



Akademie věd České republiky
Ústav teorie informace a automatizace

The Czech Academy of Sciences
Institute of Information Theory and Automation

RESEARCH REPORT

Ing. Petr TICHAVSKÝ, DSc.
ÚTIA AVČR

Analýza korozního poškození potrubí s proudící párou
pomocí akustické emise:
teoretická východiska a první výsledky

No. 2370

Prosinec 2017

UTIA AV ČR, P. O. Box 18, 182 08 Prague, Czech Republic
E-mail: utia@utia.cas.cz

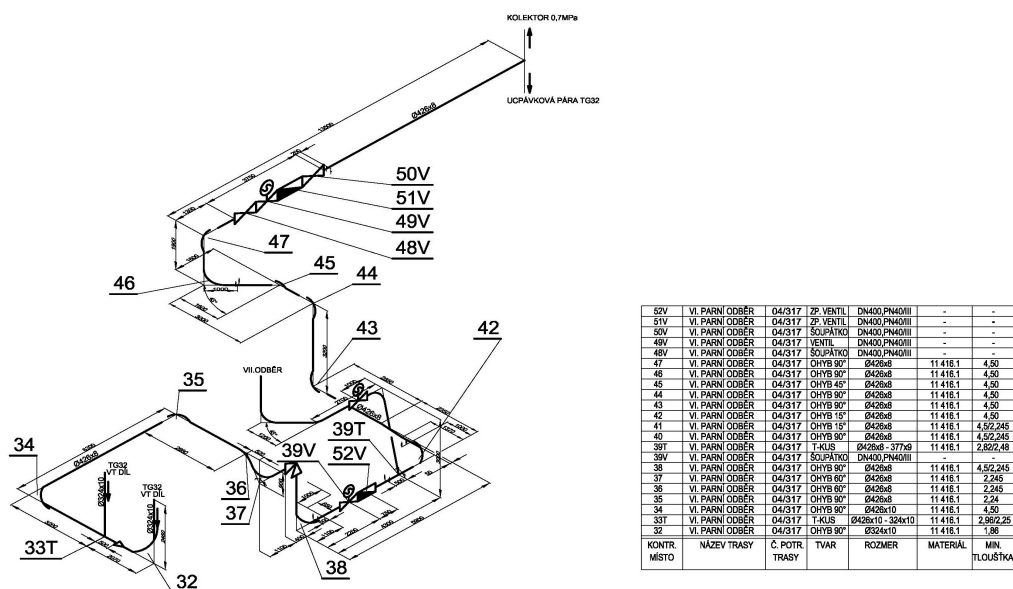
Úvod

Tato výzkumná zpráva prezentuje výsledky zkoumání akustické emise na parovodním potrubí v elektrárně Jaslovské Bohunice. Data byla naměřena firmou ZD Rputy – Dakel. Plánky potrubí a údaje o páře poskytl ing. Michal Havavka z podniku Slovenské elektrárne, a. s.

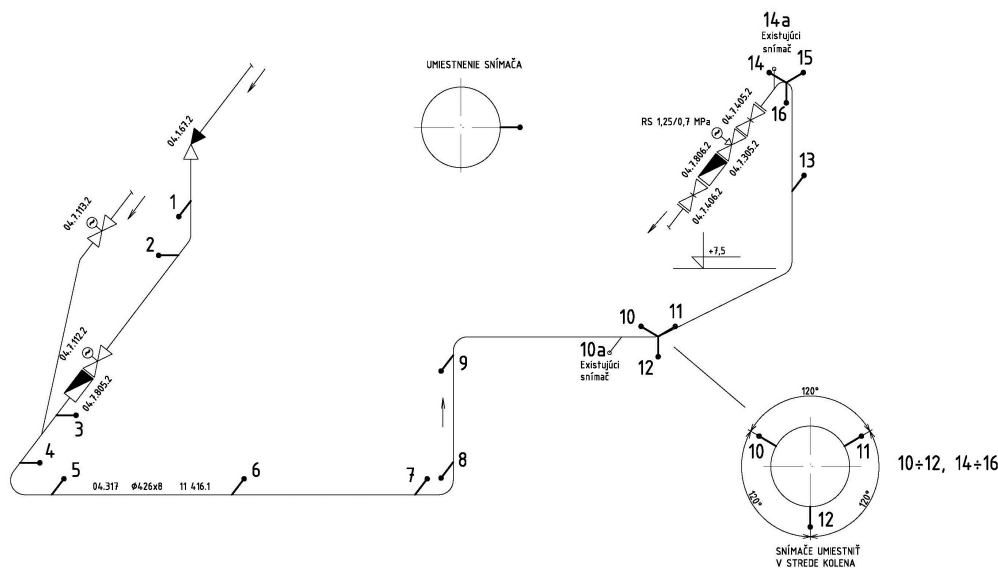
Tato zpráva má čtyři části. Nejprve popíšeme problém, schema potrubí a umístění snímačů akustické emise. Dále popíšeme teoretická východiska a mechanismus vzniku akustické emise v potrubí. V třetí části prezentujeme výpočet nebo spíše odhad rychlosti proudění páry v potrubí na základě existujících údajů, jako pomocný údaj pro analýzu dat. Konečně píšeme první výsledky analýzy.

Popis problému a měření

Cílem měření akustické emise je odhad rozsahu korozního poškození parovodního potrubí. Schema potrubí a umístění vlnovodů pro snímání akustické emise je znázorněno na obrázcích 1 a 2.



Obr. 1: Schema potrubí na 6. parním odběru TG 32-06 v atomové elektrárně Jaslovské Bohunice.



Obr. 2. Umístění vlnovodů na potrubí v obrázku 1. Mezi vlnovody 01 a 02 je koleno 38, mezi vlnovody 03 a 04 je výtok 41T, mezi vlnovody 04 a 05 je koleno 42, mezi vlnovody 7 a 8 je koleno 44, a až na konci u vlnovodů 14-16 je koleno 47.

Teoretické vysvětlení pro vznik akustické emise

Hlavním zdrojem akustické emise v potrubí s proudící párou je turbulentní proudění. Proudění páry nebo jakéhokoliv plynu nebo tekutiny je laminární při nízkých rychlostech proudění a od určité rychlosti výše přechází v proudění turbulentní, které je chaotické, vyvolává prudké změny okamžitého tlaku a tím rozkmitává stěny potrubí. Turbulentní proudění je nežádoucí, protože v něm dochází ke ztrátám energie (přeměna kinetické energie na teplo), a vyvolává nadměrné mechanické opotřebení potrubní soustavy kvůli těmto kmitům. Poměry v potrubí jsou navrhovány a udržovány tak, aby proudění bylo pokud možno laminární. Přesto k lokálně turbulentnímu proudění může docházet, a to na některých místech. (1) v místě klapky a uzávěrů, kde může být průřez toku zúžen, a (2) v místě ohybu potrubí (kolen). V kolenech potrubí dochází k tomu, že po vnější straně proudící tekutina vykonává větší dráhu než po vnitřní straně potrubí, a proto musí téct úměrně rychleji. To dobře vědí všichni vodáci, že v ohybu řeky proudí voda podstatně rychleji po vnějším obvodu než po vnitřním obvodu.

V případě potrubí, přestože jsou poměry navrženy tak, aby ani na obvodu kolen nepřesahovala rychlost proudění kritickou mez a proudění zůstávalo laminární, stejně tato místa jsou náchylnější na opotřebení. Proudění podél hladké stěny bude s větší pravděpodobností laminární, ovšem proudění podél zdrsněné stěny bude více náchylné pro vznik turbulentního proudění. Pochopitelně, tekutina vyplňuje celý daný prostor, neboť je pod tlakem, a podél zakřivené dráhy u nerovné stěny je její cesta delší a rychlost po ní úměrně větší. Lokálně může rychlost přesáhnout mez pro laminární proudění. Mechanické namáhání stěny potrubí dále zrychluje korozní procesy na stěně potrubí, drsnost stěny se tím procesem může zvětšovat. To je právě jev, který máme studovat.

Signály akustické emise, kterými se zabývá tato studie, vykazují poměrně značnou variabilitu ve své intenzitě, v tom jak se mění variance signálu v čase. To naznačuje, že v proudu páry v čase náhodně vznikají a zase zanikají „provázky“ turbulentního proudění. Jde o náhodný proces, který lze popisovat pouze statisticky. Vzhledem k tomu co bylo popsáno výše je zřejmé, že kolísání variance signálu v čase bude klíčový parametr, který bude určovat do jaké míry je v proudění páry v potrubí laminární a do jaké míry je turbulentní, a bude určovat také míru korozního poškození.

Největší a hlavní problém, kterým se budeme zabývat, bude lokalizace tohoto turbulentního proudění, to

jest lokalizace předpokládaného korozního poškození. Máme k dispozici synchronního měření akustické emise podél určité trasy potrubí. Potíž je v tom, že potrubí je mechanická soustava, která má svoji geometrii a svoje charakteristické kmitočty, zvuk se po ní velice rychle šíří (dle tabulek je rychlost šíření zvuku ve feromagnetické oceli $5\,960\text{ ms}^{-1}$) a to s poměrně malým odporem (útlumem). Při jakémkoliv podnětu se rozezná celá soustava prakticky skoro stejným způsobem, takže lokalizace není snadná.

Ověřovali jsme teorii „hrudek“ v páře, totiž že zdroje akustické emise se pohybují společně s proudící párou. Jak uvádíme v další kapitole, pára se pohybuje v potrubí rychlostí cca 15 ms^{-1} . Pokud by se zdroje pohybovaly, musel by se výrony akustické emise projevovat na jednotlivých vlnovodech postupně, se zpožděními které odpovídají této rychlosti. Toto se nepotvrdilo, ukazuje se, že projevy turbulentního proudění jsou velmi podobné na různých vlnovodech, a vzájemné zpoždění odpovídají spíše rychlosti šíření zvuku v kovu potrubí, nikoliv rychlosti proudící páry.

Výpočet rychlosti proudění páry v potrubí

Vstupní údaje:

průměr potrubí (vnitřní): $D=0,410\text{ m}$
 molární hmotnost vody (páry) $M=18\text{ g/mol}$
 tlak $p=1.059\text{ MPa}$
 teplota $T=182,4^{\circ}\text{C} = 455,55\text{ K}$
 hmotnost proudící páry za jednotku času $m=10,29\text{ kg/s}$
 molární plynová konstanta $R=8,314\text{ J K}^{-1}\text{ mol}^{-1}$

Výpočet

Stavová rovnice pro neproudící plyn

$$\begin{array}{ll} pV=nRT & // n=\text{látkové množství} \\ pV=m/M RT & // m=\text{hmotnost látky o objemu } V \\ p=(1/M) \rho RT & // \rho=\text{hustota} \end{array}$$

Stavová rovnice upravená pro plyn proudící rychlostí v
 (bereme v úvahu tlakovou a kinetickou energii plynu)

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = (1/M) \rho RT$$

Vztah mezi hmotností a hustotou proudící páry

$$m = \frac{1}{4} \pi D^2 v \rho$$

Odtud

$$\rho = 4m/(\pi D^2 v)$$

Dosazením do stavové rovnice dostaneme

$$p + 2mv/(\pi D^2) = 4mRT/(\pi MD^2 v)$$

Odtud získáme kvadratickou rovnici pro neznámou rychlost v

$$v^2 + v (\pi D^2 p)/(2m) - 2RT/M = 0$$

kteřá má jediné kladné řešení (záporné řešení nemá fyzikální význam)

$$v = -(\pi D^2 p)/(4m) + [(\pi D^2 p)^2/(16m^2) + 2RT/M]^{1/2}.$$

Numericky vychází pro tlak $p_1 = 1,089$ MPa rychlost proudění páry $v_1 = 15,48$ m/s.

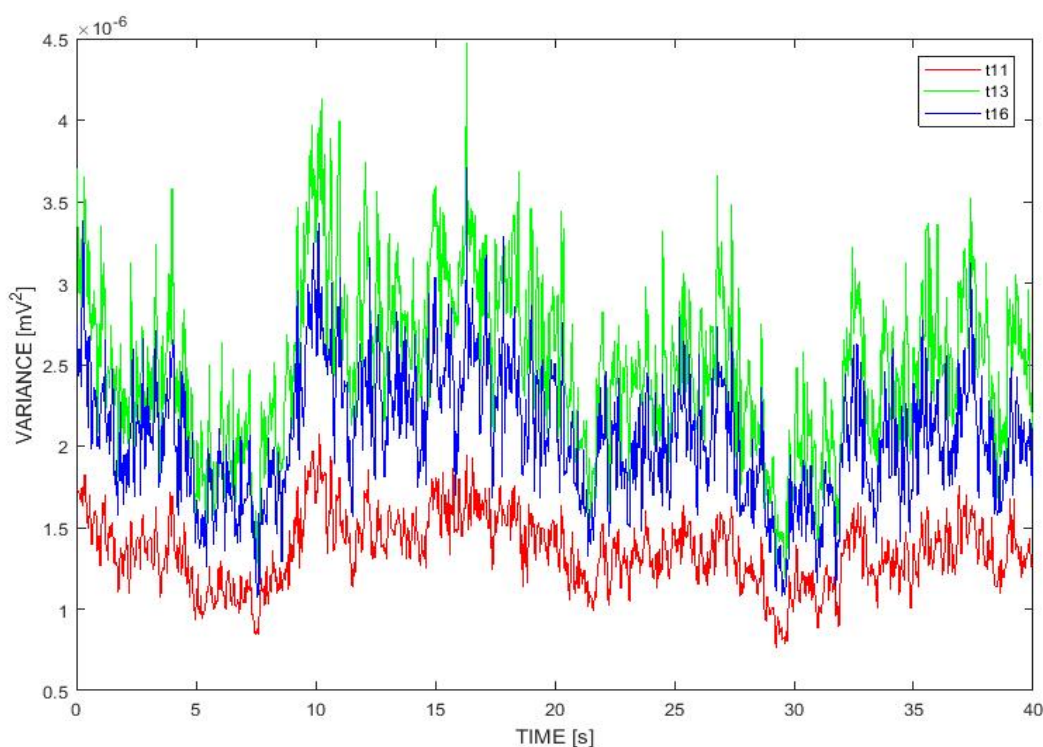
Pro tlak $p_2 = 0,7$ MPa vychází rychlost proudění ještě vyšší, $v_2 = 23,4$ m/s.

Rychlostní mez mezi laminárním a turbulentním prouděním přesně neznáme, bude záviset na tlaku a možná i na teplotě, musela by se změřit experimentálně.

Rozbor měřené akustické emise

Zkoumali jsme data akustické emise získané ze zařízení firmy ZD Rpety Dakel na vlnovodech č. 11 až 16, vzorkované frekvencí 5 MHz, úsek délky cca 40 s, celkem 7 souborů každý s velikostí 200 Mb. Pokud uvažujeme úseky dat o délce 100 tisíc až milion vzorků, jeví se signály jako stacionární. Nestacionarita signálu – projevy lokálního turbulentního proudění, které náhodně vzniká a zaniká, se projeví až ve větší škále.

Na obrázku 3 vidíme průběh výběrové variance tří vybraných signálů počítaných na blocích o délce 100000 vzorků, tj. 0.02 s.



Obr. 3. Variance signálů z vlnovodů 11, 13 a 16 na blocích o délce $N = 100\,000$ vzorků, tj. 0.02 s.

Můžeme si všimnout, že ačkoliv jsou vlnovody od sebe vzdálené, průběh variancí v čase ve všech třech kanálech je velice podobný, až na škálu. Také si můžeme povšimnout, že variance značně kolísá v průběhu sledovaných 40 sekund, např. u signálu z vlnovodu č. 11 kolísá od jednoho mV^2 do 2 mV^2 . Toto kolísání přičítáme vzniku a zániku lokálního turbulentního proudění v páře.

Pokud si zobrazíme spektrální hustotu signálu v úsecích s nízkou a vysokou variancí, uvidíme že je zhruba totožná.

Proto soudíme, že spektrálními metodami se turbulentní a laminární proudění nedá odlišit a musíme se spolehnout na zkoumání signálu v časové oblasti.

V této první fázi výzkumu se zaměříme na práci s agregovanými statistikami, kterými jsou výše zmíněné variance na blocích jako funkce času. Označme $\mathbf{X}$ matici těchto variancí, má velikost 3×1000 .

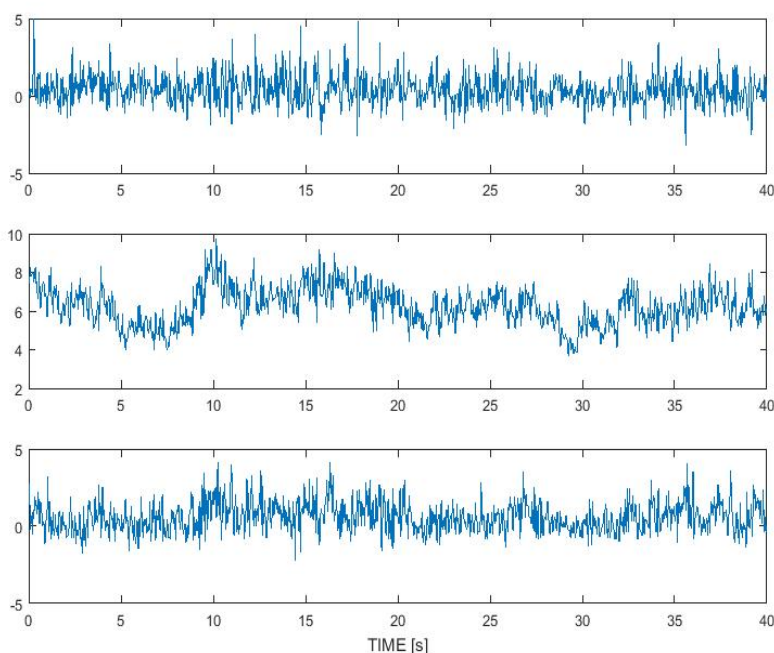
Předpokládejme pro jednoduchost, že signály akustické emise vznikají na kolenech 47, 46, a 44, a jsou na sobě vzájemně statisticky nezávislé. Označme matici těchto signálů jako $\mathbf{S}$.

Jelikož naše bloky dat jsou mnohem delší než je zpoždění signálu mezi jednotlivými vlnovody, můžeme tato zpoždění zanedbat, a můžeme předpokládat, že agregovaný signál akustické emise je lineární okamžitou směsí tří nezávislých komponent,

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} \mathbf{S}$$

kde $\mathbf{A}$ je neznámá matice mísení. Prvky matice mísení, i matice signálu $\mathbf{S}$ by měly být nezáporné. Jde o opravdu velké zjednodušení, neboť zanedbáváme mnoho dalších vlivů.

Provedeme analýzu nezávislých komponent a pomocí algoritmu EFICA [1] získáme následující tři komponenty, které by měly odpovídat turbulencím na jednotlivých kolenech – viz obr. 5 – pouze zatím nevíme, která komponenta odpovídá kterému kolenu, kvůli permutační neurčitosti.



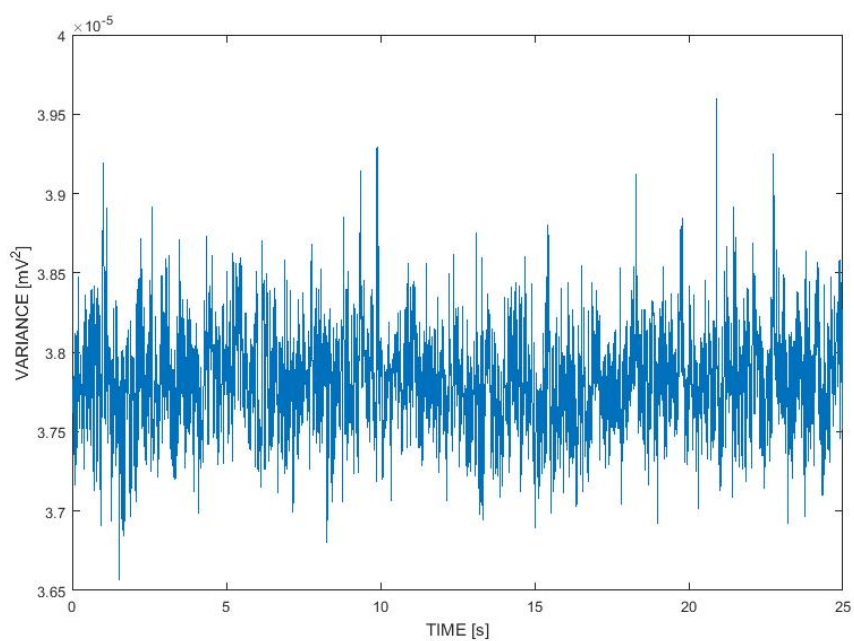
Obr. 4. Nezávislé komponenty pro agregované statistiky v matici $\mathbf{X}$.

Mezi nalezenými komponentami pouze ta druhá má, striktně vzato, fyzikální smysl, neboť je zcela nezáporná. Tato komponenta vystihuje převládající trend všech tří směsí na obrázku 3. Největší amplitudu má tato komponenta na snímači 13 a proto usuzujeme, že turbulentní proudění vzniká na kolenech které je nejbližší, tj. č. 46. Do jaké míry je toto turbulentní proudění významné a korozní poškození velké, to nemůžeme z jednoho měření zjistit, bylo by potřeba rozsáhlejší srovnání s koleny různých stárí a poškození.

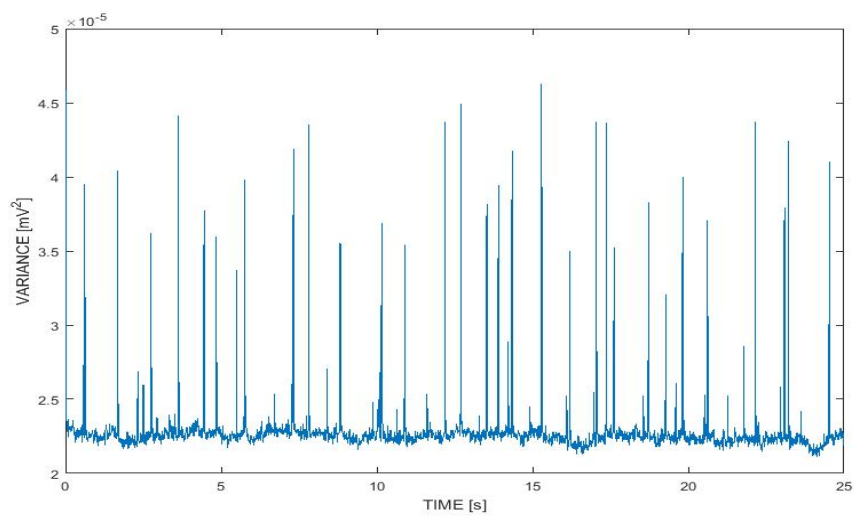
Analýza nepopsaných dat

Kromě výše uvedených dat bylo řešiteli projektu předloženo 5 dalších souborů s daty akustické emise, které byly pořízeny v minulosti jako mono-nahrávky, vždy jen z jednoho snímače, k jejich slepému

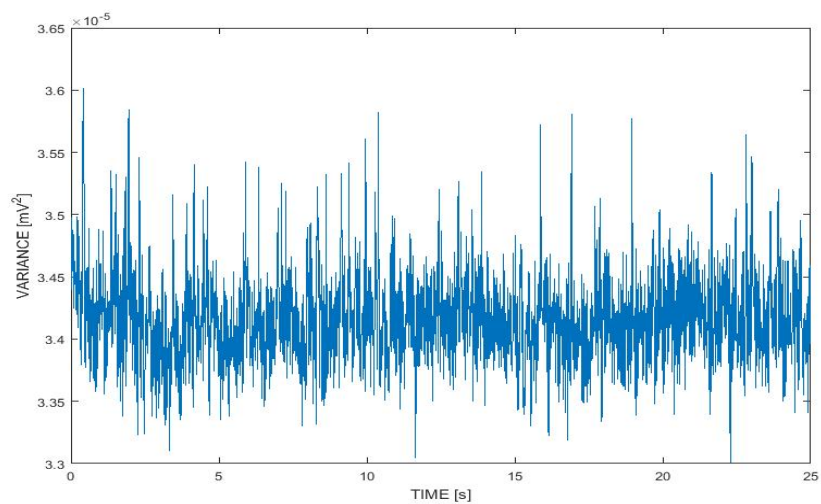
vyhodnocení. Podobně jako v obrázku 3, níže zobrazíme agregované statistiky - výběrové variance počítané na blocích o délce 0.02 s.



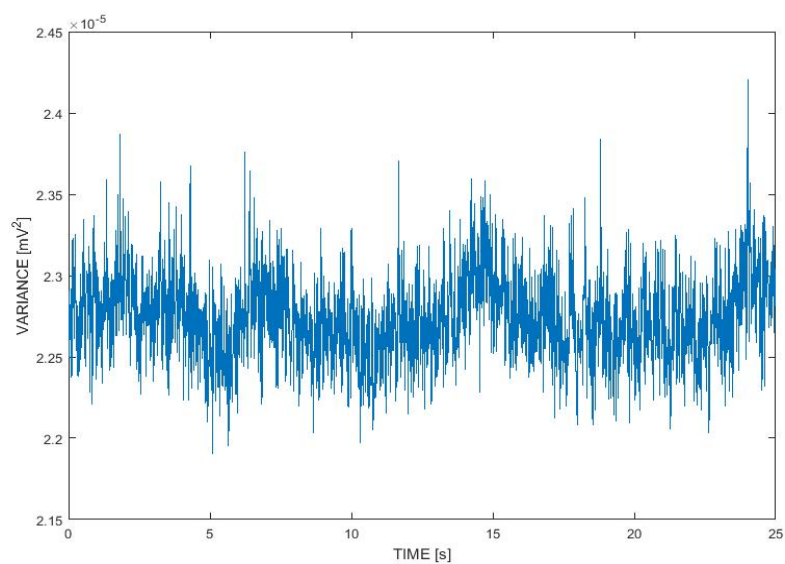
Obr. 5. Výběrové variance na úsecích délky 0.02 s pro soubor A.



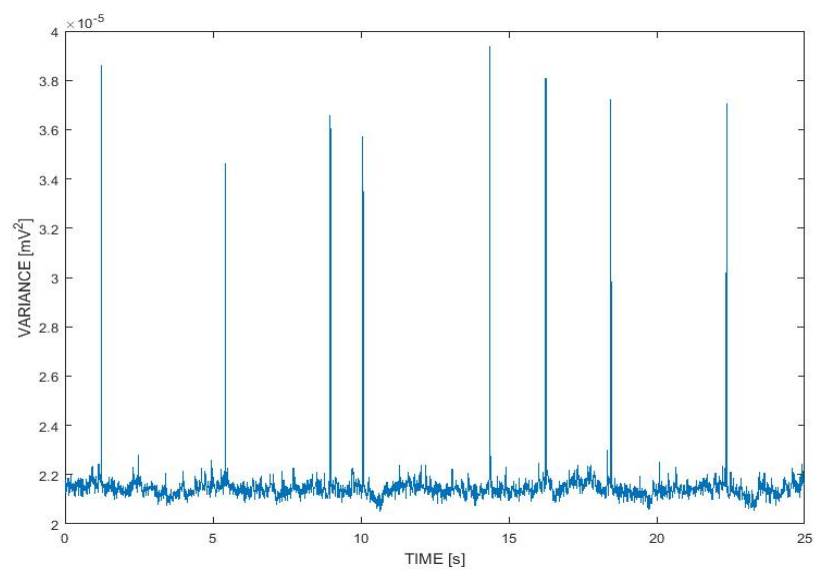
Obr. 6. Výběrové variance na úsecích délky 0.02 s pro soubor B.



Obr. 7. Výběrové variance na úsecích délky 0.02 s pro soubor C.



Obr. 8. Výběrové variance na úsecích délky 0.02 s pro soubor D.



Obr. 9. Výběrové variance na úsecích délky 0.02 s pro soubor E.

Projevy turbulentního proudění vidíme zřetelně v souborech B a E. V souborech A, C a D nic takového vidět není, variabilita výběrové variance se zdá být v rámci běžné statistické chyby. V souborech B a E jsou patrné výrony turbulentního proudění, a tyto jsou poměrně dobře časově oddělené - na rozdíl od turbulentních projevů v datech z Elektrárny Bohunice. Všechno závisí na tlaku, rychlosti proudění v potrubí a možná na dalších parametrech.

To co není vidět v obrázcích 5-9 je fakt, že data v souborech A-E byla naměřená s mnohem nižší přesností vzorkování. Nešlo jen o vzorkovací frekvenci, která byla 2 MHz, ta by možná byla postačující. Je možné, že kdyby tatáž data byla snímána s větší přesností, vypadaly by výsledky možná trochu jinak. Hodnoty signálu s nízkou velikostí byly zaokrouhlovány na nulu, což snižovalo odhadovanou varianci tam kde už byla nízká.

Závěr

Dosavadní výsledky analýzy naměřených dat jsou zatím pouze předběžné.

1. Zdroje akustické emise mají vesměs konstantní polohu a časově proměnný průběh. Jde o nestacionární zdroje, ovšem je docela pravděpodobné, že nejsou bodové. Nazdá se, že by se zdroje pohybovaly spolu s proudící párou, u níž jsme vypočetli přibližnou rychlost postupu 15 m/s. Zdroje se nepohybují, pouze se mění intenzita produkovaného signálu.
2. Míra nestacionarity akustické emise odpovídá projevům lokálního turbulentního proudění a odráží korozní poškození jednotlivých komponent na parovodní trase.
3. Časové zpoždění signálu z jednoho každého zdroje přicházejícího jednotlivé vlnovody můžeme dosud odhadovat pouze přibližně z rozměrů potrubní soustavy. Bylo by vhodné tato zpoždění prověřit podobně jako při studiu creepového poškození, viz zpráva č. 2369, pomocí uměle vytvořených akustických vln s ostrým náběhem. Takové měření by zároveň ukázalo na míru tlumení akustické vlny podél potrubí.
4. Rozhodně nečiníme žádné závěry o tom, do jaké míry je potrubí zkorodované. K tomu by bylo potřeba porovnání signálů z potrubí a kolen s různým stářím. Pouze se snažíme identifikovat místa kde dochází k lokálně turbulentnímu proudění v páře, a kvantifikovat jeho míru.
5. V souborech dat A-D nalézáme projevy turbulentního proudění v souborech B a E. Nízká přesnost vzorkování může negativně ovlivňovat vypovídací hodnotu dat. Optimální v současné době by bylo vzorkování s přesností 18 bitů.

Poděkování

Práce byla financována projektem MPO TRIO č. FV 10 645.

Literatura

[1] Koldovský Zbyněk, Tichavský Petr, Oja E. : [Efficient Variant of Algorithm FastICA for Independent Component Analysis Attaining the Cramer-Rao Lower Bound](#) , *IEEE Transactions on Neural Networks* vol.17, 5 (2006), p. 1265-1277