernel density estimation                       |
| MOT      |   | minimální operační tlak                         |
| DÚ       |   | dolní úvrat'                                    |
| HÚ       |   | horní úvrat'                                    |
| NP       |   | nad pístem                                      |
| PP       |   | pod pístem                                      |
| ASL      | V | average signal level                            |
| RMS      | V | root mean square                                |
| $D_{AE}$ | 1 | odhalitelnost vady metodou AE                   |
| $D$      | 1 | odhalitelnost vady běžnými metodami             |
| $U$      | V | napětí  |
| $N$      | 1 | počet hodnot v periodě pro výpočet parametrů AE |
| $P$      | W | výkon   |

**10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**

|   |    |
|---|----|
| Obr. 1.1 Řez kompaktním pneumatickým válcem ADN-PPS od společnosti...           | 10 |
| Obr. 2.1 Řez dvojčinným pneumatickým válcem                                     | 12 |
| Obr. 2.2 Těsnění vtlačené (vlevo) a břitové (vpravo)                            | 13 |
| Obr. 2.3 Princip nastavitelného tlumení koncových poloh                         | 13 |
| Obr. 2.4 Porovnání KDE a Weibullova rozdělení. Hustota pravděpodobnosti...      | 14 |
| Obr. 2.5 Závislost minimálního operačního tlaku na počtu cyklů pohonu...        | 14 |
| Obr. 2.6 Vliv teploty a tlaku plynu, frekvence zdvihu a rychlosti pohybu...     | 15 |
| Obr. 2.7 Spotřeba vzduchu poškozených (červeně) a nepoškozených (modře)...      | 16 |
| Obr. 2.8 Parametry nespojitého AE signálu                                       | 17 |
| Obr. 2.9 Schéma piezoelektrického snímače                                       | 18 |
| Obr. 2.10 Plošná lokalizace zdroje AE   | 18 |
| Obr. 2.11 Frekvenční spektrum při přítomnosti cizího tělesa (vlevo) a při...    | 19 |
| Obr. 2.12 AE signál nového (vlevo) a použitého (vpravo) pneumatického pohonu    | 20 |
| Obr. 2.13 Celkový signál AE (tření + únik) použitého (1) a nového (2) pohonu... | 20 |
| Obr. 2.14 Typy zkoumaných pneumatických pohonů (vlevo) a umístění...            | 21 |
| Obr. 2.15 Frekvenční spektrum v čase (nahore), zastoupení jednotlivých...       | 22 |
| Obr. 2.16 Frekvenční spektrum (nahore) nového pohonu (vlevo) a po 820.tis...    | 23 |
| Obr. 2.17 Schéma vlivu tlumení na signál AE                                     | 24 |
| Obr. 2.18 Signál AE detekovaný za chodu nepoškozeného válce typu PB             | 24 |
| Obr. 2.19 Vliv počtu cyklů na obálku signálu                                    | 25 |
| Obr. 4.1 Postup řešení  | 28 |
| Obr. 4.2 Schéma měřicí stanice  | 29 |
| Obr. 4.3 Součásti pneumatického válce typu PB                                   | 30 |
| Obr. 4.4 Vady PB válců nad pístem (NP, vlevo) a pod pístem (PP, vpravo)         | 30 |
| Obr. 4.5 Vady PB válců, zadírání (Z, vlevo), mechanické závady (M, vpravo)      | 32 |
| Obr. 4.6 Schéma měřicího řetězce  | 33 |
| Obr. 4.7 Použití lepených snímačů MIDI (vlevo) a snímačů MTR s plastovým...     | 34 |
| Obr. 5.1 Průběh parametru RMS a polohy pístnice během 4 pracovních...           | 36 |
| Obr. 5.2 Srovnání parametru RMS s počtem překmitů přes prahové...               | 37 |
| Obr. 5.3 Srovnání parametru RMS s počtem překmitů přes prahové...               | 37 |
| Obr. 5.4 Frekvenční spektrum signálu nepoškozeného válce č. 17...               | 38 |
| Obr. 5.5 Umístění snímačů na válci  | 39 |
| Obr. 5.6 Vliv umístění snímače na podobu signálu                                | 39 |
| Obr. 5.7 Vliv rychlosti pohybu pístnice na podobu signálu AE                    | 40 |
| Obr. 5.8 Vliv rychlosti pohybu pístnice na průměrnou hodnotu parametru...       | 41 |
| Obr. 5.9 Vliv tlaku vzduchu na podobu signál AE                                 | 41 |
| Obr. 5.10 Vliv tlaku vzduchu na průměrnou hodnotu parametru RMS při...          | 42 |
| Obr. 5.11 Vliv počtu absolvovaných cyklů na signál AE                           | 42 |
| Obr. 5.12 Vliv počtu absolvovaných cyklů na průměrnou hodnotu parametru...      | 43 |
| Obr. 5.13 Opakovatelnost měření za použití různých typů snímačů                 | 44 |
| Obr. 5.14 Opakovatelnost měření na všech nepoškozených válcích                  | 45 |
| Obr. 5.15 Srovnání signálu poškozeného válce č.1 s nepoškozenými válci...       | 45 |
| Obr. 5.16 Srovnání signálu poškozeného válce č.1 s nepoškozenými válci...       | 46 |
| Obr. 5.17 Vliv zatížení na signál AE  | 49 |
| Obr. 5.18 Opakovatelnost projevu vady NP01                                      | 50 |
| Obr. 5.19 Opakovatelnost projevu vady NP02                                      | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Obr. 5.20 Opakovatelnost projevu vady NP05                                     | 51 |
| Obr. 5.21 Opakovatelnost projevu vady PP01                                     | 52 |
| Obr. 5.22 Experimenty s poškozeným šroubením, válec č. 8                       | 52 |
| Obr. 5.23 Fáze pro vyhodnocení během pracovního cyklu nepoškozeného válce      | 53 |
| Obr. 5.24 Frekvenční spektrum válce č. 3 (nahore) a válce č. 15 poškozeného... | 55 |
| Obr. 6.1 Souhrn identifikovatelných, lokalizovatelných a nedetekovatelných vad | 59 |

## **11 SEZNAM TABULEK**

---

|  |    |
|--|----|
| Tab. 4.1 Vady PB válců nad pístem (NP).....      | 31 |
| Tab. 4.2 Vady válců PB pod pístem (PP) .....     | 31 |
| Tab. 4.3 Vady válců PB – zadírání .....          | 32 |
| Tab. 4.4 Vady válců PB – mechanické závady.....  | 32 |
| Tab. 4.5 Vady uměle vytvořené na válcích PB..... | 33 |

## **12 SEZNAM PŘÍLOH**

**12**

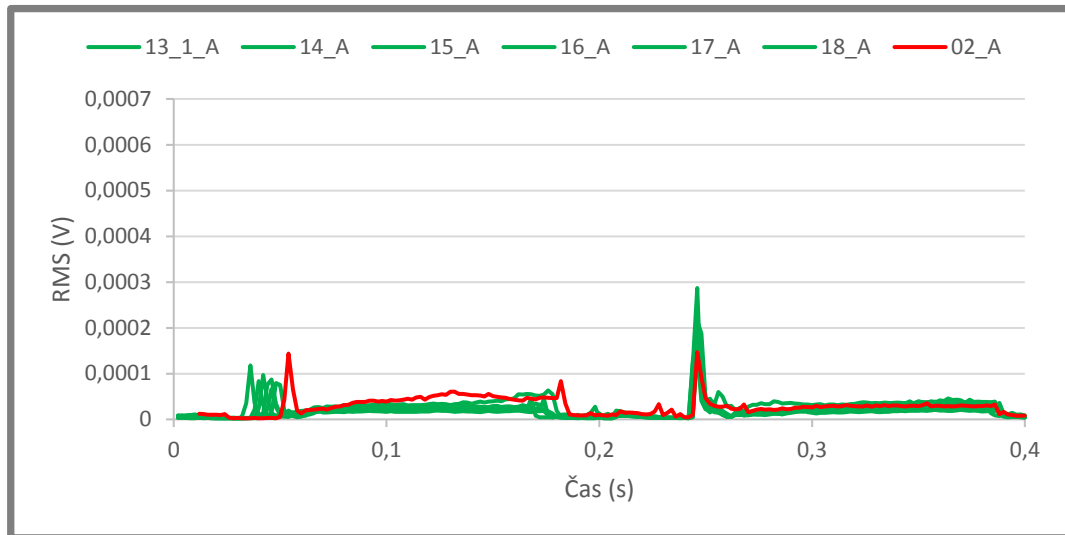
---

PŘÍLOHA I Srovnání signálu z jednotlivých poškozených válců s nepoškozenými

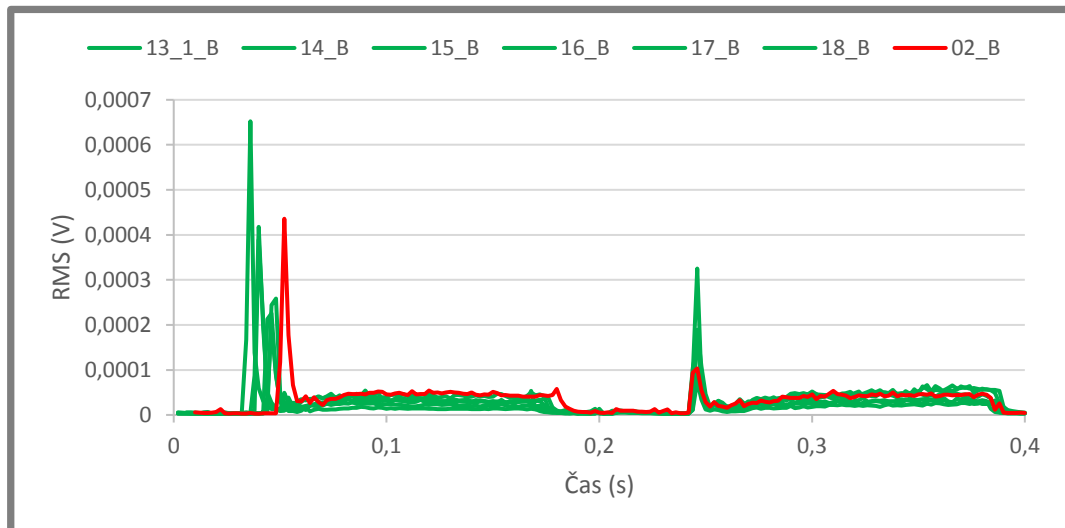
**PŘÍLOHA I**

Srovnání signálu z jednotlivých poškozených válců s nepoškozenými

Válec č. 2, kanál A

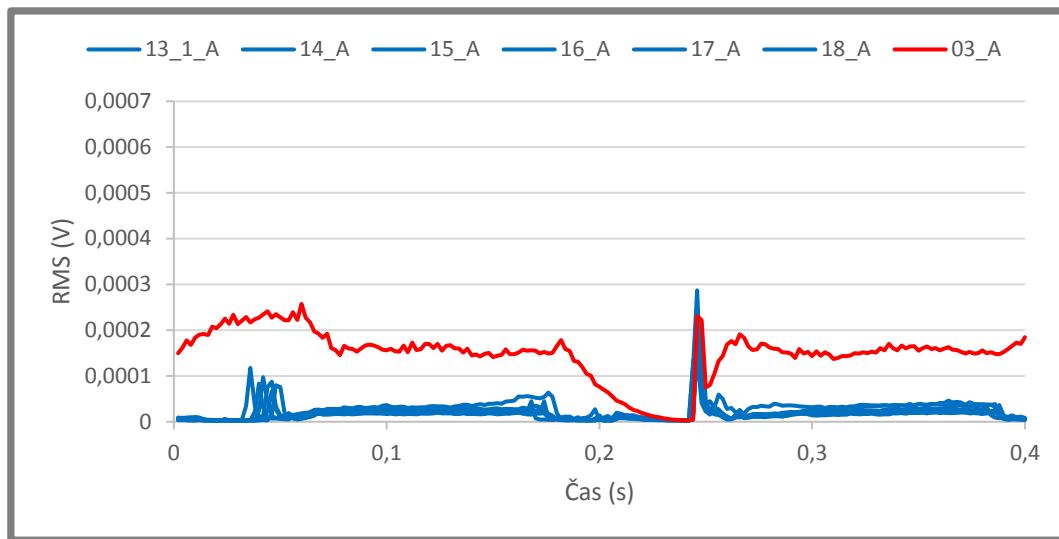


Válec č. 2, kanál B

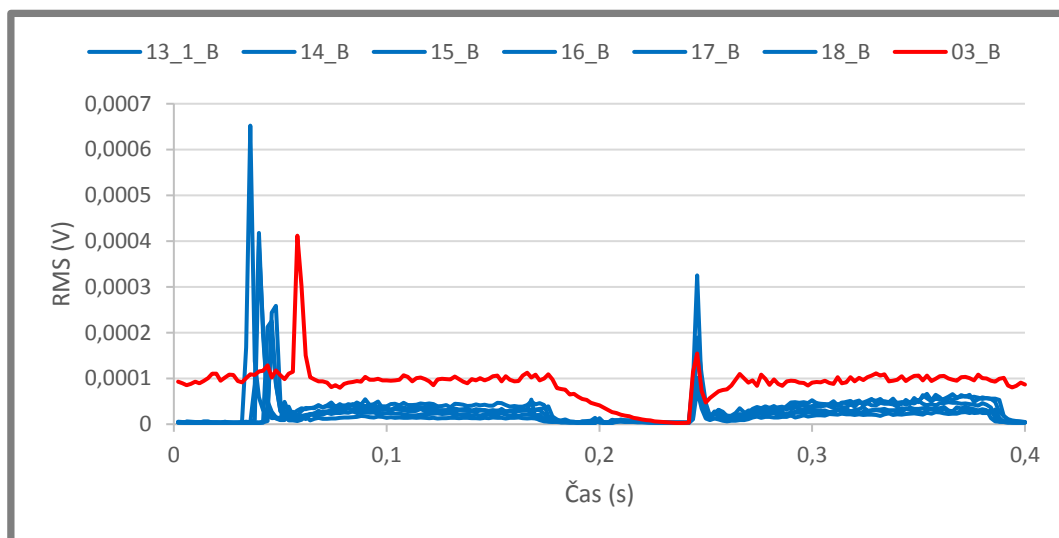




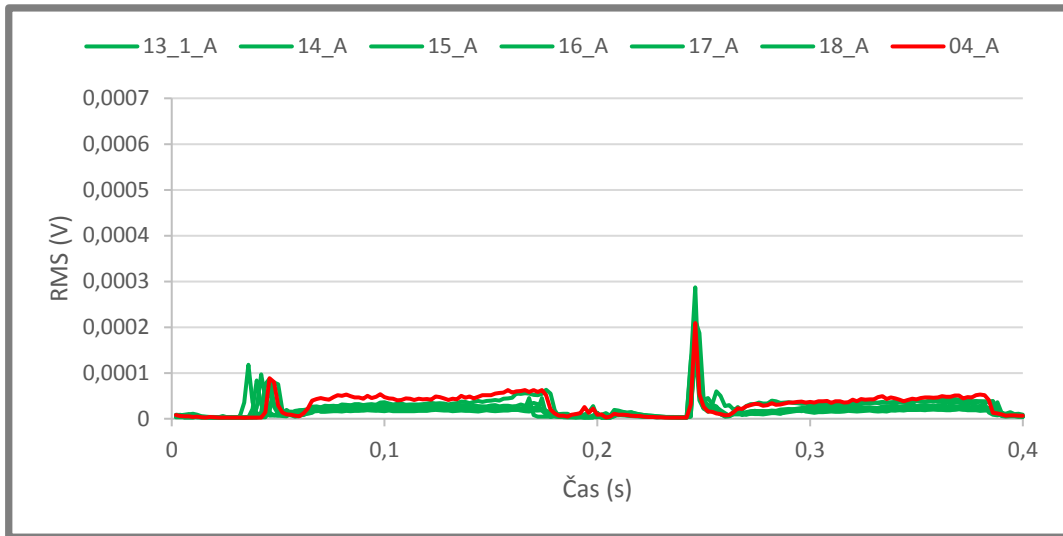
## Válec č. 3, kanál A



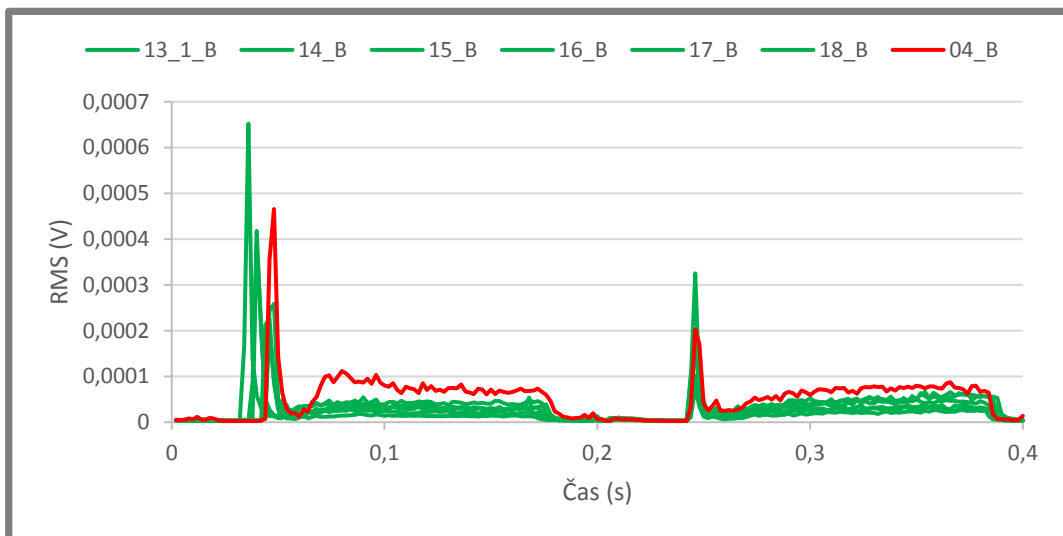
## Válec č. 3, kanál B



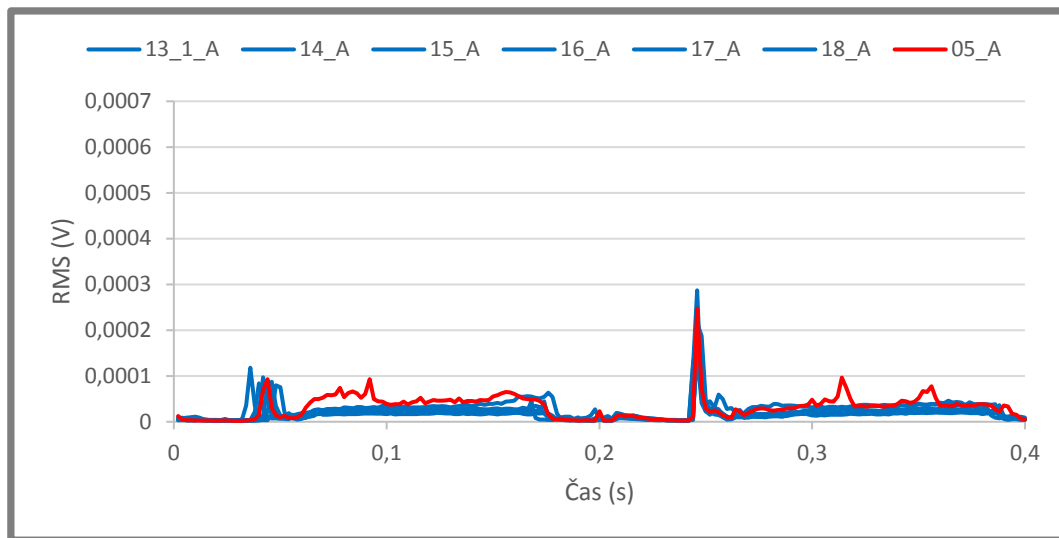
## Válec č.4, kanál A



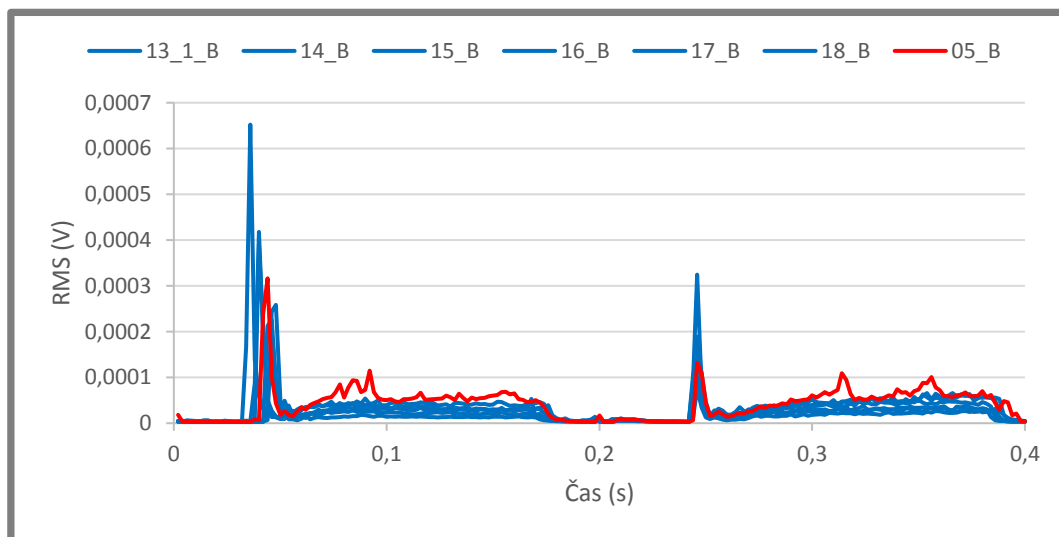
## Válec č.4, kanál B



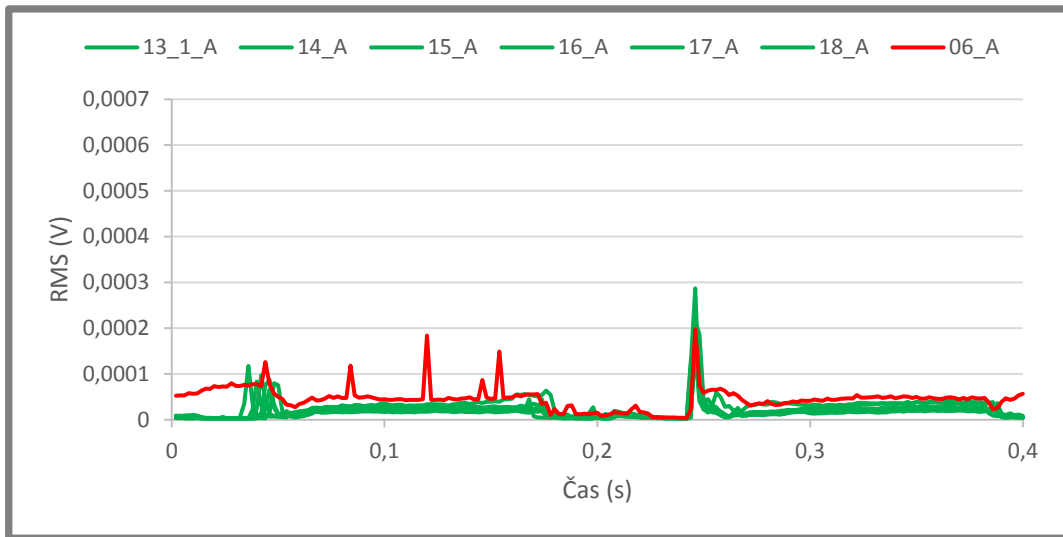
## Válec č. 5, kanál A



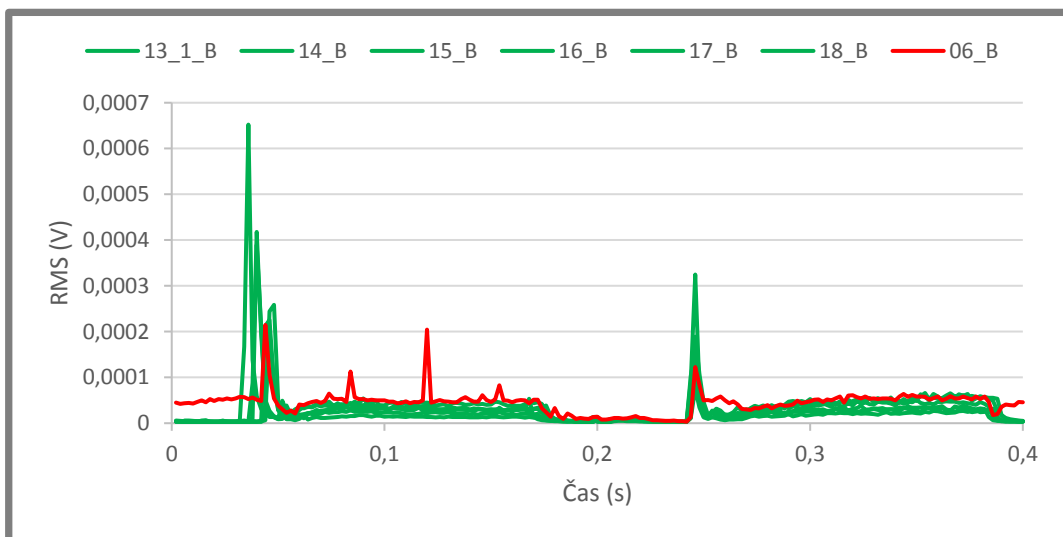
## Válec č. 5, kanál B



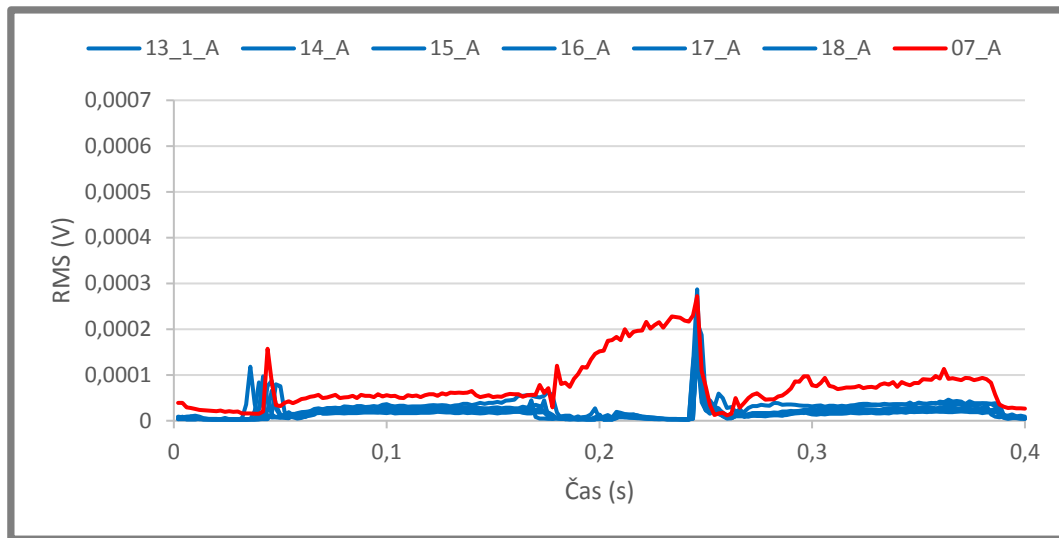
## Válec č. 6, kanál A



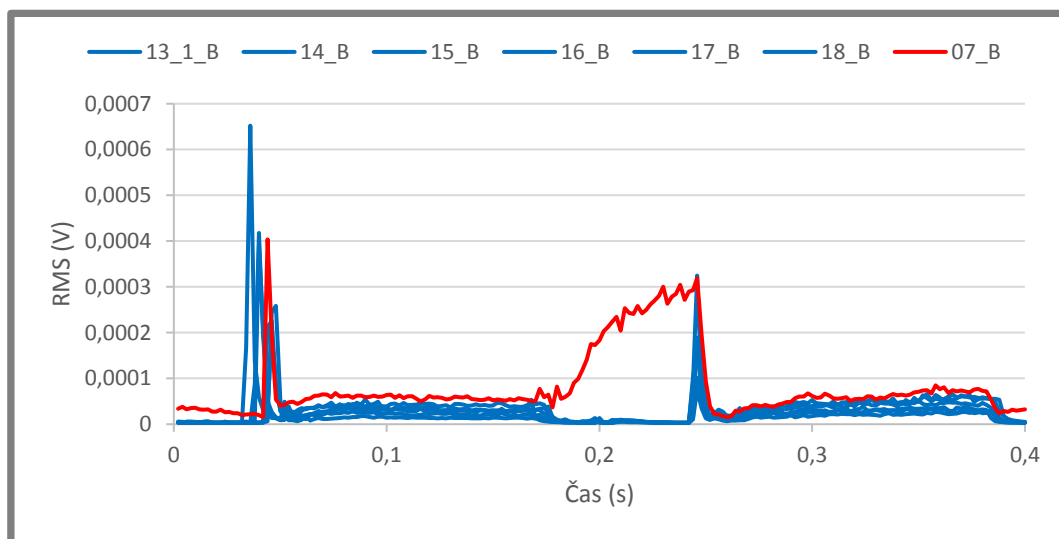
## Válec č. 6, kanál B



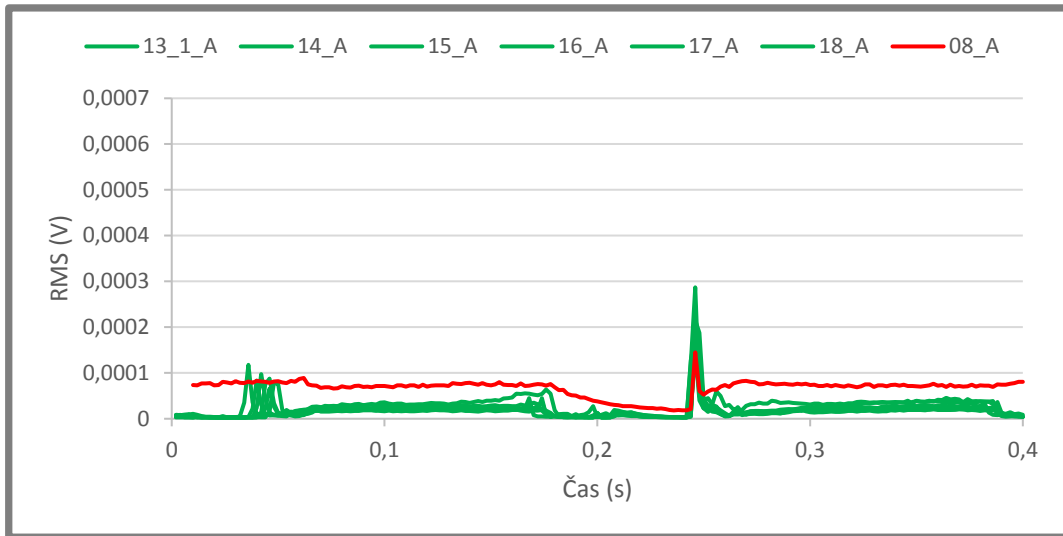
## Válec č. 7, kanál A



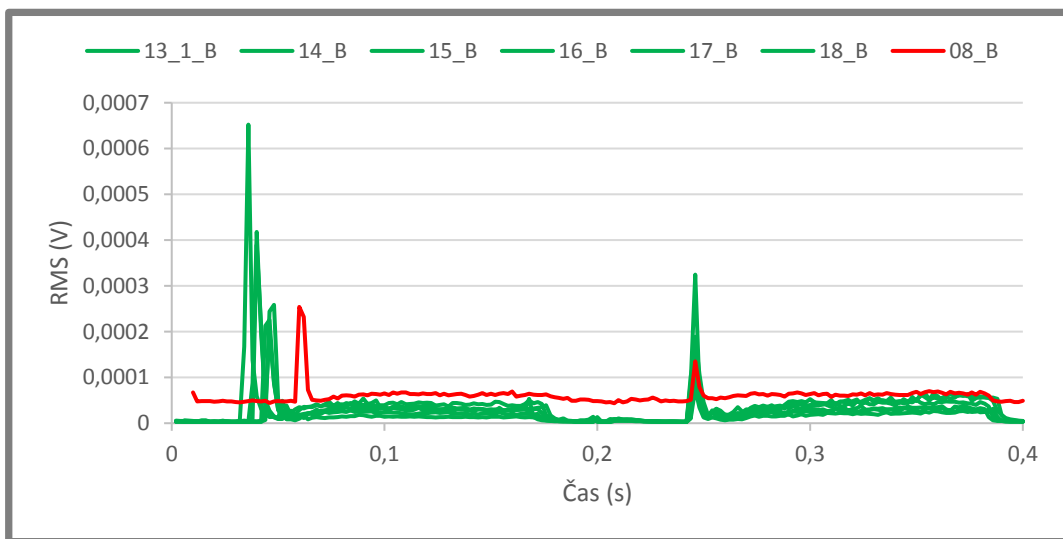
## Válec č. 7, kanál B



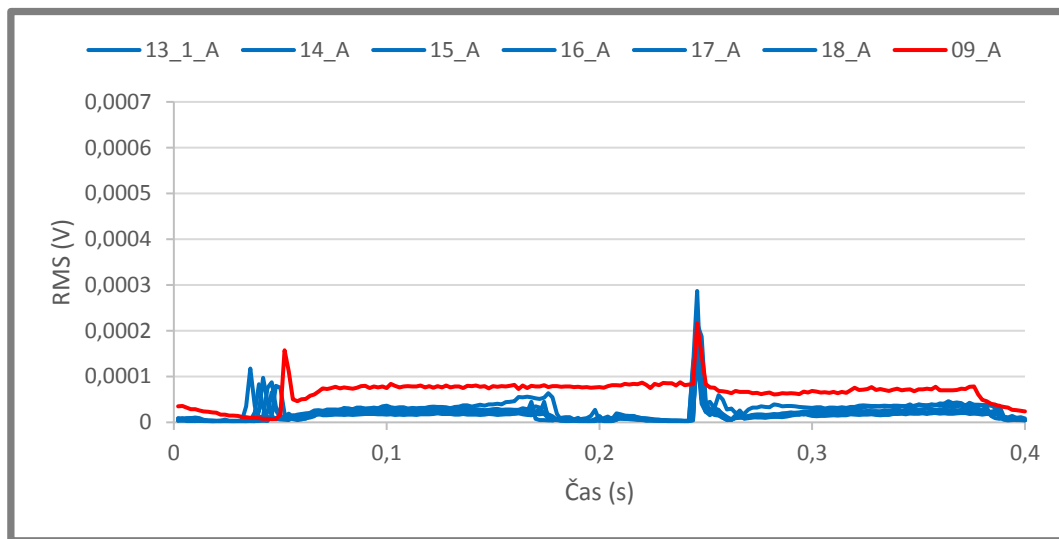
## Válec č. 8, kanál A



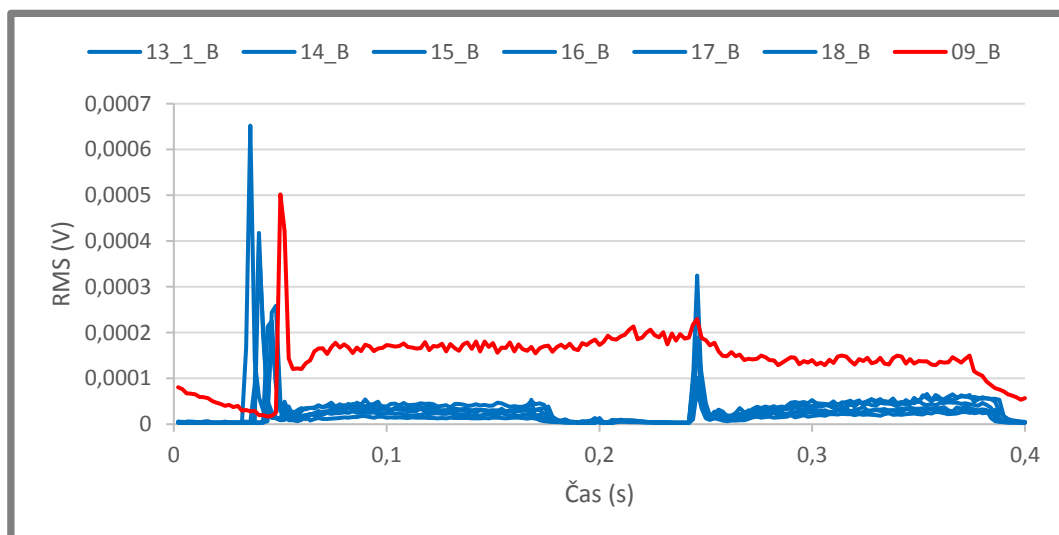
## Válec č. 8, kanál B



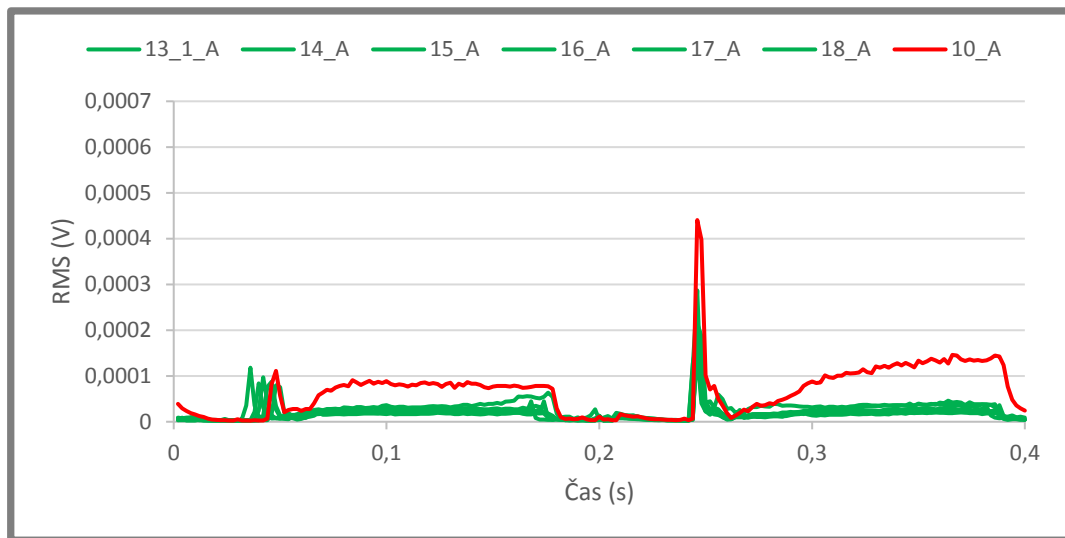
## Válec č. 9, kanál A



## Válec č. 9, kanál B



## Válec č. 10, kanál A



## Válec č. 10, kanál B

