

MOŽNOSTI DETEKCE KAVITACE POMOCÍ AKUSTICKÉ EMISE NA VODNÍCH STROJÍCH S DŮRAZEM NA ÚSPORU ENERGÍÍ A PROVOZNÍ UDRŽITELNOST

POSSIBILITIES OF CAVITATION DETECTION USING ACOUSTIC EMISSIONS ON WATER MACHINES WITH AN EMPHASIS ON ENERGY SAVINGS AND OPERATIONAL SUSTAINABILITY

Jan Šifner ^{a)}, Václav Koula ^{a)} a Martin Hudec ^{b)}

^{a)} Zemědělské družstvo Rpety se sídlem ve Rpetech. DAKEL – Středisko technické diagnostiky

^{b)} Vysoké učení technické v Brně, Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana

Abstrakt

Pokročilé metody vyhodnocování akustické emise umožňují úspěšně eliminovat provozní šum zařízení a zaměřit vyhodnocení na určitý konkrétní problém. V tomto případě jde o vznik kavitačních bublin, které způsobují řadu problémů od abrazie materiálu až po vibrace stroje, které mohou vést až ke strukturálním poruchám. Monitorování kavitace při provozu stroje pomocí pokročilých metod akustické emise umožňuje detekovat vznikající kavitaci snáze a s mnohem větší citlivostí než při využití standardních metod detekce kavitace.

Informace získané snímáním akustické emise mohou sloužit provozovateli stroje nejen pro diagnostiku stroje a prediktivní údržbu, ale také, a to zejména pro ekonomické hodnocení dopadů kavitace v různých provozních režimech. Pokročilé systémy diagnostiky spolu s digitálním modelem tvoří základ při tvorbě „digitálního dvojčete“ zařízení.

Abstract

Advanced acoustic emission evaluation methods make it possible to successfully eliminate equipment operating noise and focus evaluation on a specific problem. In this case, it is the formation of cavitation bubbles, which cause a number of problems from abrasion of the machine material to vibrations, which can lead to structural failures. Monitoring cavitation during machine operation using advanced acoustic emission methods makes it possible to detect emerging cavitation more easily and with much greater sensitivity than when using standard cavitation detection methods.

The information obtained from the measurement of acoustic emission can be used by the machine operator not only for machine diagnostics and predictive maintenance, but also, in particular, for the economic evaluation of the effects of cavitation in various operating modes. Advanced diagnostic systems, together with the digital model, form the cornerstone of the creation of the "digital twin" device.

Úvod

Snímání akustické emise (AE) patří do skupiny nedestruktivních defektoskopických zkoušek. Metoda je založena na snímání elastického vlnění, které vzniká v důsledku dynamických procesů objevujících se v materiálu při jeho zatěžování vnitřními nebo vnějšími silami. To umožňuje sledovat defekty s citlivostí téměř nedosažitelnou jinými metodami. AE je metoda integrální, která při vhodně rozmístěných snímačích umožňuje provádět najednou inspekci rozměrných a strukturálně komplikovaných zařízení. Donedávna limitující pro použití AE byl provozní šum monitorovaného zařízení. Klasickými metodami vyhodnocování AE bylo obtížné vyhledávat emisní události v provozním šumu. Tento nedostatek odstraňují pokročilé metody vyhodnocení AE rozpracované ve Středisku technické diagnostiky DAKEL.

Primárně se AE využívá pro detekci strukturálních defektů v pevných materiálech, ale stejně tak dobře ji lze využít pro detekci kavitace. Kavitační je vznik dutin v kapalině při dostatečně velkém poklesu tlaku. Ten může být důsledkem lokálního zvýšení rychlosti (hydrodynamická kavitační), případně průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (akustická kavitační). Dutina je zpočátku vyplněna vakuem, později se vyplní párou nebo do ní mohou difundovat plyny z okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku, který kavitační vytvořil, dochází k implozi a dutina kolabuje za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál. Kavitační vzniká například na lopatkách lodních šroubů, turbín, na čerpadlech a dalších zařízeních, která se velkou rychlostí pohybují v kapalině.

Imploze dutin při kavitační způsobuje nejen zvukové efekty, ale také snižuje účinnost strojů a může způsobit i mechanické poškození povrchových vrstev konstrukčních materiálů. Zvukové projevy kavitační mají charakter ultrazvukového signálu a je možné je zaznamenávat a vyhodnocovat s využitím diagnostických systémů pro oblast akustické emise (AE).

Pokusy o detekci kavitační pomocí měření akustické emise v Československu sahají do 70. let minulého století. Profesor Oldřich Taraba se svým týmem na Elektrotechnické fakultě ČVUT v Praze konstruoval mimo jiné i přístroje umožňující detekci a jednoduchou kvantifikaci kavitačních jevů.

DAKEL – středisko technické diagnostiky ZD Rpety se zabývá využitím AE v nedestruktivní diagnostice (tlakové zkoušky, namáhání strojírenských konstrukcí) více než 30 let. Současně ale také vyvíjí nová zařízení a systémy pro diagnostiku AE. Spolupracuje s vysokými školami a vědeckými institucemi. Výsledkem jsou systémy s vysoce citlivými snímači, rozlišením 18 bitů a vzorkovací frekvencí 15 MHz. Díky unikátním zesilovačům je možné dosáhnout celkové zesílení měřicího řetězce až 130 dB. A právě takový systém jsme použili ve spolupráci s Fakultou strojního inženýrství VUT v Brně při ověřování možnosti studia kavitačních jevů s využitím metod diagnostiky AE, protože kavitační pokládáme, zejména v oblasti čerpadel a turbín, za důležitý problém.



Obr. 1: Měření v laboratoři Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana (v popředí aparatura IPL3x4)

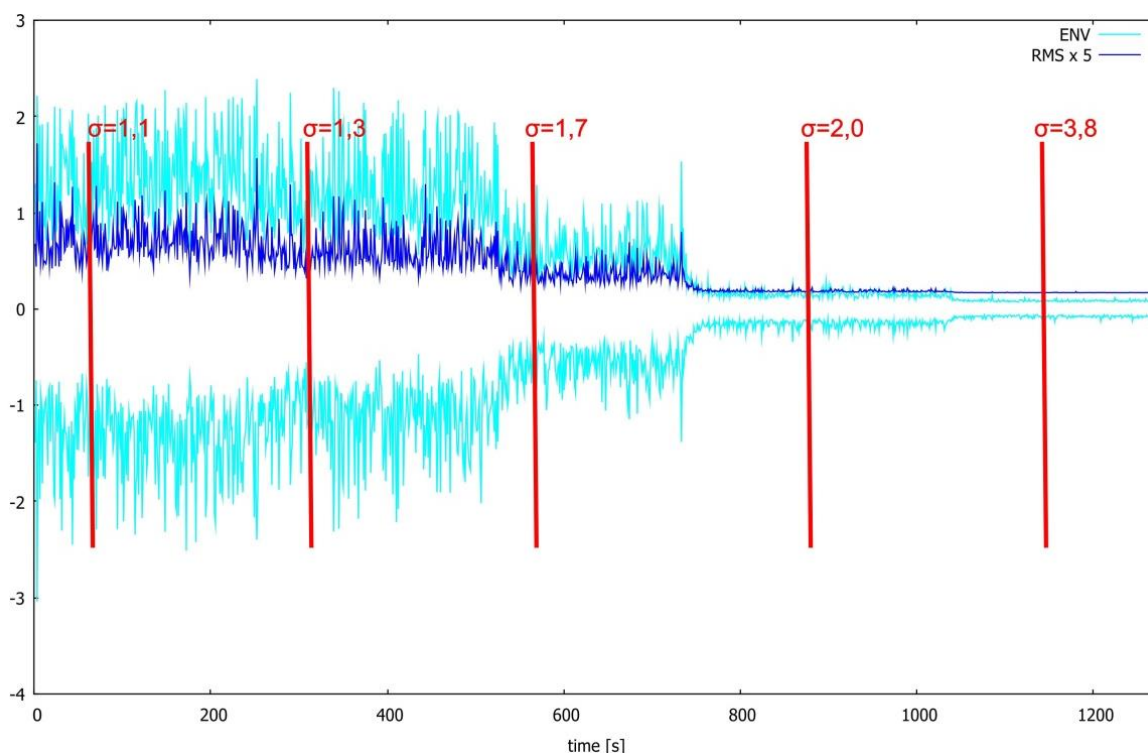
Experimentální a testovací podmínky

V laboratoři Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana Energetického ústavu jsme testovali na vírové turbíně možnosti diagnostiky kavitační s využitím našich systémů pro AE.

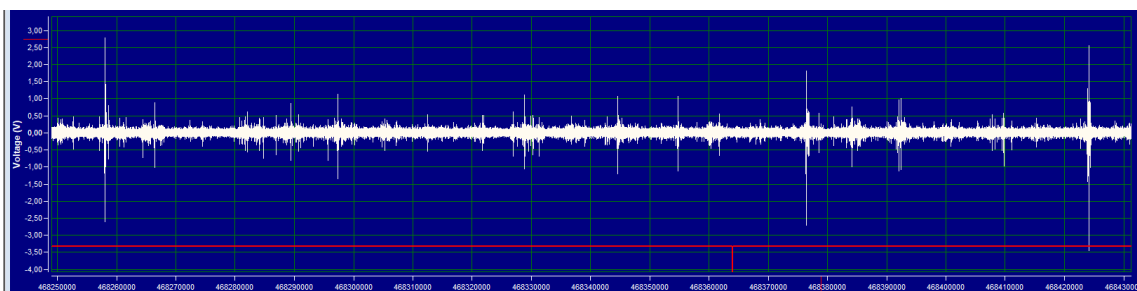
Vírová turbína byla osazena standardním systémem snímání hydraulických a mechanických veličin, s jejichž využitím byl monitorován a řízen provozní stav. Současně byly osazeny 3 snímače dynamických veličin, piezoelektrický snímač tlaku Kistler 211B6, snímač zrychlení PCB 352A60 a mikrofon G.R.A.S 40PH. Měřicí ústředna NI PXI s kartou PXIe-4492 s vzorkovací frekvencí 200 kHz.

Provozní data pro jednotlivé měřicí body a hodnoty kavitačního součinitele σ byla snímána a průběžně ukládána s frekvencí 1 kHz nebo 10 Hz.

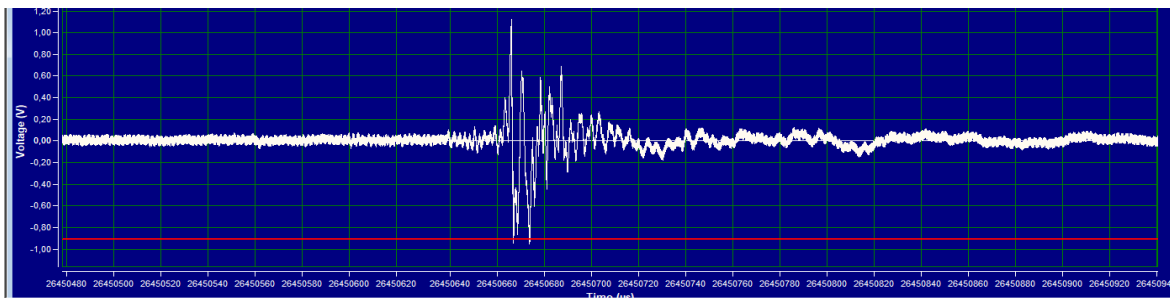
Měření AE probíhalo aparaturou IPL3x4 (4 kanály, 18 bit, 15 MHz) na daném modelu Vírové turbíny s uniformní lopatkovou mříží, 6 lopatek, nastavených na 6° , postupně byly nastavovány provozní parametry, které odpovídaly hodnotám veličiny σ od tzv. „superkavitace“ při $\sigma = 1,1$ až po stav bez kavitace při $\sigma = 3,8$. Byly použity kontaktní snímače DAKEL MDK13AS42 s vestavěným předzesilovačem 42 dB.



Obr. 1: Obálka (tyrkysová) a RMS (modrá) záznamu signálu kavitace při 102,5 ot/min zaznamenaná aparaturou IPL3x4

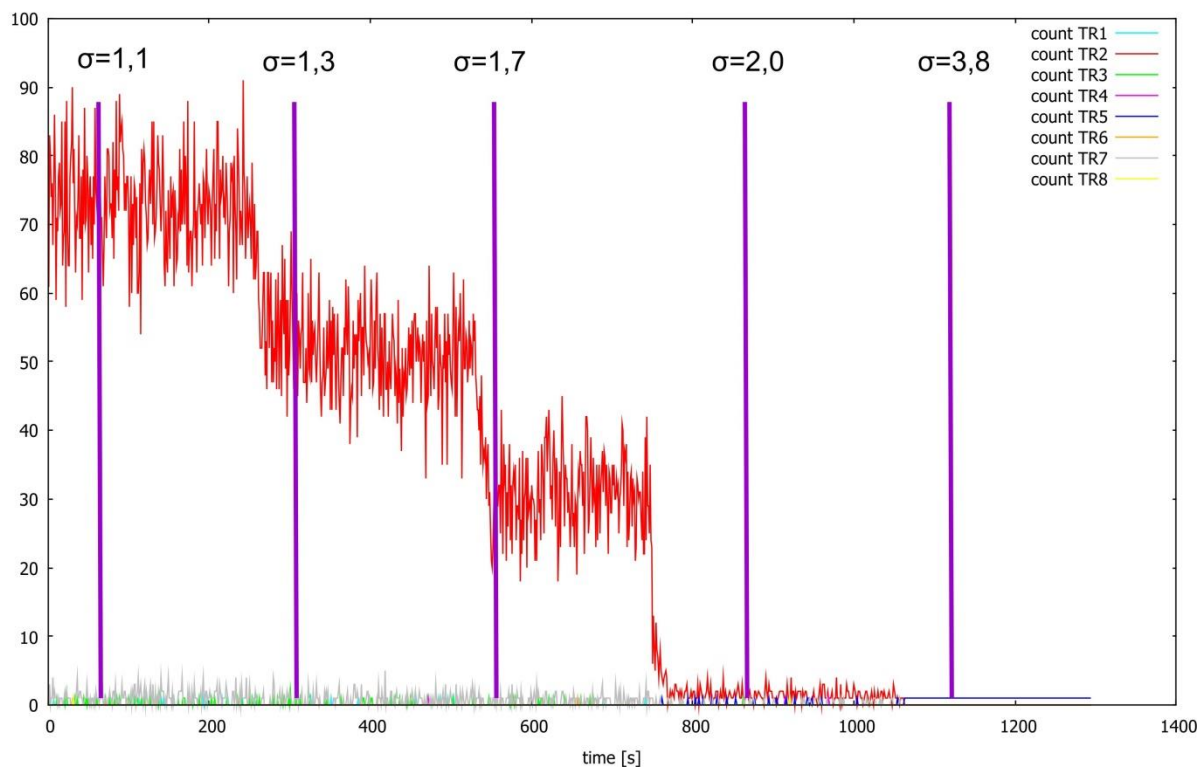


Obr. 2: Zaznamenaný signál AE kavitace – imploze kavitačních dutin při $\sigma = 1,1$



Obr. 3: Detail signálu AE – imploze kavitační dutiny při $\sigma = 1,1$

Experimenty ukázaly, že s využitím snímání je AE možné detekovat, zaznamenat a analyzovat akustické projevy kavitace. V laboratorních podmínkách je možné zaznamenat jednotlivé imploze kavitačních dutin (obr. 3 a obr. 4). Pokud jde o vyhodnocení míry kavitace, nabízí se využít standardní postupy AE, tedy záznam a vyhodnocení obálky a RMS signálu AE. Rozeznání jednotlivých fází je obtížné díky tomu, že se v signálu vyskytují vysoce energetické špičky v důsledku implozi kavitačních bublin.



Obr. 4: Vyhodnocení stop v signálu pomocí umělé inteligence (počet nalezených stop za 1 s, pravděpodobnost detekce 90 % – stopy, u kterých je nižší pravděpodobnost správného rozeznání byly potlačeny)

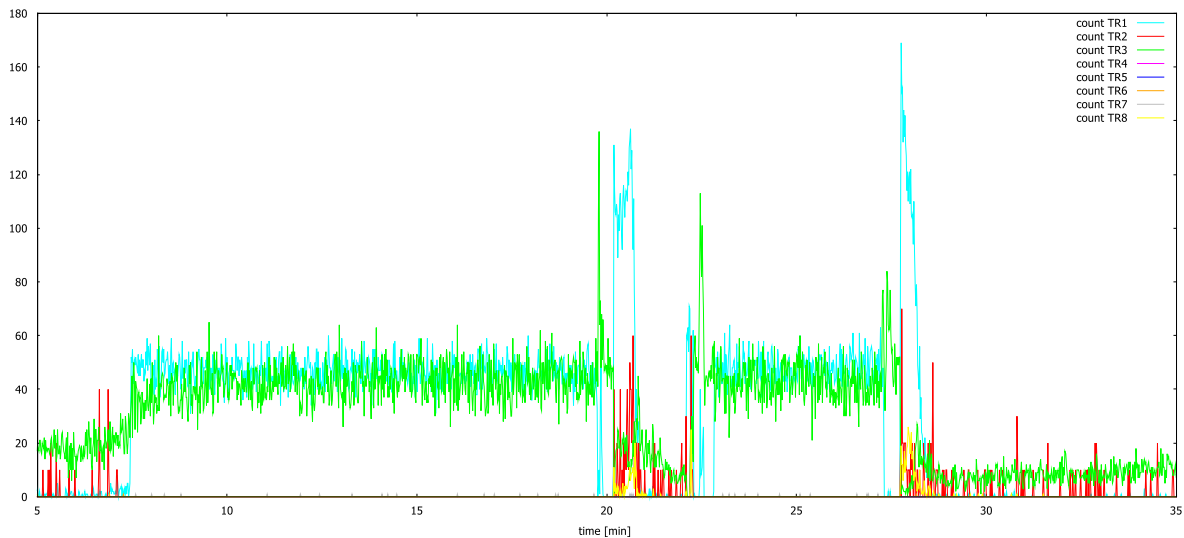
Zdaleka nejpřesnější pro detekci a určení míry kavitace je vyhodnocení signálu pomocí nástrojů umělé inteligence. Na obr. 5 je vidět, že křivka červené stopy (trace 2) přesně odpovídá změnám σ . Modrá křivka (trace 5) odpovídá přestavování spádu v modelu pomocí stlačeného vzduchu (až do $\sigma = 2$ je v systému podtlak).

Metoda vyvinutá DAKEL využívá k analýze signálu AE neuronovou síť, která v signálu vyhledává a rozlišuje typové „stopy – trace“ – předpokládané projevy monitorovaného jevu. V tomto případě byla využita síť, která byla naučena na vyhledávání 8 různých „stop“. Tato analýza signálu AE se ukázala jako použitelná i v případě, kdy je signál AE značně zarušen provozním šumem (proudění vody, činnost čerpadel modelu atd.).

Nasazení pokročilých metod v reálném provozu

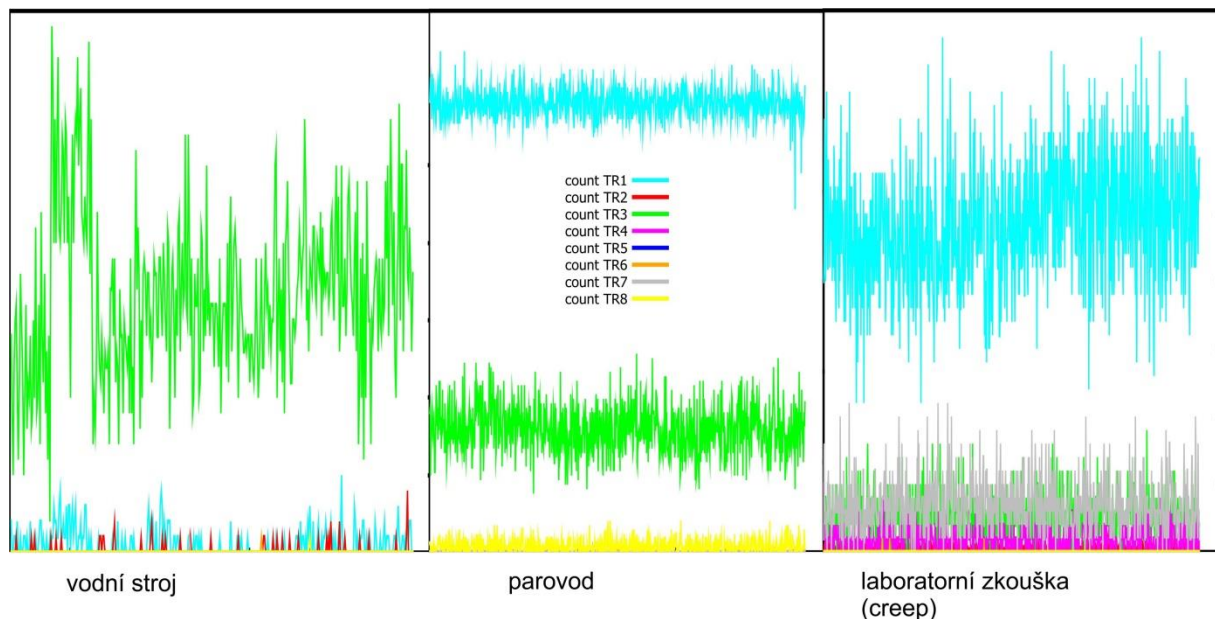
DAKEL měl k dispozici krátká kontinuální data AE z TG2 EDS (přečerpávací elektrárna Dlouhé Stráně). Ačkoliv tato data nebyla primárně získaná pro tento účel a byla měřena jinou aparaturou (průmyslový systém ZEDO), podrobili jsme je stejné analýze jako data z laboratoře.

Snímače byly umístěny na lopatkách rozváděcího kola a účelem měření bylo monitorovat případné strukturální defekty na těchto lopatkách. Zatím co ENV ani RMS neposkytují v tomto případě žádnou využitelnou informaci týkající se kavitace, vyhodnocení signálu metodou DAKEL NN přináší velmi zajímavé informace (obr. 6).



Obr. 5: Zpracovaný signál pomocí umělé inteligence z EDS TG2 se zachycením regulace výkonu – je vidět, že se při nižších výkonech objevují náznaky kavitace (červená stopa), současně se při přestavování objevuje žlutá stopa, která souvisí s mechanickým namáháním lopatek. Tyrkysová a zelená stopa zřejmě souvisí s průtokem vody

Pokročilá analýza ukazuje, že v určité fázi přestavování stroje dochází k silné kavitaci – červená stopa (TR2) a současně dochází k prudkému nárůstu TR8 (žlutá), které zřejmě souvisí s mechanickým namáháním.



Obr. 6: Srovnání vyhodnocení různých zdrojů signálu systémem DAKEL NN

Na obr. 7 je vidět srovnání různých zdrojů signálu a jejich vyhodnocení systémem DAKEL NN. Lze tím doložit, že různé zdroje signálu produkují různé stopy AE, na základě kterých, lze sledovat procesy probíhající v systému.

Digitální modely vodních strojů a jejich vztah k měřením AE a prediktivní údržbě

Monitoring akustiky a vibrací je součástí nastupujícího trendu digitalizace vodních elektráren, do kterého dále patří např. i predikce životnosti v závislosti na kumulovaném zatížení, tvorba digital twin (digitálního dvojčete stroje) pro sledování a predikci budoucího chování turbíny nebo spojení provozních charakteristik stroje s aktuálními parametry na energetické burze a s tím související inteligentní řízení stroje pro optimální zisk.

U každého stroje, který má být v pohotovostním stavu, musí být zajištěna i jeho údržba, která by měla být efektivní a spolehlivá s jistými prvky prediktivity. Nutným předpokladem je efektivní technická diagnostika. S rozvojem výpočetní techniky lze do technické diagnostiky snadněji nasazovat sofistikovanější metody například z oblasti metod umělé inteligence, včetně implementace do jednocelových mikrokontrolérů, které mohou snadno online monitorovat stav stroje. To je mimo jiné i v souladu s konceptem Průmysl 4.0. Tento koncept v první fázi přichází se shromažďováním více či méně užitečných dat pro potřeby prediktivní údržby. Vzhledem k jejich množství je vhodné pro jejich zpracování umělou inteligenci (UI).

Hlavním rozdílem a výhodou oproti klasickým metodám je schopnost učit se, tzn. na základě historických dat interpretovat symptomy k určení poruchy (klasifikace poruch) a její lokalizaci a následně na základě historických údajů a aktuálního vývoje predikovat budoucí stav. To ovšem předpokládá správný výběr učebních dat tak, aby zahrnovaly co nejvíce klasifikovaných situací.

Závěr

Vhodné měřicí zařízení spolu s pokročilými metodami vyhodnocení signálu AE je schopné indikovat míru kavitace na zařízení. Prostřednictvím těchto měření a jejich spojení s digitálním modelem je možné odhadnout míru vlivu na stroj. Význam systémů AE pro monitorování kavitace spočívá nejen ve včasném odhalení možných problémů, ale umožňuje nastavit optimální pracovní a provozní režimy reálných strojních zařízení.

Pravidelná měření AE při provozu stroje mohou predikovat vývoj stavu stroje. To umožní například omezit vznik poškození a závad způsobených kavitací. V praxi to napomáhá napláňovat výměnu dílů nebo upravit provozní režim stroje tak, aby se prodloužil interval mezi revizemi nebo opravami. Současně to umožňuje optimalizovat provozní režim u turbín nebo dlouhodobě běžících rotačních čerpadel s cílem, aby byl maximálně efektivní z hlediska výkonu a účinnosti.

Literatura

- [1] Koula, V., Šifner, J. (2019): *Zkouška využití diferenčních členů pro monitorování lopatek TG2 v elektrárně Dlouhé Stráně Období: 07/2019*. Technická zpráva, EDS-5b, DAKEL, Rpety.
- [2] Koula, V., Šifner, J., Pozdílek, M. (2020): *Pokročilá analýza signálu AE s využitím umělé inteligence*. Technická zpráva, DAKEL, Rpety.
- [3] Závorka, D., Rudolf, P., Habán, V. (2020): *Akustická diagnostika*. Závěrečná zpráva, Vysoké učení technické v Brně, Brno.