

TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

1

**Monitoring gis – postupy,
prostředky, modelová řešení**

2

**Vývojové trendy v oblasti
motorových olejů pro spalovací
motory osobních a lehkých
užitkových vozidel**

3

**Energetické ukazatele
z frekvenčního spektra
vibrodiagnostického signálu pro
klasifikaci poruch pomocí metod
umělé inteligence**

4

**Comparison of OCT and IRNDT
hidden defect inspection
technologies**

Vážení přátelé technické diagnostiky, na úvod dovolu, abych vás přivítal v roce 2025. Ačkoliv celá společnost prochází v současné době celkem turbulentním obdobím a rok 2024 nebyl pro nikoho příliš snadný, asociace si v minulém roce připsala pár zlomových událostí.

Ze všeho nejdřív je určitě zapotřebí zmínit rozšíření portfolia odborných skupin. V roce 2024 byla do struktury asociace přidána nová odborná skupina diagnostiky paliv. Celkově jsme tedy počet odborných skupin rozšířili na šest. Paliva nás totiž budou neoddiskutovatelně provázet další řadu let a jejich diagnostika rozhodně má smysl, stejně jako přijetí nové odborné skupiny do struktur asociace.

Dalším zlomovým krokem je naše expanze mimo Českou republiku, vzniklo historicky první schválené školicí pracoviště mimo naše území. Jedná se o schválené školicí pracoviště pro tribodiagnostiku ECOFIL s.r.o. Michalovce. Jedná se tedy o první pracoviště zaštitěné asociací, které vzniklo na Slovensku. Pro nás jde o velký krok a věříme, že s expanzí mimo naše území rozhodně nekončíme. Dalším prospěšným bodem bylo zaštitění našeho projektu TRIBO-DIAGNOSTIK JUNIOR Ministerstvem průmyslu a obchodu pro školní rok 2025/2026. Prostřednictvím programu chceme cílit na studenty středních odborných škol, a alespoň částečně tak přispět k vychovávání talentů v oborech technické diagnostiky už od středoškolského věku.

Rok 2024 byl tedy z řady ohledů pro asociaci velmi zlomový. Nyní vám již popřeju příjemné čtení a věřím, že z dodaných materiálů načerpáte nové vědomosti či alespoň inspiraci.

Ondřej Švec DiS., CTD.

Prezident Asociace technických diagnostiků ČR, z.s.



Monitoring gis – postupy, prostředky, modelová řešení

Ing. Václav STRAKA

Ing. Antonín KRŇOUL

Pavel ZÍTEK

TMV SS spol. s r.o.

Anotace:

V reálné praxi se stále více vyskytují plynem izolované rozvodny, souhrnně označované jako GIS. Jejich společným prvkem je použité izolační médium SF6. Tyto rozvodny se vyznačují poměrně vysokou spolehlivostí, avšak v případě poruchy i poměrně nákladnými servisními zásahy s delší časovou prodlevou. S těmito rozvodnami se můžeme setkat jak na úrovni ZVN (přenosová soustava, 420 a 220 kV), tak v oblasti distribuce a průmyslových subjektů na úrovni 110 kV. Autoři jsou si vědomi aplikací GIS prvků na úrovni VN, nicméně tato oblast se v některých aspektech odlišuje a může jí být v budoucnu věnován samostatná materiál. Tento text je věnován monitoringu GIS se zaměřením na problematiku částečných výbojů (PD). Mezi GIS je možno zahrnout i kompaktní plynem izolovaná pole (vypínač, odpojovač, zemnič, PTN, PTP) či plynem izolované vodiče v průmyslových aplikacích.

In real practice, gas-insulated substations, collectively referred to as GIS, are increasingly occurring. Their common element is the SF6 insulating medium used. These substations are characterized by relatively high reliability, but in the event of a malfunction, relatively expensive service interventions with a longer time delay. We can meet these substations both at the EHV level (transmission system, 420 and 220 kV) and in the area of distribution and industrial entities at the 110 kV level. The authors are aware of the applications of GIS elements at the MV level, however, this area differs in some aspects and may be devoted to a separate material in the future. This material is dedicated to GIS monitoring with a focus on the issue of partial discharges (PD). GIS can also include compact gas-insulated bays (circuit breaker, disconnecter, earthing switch, CT, VT) or gas-insulated conductors in industrial applications.

1. Úvod

GIS koncepce získaly postupem času významný podíl v oblasti distribuce, přenosu, výroby a spotřeby elektrické energie. Hlavní předností tohoto řešení je kompaktnost provedení, které zabere cca 1/7 plochy v porovnání s konvenčním AIS provedením. Nezanedbatelným parametrem je výrazně zvýšená odolnost vůči externí kontaminaci v silně znečištěném prostředí. Jedná se o poměrně spolehlivé řešení s nízkou poruchovostí, nicméně pokud k poruše dojde, mívá obvykle výraznější celkové dopady, než je ve vzduchem izolovaném provedení prvků. Současné je

potřeba vzít v potaz enviromentální aspekty vztahující se k SF6 včetně možných dopadů na zdraví pracovníků. Velmi častým signálem rozvíjející se poruchy je výbojová aktivita v rámci GIS. Obvykle signalizuje přítomnost některých z následujících příčin:

- nevyhovující dílenské zpracování,
- kovové výstupky/hrany,
- volné metalické částice,
- plovoucí potenciál,
- mezery, dutinky,
- znečištění,
- nedostatečná hustota či tlak izolačního média (obvykle sledováno densostaty),
- nedostatečná procentní čistota SF6 (obvykle sledováno v rámci prediktivní údržby a diagnostiky).

Je patrné, že příčin výbojové aktivity je vícero, důležité je ovšem zachycení prvních známek rozvíjející se poruch, čímž lze zabránit další progresi poruchového jevu či následné nákladné poruše. Nezanedbatelný vliv mají i rozkladné produkty SF6 vznikající při jeho degradaci, které jsou vysoce agresivní a mohou ovlivňovat nejen metalické prvky, ale též epoxidové přepážky mezi jednotlivými plynotěsnými oddíly. Lze zjednodušeně konstatovat, že rozkladné produkty generované poruchou sekundárně urychlují další degradaci postiženého oddílu GIS. I proto je velmi prospěšný včasný záchyt vznikajícího jevu. Na obrázku 1 můžeme vidět rozdělení příčin poruch, ze kterého vyplývá nejen zásadní podíl dielektrických poruch (závad na izolačním systému, ale sekundárně i právě detekovatelnost těchto závad pomocí výbojové aktivity).

2. Detekční metody

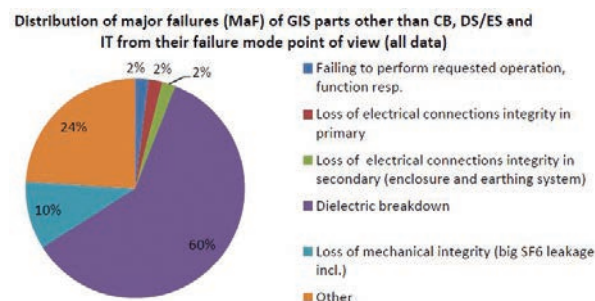
Pomocí detekce a monitoringu výbojové aktivity jsme tedy schopni pokrýt nejen majoritní mechanismy poruch, ale též dominantní část konstrukčního uspořádání GIS.

Pokud bychom se obecně podívali na projevy poruch a způsoby detekce, mohli bychom je rozdělit dle shrnutí na obrázku 3:

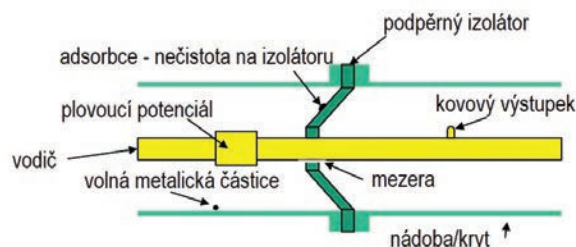
Výbojovou aktivitu můžeme detekovat několika způsoby, z hlediska monitoringu se nejlépe jeví detekce akustických a elektrických příznaků výbojové aktivity. Detekce elektrických výbojů se využívá i při FAT testech dle IEC 60270, nicméně tento text je věnován primárně monitoringu jako takovému.

Elektronové laviny v atmosféře SF6 mají velmi strmou dobu náběhu hluboko s časy pod 1 ns. V místě vzniku se takové pulzy vyznačují rovnoměrným rozložením amplitudového spektra o frekvenci až 2 GHz a více. Pokud jde o základní konstrukční principy GIS, plynotěsné oddíly nabízí relativně nízký útlum UHF signálů přenášených přes pole GIS. Na přímých úsecích sběren

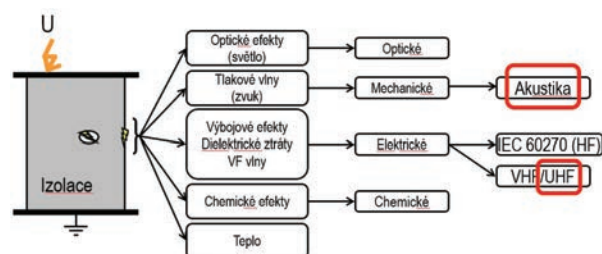
je můžeme předpokládat v rozsahu 2 dB/m. Avšak konstrukční uspořádání, stejně jako vnitřní vodič, zavádí změnu impedance a tím i odrazy signálu. Příruby, typické kolenové kusy a další nespojitosti částí GIS, které fungují jako vlnovod UHF, způsobují také odrazy. V časové oblasti se signál ČV, který byl původně jediným impulsem, jeví jako silnější širokopásmový signál kvůli odrazům a vzhledem k relativně nízkému útlumu. Dále tento útlum způsobuje obálku e-funkce UHF signálu – viz obrázek 4.



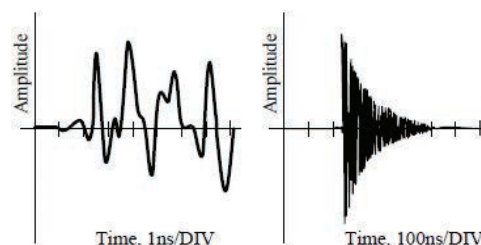
Obrázek 1 – Přehled příčin poruch [1]



Obrázek 2 – Detekovatelné příčiny poruch pomocí detekce částečných výbojů

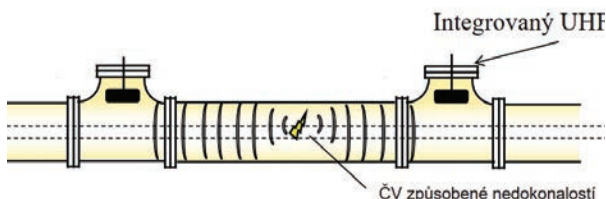


Obrázek 3 – Projevy poruch



Obrázek 4 – Časový průběh signálu ČV a jeho následný útlum

Můžeme konstatovat, že GIS funguje na jedné straně jako poměrně efektivní vlnovod, nicméně geometrie GIS způsobující odrazy může znesnadňovat interpretaci. Obecně lze konstatovat, že signál nemusíme detekovat přímo v místě vzniku, nebo v plynotěsném oddílu, kde vzniknul. Signál je detekovatelný i v určité vzdálenosti od místa vzniku, je však zapotřebí počítat s jeho útlumem i vztahem mezi vzdáleností a citlivostí detekce. Schematicky si toto řešení lze představit podle obrázku 5.



Obrázek 5 – Šíření UHF signálu

3. Instalace a druhy detekčních prvků

Signál jako takový se šíří a je obecně detekovatelný. Je zapotřebí zvážit druh senzoru a jeho instalaci.

3.1. Integrované UHF senzory

Jedná se o nejlepší řešení z hlediska citlivosti (SNR). Obvykle jsou instalovány do GIS v rámci výroby, a to až již na základě požadavku zákazníka, tak na základě přípravy na FAT testy či uvádění do provozu. Vzhledem k ceně rozvodny je jejich cena prakticky zanedbatelná. Tyto senzory obvykle pracují ve frekvenčním rozsahu 200–2 000 MHz. Pokud by měl uživatel zájem o jejich dodatečnou instalaci, je to možné pouze v rámci úkonů zahrnujících otevření plynotěsného oddílu. Příklad takového řešení demonstruje obrázek číslo 6.

Tyto senzory jsou velmi dobře využitelné i pro diagnostiku pomocí přenosných přístrojů – až již v rámci kontrol definovaných ŘPÚ, nebo při diagnostice vyvolané poruchovými jevy.



Obrázek 6 – Integrovaný UHF senzor

3.2. Okenní senzory

Velmi často se na GIS úrovni VVN a ZVN můžeme setkat s inspekčními okny. Jedná se o průzory nainstalované na plynotěsný oddíl, které zaručují jeho těsnost, současně ale umožňují zrakovou inspekci vně rozvodny. Mezi jejich vlastnosti patří i poměrně dobrá propustnost UHF signálu. Lze je proto s úspěchem využít pro dodatečnou instalaci UHF senzoru. Jedinou podmínkou (limitace daná frekvenčním pásmem signálu) je minimální průměr 60 mm. Okenní senzory je tedy využít pro dodatečnou instalaci UHF senzorů. Průchodem skrz inspekční okno samozřejmě dojde k útlumu procházejícího signálu, útlum je ovšem poměrně malý (v porovnání velikosti signálu s vnitřní UHF anténou) a nezabraňuje efektivnímu detekování signálu generovaného výbojovou aktivitou. Příklad okenního průzoru a okenního senzoru zachycují obrázky 7, 8 a 9.

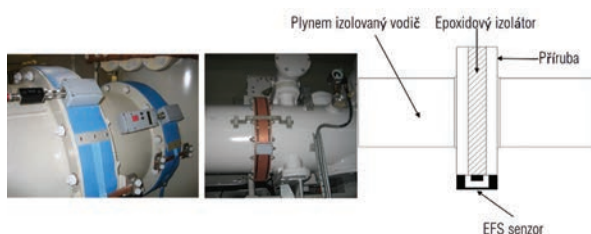


Obrázky 7, 8, 9 – Příklad okenního senzoru

3.3. Externí přírubové senzory

V případě, že GIS není osazena dostatečným množstvím (nebo vůbec) vnitřních senzorů, případně inspekčních oken, existuje ještě varianta tzv. přírubový senzorů (EFS). Tyto senzory lze nainstalovat na nestíněné příruby GIS i za provozu rozvodny, tedy pod napětím. Ukázka takového řešení je na obrázku 10.

Je zapotřebí uvést, že přírubové senzory mají o něco nižší citlivost v porovnání s integrovanými UHF senzory, nicméně jedná se o velmi vhodné řešení, kdy rozvodna neobsahuje vnitřní senzory. Je možno takto instalovat monitoring i na GIS, které tyto antény nemají, případně nedisponují okenními průřazy.



Obrázek 10 – Příklad dodatečně montovaného přírubového senzoru

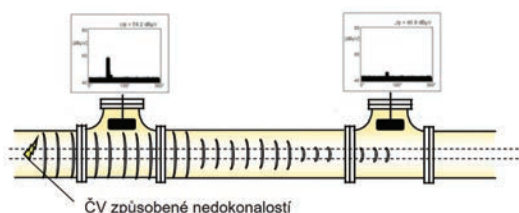
4. Kalibrace a citlivost

Abychom mohli na monitorovacím systému spolehlivě zjišťovat trigovací úrovně, je zapotřebí při uvádění do provozu ověřit vhodnost instalace, funkčnost senzorů a vypovídající hodnotu. Vlastní monitoring bývá popisován jako „nekonvenční metoda měření“. Tento postup je dostatečně popsán v materiálech CIGRE TBA 654 a TF 15/33.03.05. Při uvádění do provozu se nejedná o kalibraci jako takovou (z fyzikálních příčin ani není možná), ale o proces, který bychom mohli nazvat jako zkouška citlivosti [2].

4.1. Laboratorní měření

Pokud je GIS vybavena vnitřními senzory, provádí se obvykle ve výrobě dvě sady měření:

- definované IEC 60270 (měření výbojové aktivity v GIS),
- nekonvenční UHF měření.

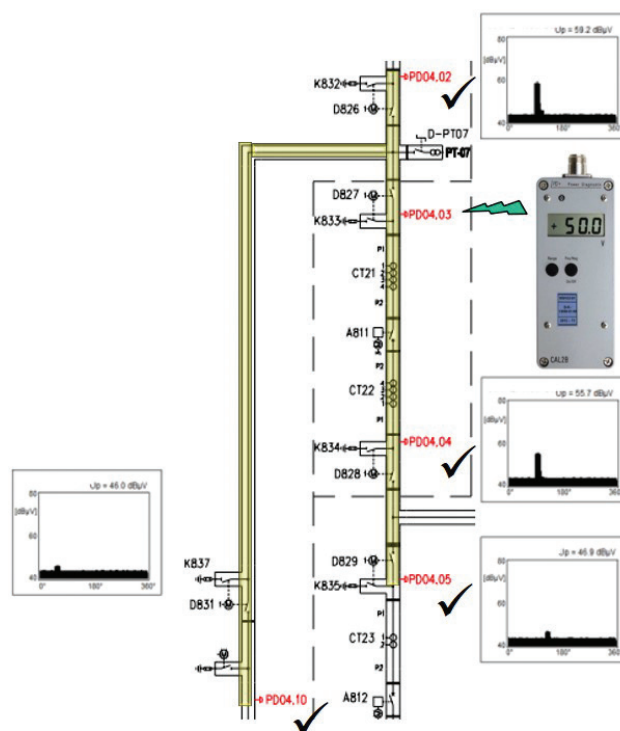


Obrázek 11 – Detekce signálu při laboratorních měřeních

Schéma šíření signálu a jeho detekce zobrazuje obrázek 11. Cílem je ověření parametrů rozvodny a současně i citlivost vnitřních senzorů (pokud jsou zabudovány). Je třeba vzít v potaz, že obdržené výsledky není možno chápat jako typové, ale jsou validní výhradně pro danou GIS, konkrétní plynotěsný oddíl (či sekci) a určitý typ snímače. Obdržené výsledky není možno zobecnit. Důvodem je individuální charakteristika šíření signálu vzhledem k typologii GIS.

4.2. On-site měření

Na rozvodnu je připojen zdroj umělého signálu (kalibrátor částečných výbojů) a je sledováno, zda se projeví nad úrovní šumu nejméně na senzorech v přiléhajících sekcích či nejbližších měřicích bodech. Obvykle se užívá generování hodnoty 5 pC. Takový postup je opakován ve všech měřicích bodech. I když je v tomto případě známo, jaký má „částečný výboj“ velikost, není možno zaměřovat se skutečným měřením velikosti částečného výboje. Jedná se skutečně pouze o kontrolu schopnosti detekce projevu o velikosti 5 pC nebo vyšší, obdobně jako je znázorněno na obrázku 12.



Obrázek 12 – Zkouška citlivosti na GIS

5. Struktura monitorovacího systému

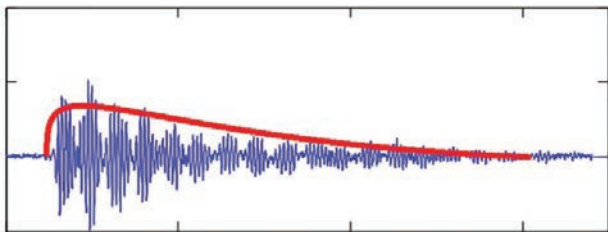
V předchozích kapitolách byla popsána problematika výbojové aktivity, vlastní senzory i postup, jak ověřit jejich citlivost v očekávané míře. Následující část bude věnována vlastní struktuře monitorovacího systému.

5.1. Předběžné zpracování signálu

Jak bylo uvedeno v předešlých částech, částečný výboj se projevuje signálem o frekvenčním rozsahu až do 2 GHz. Takový signál je nejenom objemný z hlediska dat, ale též je nutno vzít v potaz, že při přenosu signálu o takto vysoké frekvenci bude docházet k zásadnímu útlumu a není možno jej přenášet na vzdálenosti větší než v malých jednotkách metrů. V tomto případě existují dva možné postupy.

- Digitalizace signálu přímo u senzoru – Tento postup se jeví zdánlivě výhodným, nicméně znamená (vzhledem k počtu měřicích bodů na GIS) velkou finanční náročnost na instalaci, nebo blízkou instalaci vyhodnocovacích jednotek.
- Konverze signálu do nižších frekvencí (do cca 1 MHz) vytvořením obálky signálu (viz obrázek 13) umožňuje přenášet signál běžným koaxiálním kabelem na vzdálenosti v řádech vyšších desítek metrů bez zásadního útlumu.

Právě řešení pomocí předzpracování signálu vytvořením obálky umožňuje nákladově efektivní řešení monitoringu bez



Obrázek 13 – Vytvoření obálky vysokofrekvenčního signálu

Obrázky 14 a 15 – Příklad venkovní instalace



ztráty vypovídající hodnoty. Současně může konvertor zajišťující předběžné zpracování signálu sloužit jako přepětová ochrana v případě vnějších událostí, případně jako výsledek spínání v rozvodně. To je obzvláště vhodné při venkovních instalacích.

Příklad takové instalace ve vnějším prostředí zachycují obrázky 14 a 15, na nichž lze pozorovat propojení přepětové ochrany a jednotky zajišťující předzpracování signálu.

5.2. Ochrana proti rušení

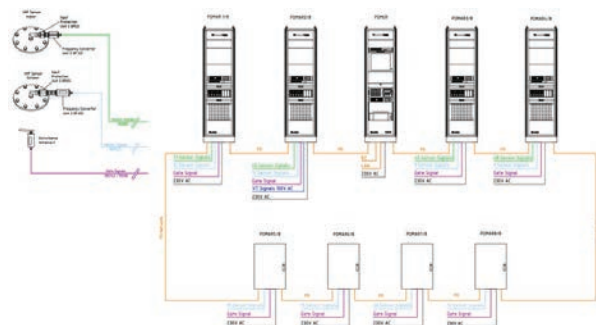
Jedním z klíčů vypovídací hodnoty monitorovacího systému není jen vlastní citlivost, ale současně i odolnost vůči vnějšímu rušení, které v prostředí VVN a ZVN rozveden není pouze statický šum, ale je generováno spínáním prvků rozvodny, jako jsou hlavně odpojovače a vypínače. Taky mohou generovat zdánlivé události, které však nejsou primárně spojeny s hledanou výbojovou aktivitou. Jako ochrana proti těmto jevům se využívá tzv. gating – spočívá v označení (vynechání) úseků měření, kdy je signál ovlivněn právě spínáním. Pro tyto účely se využívá antén pro rušení šířené vzduchem a současně proudových transformátorů instalovaných na uzemnění. Příklad instalace nalezneme na obrázku 16.

Právě možnost vyloučení signálů způsobených spínáním v rozvodně eliminuje tvorbu falešných alarmů a znevěrohodnění naměřených dat. Obsluha monitoringu tak může mít plnou důvěru v naměřené a detekované signály.

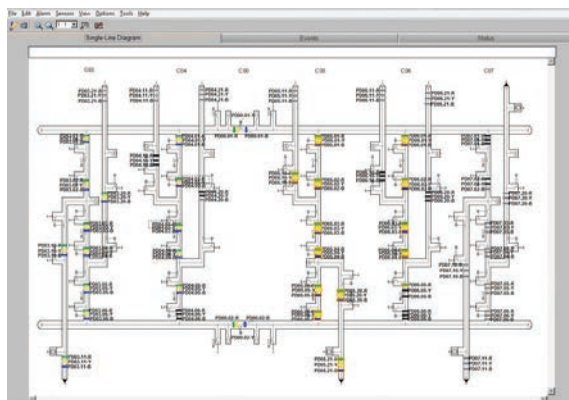
5.3. Akvizice dat

Nedílnou součástí jsou HW komponenty zajišťující akvizici signálů a dat a jejich prvotní hodnocení. Jedná se o soubory vstupů pro signál z jednotlivých senzorů, sensor pro gating, synchronizační vstup a komunikační interface sloužící pro vzdálenou komunikaci, propojení několika jednotek či komunikaci s nadřazenými systémy. Vzhledem k předzpracování signálu může mít jednotka připojené senzory až ze vzdálenosti větších desítek metrů bez ztráty citlivosti a vypovídací hodnoty. Součástí je též automatické generování alarmů, ať již v podobě binárních signálů či ve formě protokolu, například IEC 61850. Pokud by se jednalo o venkovní instalaci, součástí by bylo i vytápění řídicí skříně.

Obrázek 16 – Příklad instalace „gating“ antény poblíž jednotky předzpracování signálu



Obrázek 17 – Příklad instalace monitorovacího systému



Obrázek 18 – Schematické zobrazení aktivity a rozložení senzorů na GIS

Pokud bychom se zaměřili na topologii monitorovacího systému u rozsáhlejšího monitoringu, mohli bychom jej mít v sestavě obdobné obrázku 17. Jedná se o sestavu zahrnující 4 vnitřní a 4 venkovní jednotky + centrální jednotku zahrnující lokální rozhraní pro ovládání a parametrizaci. Centrální jednotka též slouží pro lokální vyhodnocení, zálohování dat a další komunikační požadavky. Jednotlivé jednotky jsou vzájemně datově propojeny optickým kabelem (výhodné i vzhledem na galvanické oddělení různých částí systému) a mohou být vzdáleny řádově až stovky metrů. Tak je možné vybudovat i rozsáhlý distribuovaný systém, v němž senzory bývají připojeny k jednotlivým akvizičním jednotkám.

Klíčovou podmínkou je, aby akvizice veškerých kanálů probíhala paralelně; to je zásadní i z hlediska případné předběžné lokalizace místa výskytu výbojů. Koncepty využívající multiplexeru jsou vysloveně nevhodné. V tomto se monitoring odlišuje od FAT zkoušek.

6. Kontrolní sw monitorovacího systému

Kontrolní SW je nedílnou součástí řešení a obecně by měl nabízet následující funkce:

- parametrizace,
- uvedení do provozu a provozní zkoušky,
- automatické vyhodnocení dat vůči nastaveným mezním hodnotám,
- generování alarmů.

Toto jsou základní, nikoliv veškeré funkce monitorovacího systému jako takového. Řešení může obsahovat například i expertní modul či nadstavbové funkce.

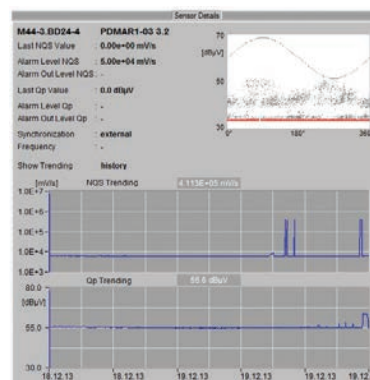
6.1. Celkové zobrazení

Výchozím pohledem by mělo být přehledové schéma včetně pozice jednotlivých čidel a jejich stavu, případně aktuálnímu či historickému výskytu výbojové aktivity. Příklad je uveden na obrázku 18.

Celkový pohled umožňuje zjištění aktuální aktivity částečných výbojů a určení, kterými senzory a v jaké části nebo fázi je signál detekován.

6.2. Detailní zobrazení

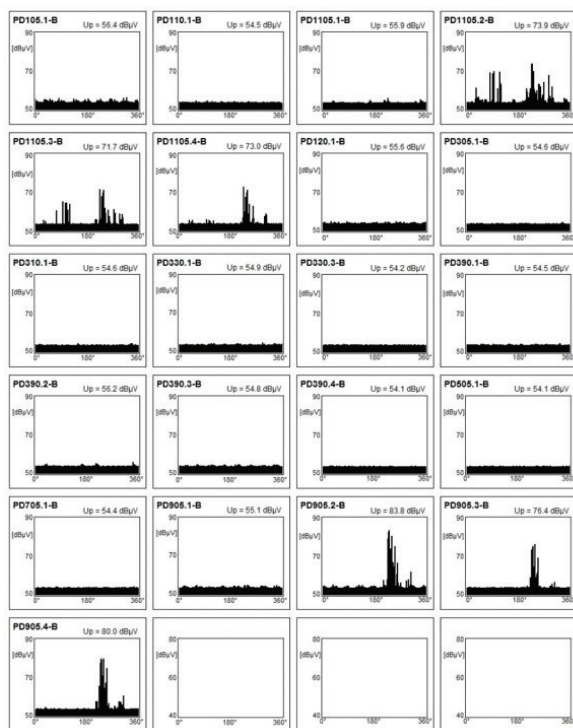
V případě, že je detekován signál na nějakém ze senzorů, je možno jej detailně analyzovat, stejně tak i zobrazit jejich detail. Ten zahrnuje veškeré události a průběhy v rámci zvoleného časového období, což umožňuje nejen sledování trendů, ale i korelaci s událostmi v rámci rozvodny, konfigurací alarmů či jeho synchronizaci. Ukázka na obrázku 19.



Obrázek 19 – Aktuální a historická data konkrétního měřicího místa

Stejně tak je možno zobrazit i historickou aktivitu spuštění alarmů, fázové rozložení jednotlivých událostí či změny statusu.

V některých případech může být výhodné současné zobrazení více kanálů současně. Může jít o situace, kdy je zapotřebí alespoň částečně lokalizovat konkrétní událost, vysledovat souvislosti s konkrétními událostmi či sledovat šíření události v rozvodně. Příklad je uveden na následujícím obrázku 20:



Obrázek 20 – Současné zobrazení více kanálů

Tato funkce může být využita i při zkoušce citlivosti, jak bylo uvedené výše, ať již v rámci uvádění do provozu, tak v rámci kontrol definovaných ŘPÚ.

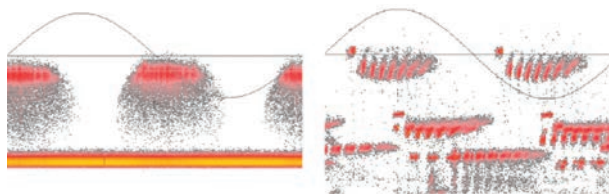
7. Analýza dat

Jednou z vlastností by měla být i následná analýza dat. Pomocí ní je možno signál nejenom lokalizovat, ale též učit jeho druh a pokusit se stanovit možnou příčinu jevu. Typické příklady jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

7.1. Volné a plovoucí prvky

Typický příklad zachycují obrázky 21 a 22.

Na obrázku 21 můžeme pozorovat odezvu nesprávně mechanicky upevněných prvků. Jedná se o akustický, nikoliv elektrický signál. Obvykle se jedná o jev s frekvencí 100 Hz, který se typicky



Obrázek 21 – Mechanická odezva

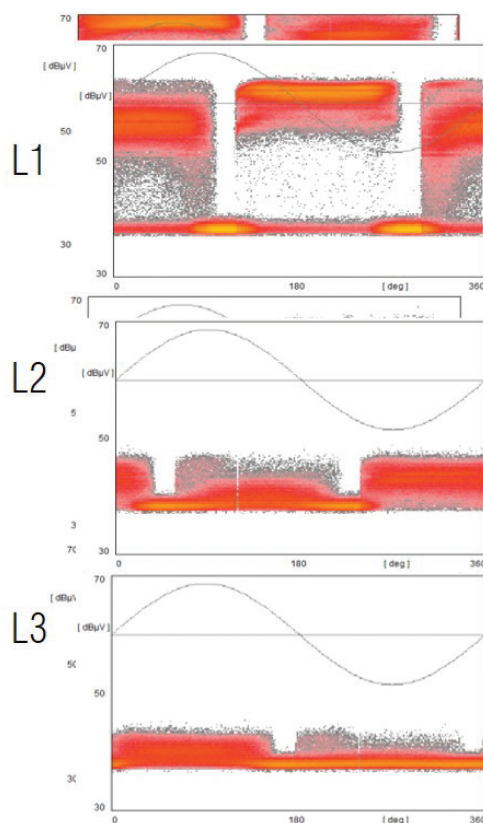
Obrázek 22 – Plovoucí prvek

v dané fázi objevuje v oblasti průchodu napětí 0. Jak již bylo zmíněno, jedná se o závadu mechanickou, nikoliv dielektrickou.

Obrázek 22 zobrazuje jev s obdobnou frekvencí, ale výrazně odlišným fázovým rozložením signálů, obvykle svázaných s amplitudou napětí v dané fázi. Je způsoben výbojem v mezeře mezi elektrodou a plovoucím prvkem vedoucí k výbojové aktivitě.

Tyto příklady jsou ukázkou důležitosti zobrazení vztahu vůči amplitudě a následnému rozlišení příčiny. Podmínkou je správná lokalizace postižené fáze.

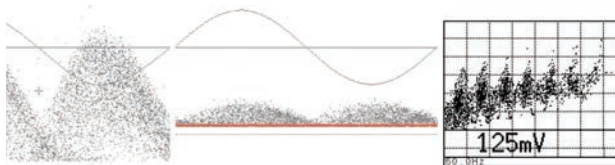
Na obrázku 23 můžeme vidět příklad lokalizace postižené fáze. I když je signál rozlišitelný ve všech třech fázích, jeho zdrojem je jednoznačně L1. I proto je doporučeno identické rozmístění snímačů ve všech třech fázích.



Obrázek 23 – Lokalizace místa

7.2. Volné částice

Dalším jevem, se kterým se můžeme setkat v rámci GIS, jsou volné částice. Typické průběhy můžeme vidět na obrázcích 24, 25 a 26:



Obrázky 24, 25 a 26 – Typická odezva volných částic v GIS

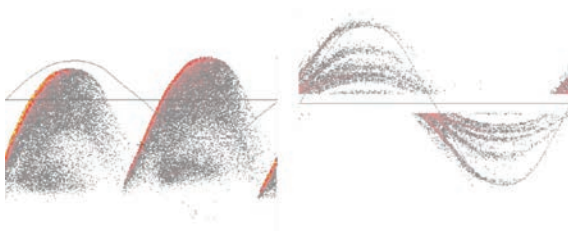
Volné částice se obvykle do GIS dostanou v rámci montáže, respektive tam po montáži zůstanou. Do pohybu jsou uvedeny polem a následně způsobují výboje při přiblížení k vodiči, nebo naopak k izolátorům. Jejich projev se váže vždy na aktuální velikost pole – proto při nižších napětích nemusí mít žádný projev. Mezi jejich vlastnosti můžeme i počítat možnou časovou nestálost – průběhem doby mohou zmizet.

7.3. Výčnělký a hrany

Mezi další příčiny způsobující výbojovou aktivitu můžeme počítat přítomnost výčnělků, hran či hrotů, jak ukazuje obrázek 27.



Obrázek 27 – Fázově rozložená odezva výčnělků či hran



Obrázek 28 – Fázově rozložená odezva dutinek

Taková odezva je obvykle detekována již při FAT testech a příčina bývá následně odstraněna. Nelze tedy konstatovat, že by se jednalo o typický „provozní“ jev, nicméně nelze to vyloučit. Příčinou bývá lokální mechanické poškození při montáži či její nedostatečná úroveň. Jsou charakterizovány jednou, nebo dvěma poměrně úzkými oblastmi. Podle toho, zda se odezva vyskytuje pouze v záporné půlperiodě, nebo v obou, rozlišujeme, zda se jedná o problém způsobený na straně potenciálu, nebo izolátoru. Tvar rozložení se může s průběhem času měnit v závislosti na tom, jak se výbojovou aktivitou mění povrch v místě vzniku.

7.4. Dutinky

Posledním z popisovaných jevů je výskyt dutinek v izolátorech či oddělovacích prvcích. Fázové rozložení se odlišuje od předchozích jevů, viz obrázek 28.

Můžeme pozorovat průběh s charakteristickou náběžnou hranou. Vyplněnost plochy výboji závisí na tvaru dutinky a intenzitě výboje. Podmínkou vzniku je dostatek startovacích elektronů. Tak jako bylo uvedeno v případě výčnělků a hran (že jsou obvykle detekovány v rámci FAT), dutinky je v rámci akceptačních zkoušek velmi obtížné odhalit metodou částečných výbojů. Pokud se je výrobci snaží vypátrat, tak obvykle pomocí metod založených na RTG. Problematika dutinek je jednoznačně svázána s postupnou degradací izolačních prvků.

8. Závěr

Tento text neměl ambici detailně popsat monitoring GIS nebo stát manuálem k jeho použití či interpretaci výstupů. Hlavním cílem bylo tuto problematiku nastínit a přiblížit.

Monitoring jako takový má nezastupitelnou úlohu v rámci asset managementu a zajišťování spolehlivosti provozu. Stejně tak je díky monitoringu možné bezpečně využít zbytkovou životnost monitorovaných prvků.

Autoři jsou si vědomi rozsáhlosti této problematiky, v případě potřeby rádi zkonultují vaše požadavky na upřesnění či aplikaci.

Literatura:

- [1] CIGRE, brochure 513, Final Report of the 2004–2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment, Part 5.
- [2] CIGRE, TBA 654, UHF partial discharges detection systems for GIS: Application guide for sensitivity verification.

Článek prošel recenzním řízením.

Vývojové trendy v oblasti motorových olejů pro spalovací motory osobních a lehkých užitkových vozidel

Ing. Pavel Růžicka, Ph.D.

Totalenergies Marketing Česká republika s.r.o.



Obrázek 1 – Nové typy pohonných jednotek se spalovacími motory pro hybridní agregáty vozidel vyžadující syntetické motorové oleje s formulacemi FE (Fuel Economy – Úspora paliva)

1. Úvod

Současný trend v oblasti vývoje osobních a lehkých užitkových automobilů je v souladu se strategií intenzivní podpory životního prostředí, tedy s vývojem hnacích agregátů, které při provozu vozidel výrazně omezují tvorbu produkovaných emisí. U vozidel obsahujících spalovací motor se jedná zejména o hybridní pohony s vysokými technickými nároky na motorové oleje zajišťující mazání nových typů spalovacích motorů.

2. Nové typy motorových olejů

Hybridní pohon vozidla představuje kombinaci pohonu pomocí spalovacího motoru a elektrického pohonu, což umožňuje dosahovat výrazně nižší emisní hodnoty CO_2 do 40 g/km vůči stávajícímu povolenému limitu 95 g CO_2 /km. Pohony pomocí spalovacích motorů dnes stále častěji zajišťují moderní konstrukce malolitrážních výkonných kompaktních přeplňovaných benzínových spalovacích motorů.

Pro mazání výše uvedených motorů je nutno použít nové formulace motorových olejů, jež splňují velmi náročné technické požadavky. Na jedné straně je požadováno dlouhodobé spolehlivé mazání s prodlouženou životností oleje a vysokou oxidační odolností, na druhé straně pak minimalizace spotřeby paliva s vysokým výkonem motoru (obr. 1). Zmíněné často protichůdné požadavky jsou schopny splnit pouze nově vyvíjené moderní formulace syntetických motorových olejů, jež zajišťují dlouhodobé spolehlivé mazání exponovaných součástí spalovacích motorů. Takovéto oleje proto splňují nejnáročnější výkonové specifikace používané pro klasifikaci motorových olejů. Jedná se o standardy

API SP (American Petroleum Institute), ACEA C6 (l'Association des Constructeurs Européens d'Automobiles) respektive ILSAC GF-6 (International Lubricant Standardization & Approval Committee).

Kromě striktních technických požadavků, jako jsou např. maximální povolené hodnoty opotřebení rozvodového mechanismu, resp. povolené hodnoty týkající se ochrany před efektem „LSPI“ (Low Speed Premature Ignition – předčasné samovznícení paliva při nízkých otáčkách spalovacího motoru, jež může způsobovat klepání a postupné předčasné opotřebení motoru), je od těchto olejů vyžadována maximální podpora úspory paliva (formulace typu FE – Fuel Economy). To znamená, že pro dosažení srovnatelného výkonu je dostačující nižší hodnota spotřeby paliva. Maximální úsporu paliva zajišťují moderní formulace syntetických „Low SAP“ nízkopopelnatých motorových olejů, které umožňují dlouhodobé spolehlivé mazání exponovaných součástí spalovacích motorů a potřebnou životnost zařízení redukující produkované emise (obr. 2). Jedná se o motorové oleje s extrémně nízkými viskozitními rozsahy, což jinými slovy znamená, že se jedná o formulace olejů s minimálním vnitřním třecím odporem při provozu motoru.



Obrázek 2 – Nové typy formulací syntetických motorových olejů – technologie splňující požadavky standardů API SP, ILSAC GF-6B, ACEA C6

Viskozitní třída SAE	Dynamická viskozita mPa.s V CCS při teplotě °C max.	Mezní čerpatelnost viskozita mPa.s, °C	Kinematická viskozita při 100 °C (mm²/s)		Dynamická viskozita při 150 °C (mPa.s)
			min.	max.	
0W	6200 při -35	60 000 při -40	3.8		
5W	6600 při -30	60 000 při -35	3.8		
10W	7000 při -25	60 000 při -30	4.1		
15W	7000 při -20	60 000 při -25	5.6		
20W	9500 při -15	60 000 při -20	5.6		
25W	13000 při -10	60 000 při -15	9.3		
8			4.0	6.1	1.7
12			5.0	7.1	2.0
16			6.1	8.2	2.3
20			6.9	9.3	2.6
30			9.3	12.5	2.9
40			12.5	16.3	2.9 a)
40			12.5	16.3	3.7 b)
50			16.3	21.9	3.7
60			21.9	26.1	3.7

a) pro třídy SAE 0W, 5W a 10W
b) pro třídy SAE 15W, 20W, 25W a 40

Tabulka 1 – Viskozitní rozsahy motorových olejů

Kromě dnes již poměrně rozšířených motorových olejů viskozitního rozsahu SAE 0W-20 se vyvíjí další formulace se stále snižujícím trendem viskozitních rozsahů SAE 0W-16, SAE 0W-12 a SAE 0W-8 (Tab. 1). Formulace těchto olejů jsou na bázi hyperaktivních molekul s efektem okamžité regenerace a odolnosti vůči chemické a fyzikální degradaci. Na jedné straně je minimalizována oxidace oleje a na druhé straně maximalizována podpora úspory paliva či výkon spalovacího motoru. Například u formulace nízkoviskózního syntetického motorového oleje viskozitního rozsahu SAE 0W-16 lze zaznamenat redukci vnitřních odporů při provozních teplotách 100–110 °C ve srovnání s olejem SAE 5W-30 o 4,2 %, resp. ve srovnání s olejem SAE 0W-20 o 1,4 %. U olejů SAE 0W-12 nebo 0W-8 je tento efekt ještě podstatně výraznější. Navíc díky speciálním syntetickým technologiím tyto oleje vykazují i zvýšenou odolnost vůči tvorbě úsad a kalů.

3. Závěr

Závěrem lze konstatovat, že nově vyvinené syntetické nízkoviskózní formulace motorových olejů lze charakterizovat především pomocí tří technických ukazatelů:

- Maximálně účinný efekt snížené spotřeby paliva při provozu vozidla díky nízkým třecím odporům, účinná podpora redukce produkovaných emisí.
- Výborná tekutost, čerpatelnost a cirkulace olejů, což má za následek velmi snadné starty spalovacích motorů i při extrémních zimních podmínkách.
- Vysoká úroveň ochrany motoru se zajištěním dlouhodobého spolehlivého mazání exponovaných součástí spalovacího motoru.

Dále je pro úplnost vhodné konstatovat doporučení týkající se výměn a servisních intervalů motorových olejů:

Výměnam motorových olejů je zapotřebí věnovat potřebnou péči dle intervalů indikovaných OAM (Oil Adaptive Maintenance) systémem řídicí jednotky vozidla, resp. dle intervalů doporučených výrobcem v servisních manuálech vozidel. To jednoznačně přispívá ke zvýšení životnosti pohonných agregátů vozidla.

U motorových olejů, zejména těch nízkoviskózních, je kromě degradace zvýšené riziko jejich kontaminace (naředěním palivem, nečistoty, pronikání chladicí nebo nemrznoucí kapaliny aj.). Je tedy důležité nepřekračovat doporučené nebo OAM systémem hlášené servisní intervaly.

V článku byly použity archivní materiály společnosti TotalEnergies.

Získejte zpět 21 % svých investic do inovací!

Vyvíjíte nové produkty, technologie, software nebo automatizační systémy?
Zlepšujete výrobní procesy či navrhujete zařízení na míru?
Zaměstnáváte inženýry či IT specialisty pracující na inovacích?

Pokud jste odpověděli ano na některou z otázek, rádi vám pomůžeme snížit daň z příjmu a zvýšit konkurenceschopnost díky daňovému odpočtu na podporu výzkumu a vývoje.

Kontaktujte nás a na nezávazné schůzce zjistíme, zda a kolik můžete ušetřit.

Ing. Jana Dandová
Senior Innovation Specialist



ayming



Domluvme si schůzku

Energetické ukazatele z frekvenčního spektra vibrodiagnostického signálu pro klasifikaci poruch pomocí metod umělé inteligence

Vibrodiagnostic signal from frequency spectrum energy indices for fault classification using artificial intelligence methods

Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

VUT Brno

Anotace

V oboru technické diagnostiky se stále více uplatňují metody umělé inteligence pro zpracování diagnostických signálů díky pokročilé digitalizaci výrobních strojů a zařízení. Pokud se budeme dále zabývat pouze metodou klasifikace stavu stroje a případnou detekcí a klasifikací poruchy, je nutné zvolit vhodné ukazatele technického stavu, které budou co nejvíce univerzální, a tudíž přenositelné na ostatní stroje a zařízení.

Tento článek se bude zabývat klasifikací poruch rotačních systému, kdy informace o stavu stroje je obsažena ve vibrodiagnostickém signálu. Jedná se konkrétně o data z akcelerometrů na stojanech ložisek a tachosignál obsahující údaj o otáčkách. Jako ukazatelé stavu stroje budou použity pouze energetické ukazatele z frekvenčního spektra, pro důležité frekvence a jejich harmonické.

Annotation

In the field of technical diagnostics, artificial intelligence methods are increasingly applied for processing diagnostic signals thanks to the advanced digitalization of production machines and equipment. If we only deal with the method of machine condition classification and possible fault detection and classification, it is necessary to choose suitable technical condition indicators that are as universal as possible and therefore transferable to other machines and equipment.

This paper will deal with the classification of rotating system faults, where the information about the machine condition is contained in the vibrodiagnostic signal, where accelerometer data and a tachosignal containing speed data are sensed. Only energy indicators from the frequency spectrum will be used as machine condition indicators, for the important frequencies and their harmonics.

Úvod

V technické diagnostice a zejména ve vibrodiagnostice se často využívá údaj o efektivní hodnotě jako spolehlivý ukazatel technického stavu stroje, protože RMS hodnoty jsou vázány na energii signálu. Cílem tohoto článku je otestovat energetické ukazatele z frekvenčního spektra, tzn. výpočet energie signálu v určité oblasti, které mohou signalizovat konkrétní poruchy rotačních systémů. Výsledky výpočtu budou sloužit jako ukazatele (prediktory) pro strojové učení v úloze klasifikaci poruch, více informací lze nalézt [1.,2.].

Jako zdroj dat je použit veřejný dataset „MAFAULDA“ [3.], který obsahuje naměřená data ze simulátoru závad SpectraQuest's Machinery Fault Simulator (MFS), na kterém jsou simulovány poruchy nevyvážení, vertikální a horizontální nesouosost a poruchy ložiska, konkrétně závada na vnějším a vnitřním kroužku a závada valivého elementu. Všechny poruchy jsou zastoupeny v několika úrovních při různých otáčkách.

Teorie z oboru vibrodiagnostiky definuje projevy těchto poruch mimo jiného i na základě frekvenčního spektra, kdy každá porucha má svůj specifický průběh, resp. zvýšenou amplitudu na určité frekvenci. Například u nevyvážení očekáváme zvýšení první harmonické, otáčkové frekvence, u nesouososti očekáváme také druhou harmonickou, u uvolněného základu subharmonické apod. Poruchy ložisek se projevují na typických chybových frekvencích ložisek a jejich násobcích. Podrobněji je tato problematika popsána například [4.,5.].

Použitý dataset

Použitý dataset obsahuje série měření po 5 sekundách, které obsahují data ze dvou tříosých akcelerometrů umístěných na stojanech ložiska, data z mikrofonu (v tomto článku nepoužity) a tachosignál. Pro získání většího počtu dat byl časový úsek rozdělen na úseky 0,5 s.

Dataset obsahuje následující typy závad:

1. Nevyváženost

- Úrovně: 6 g až 35 g (7 úrovní)

2. Horizontální nesouosost

- Úrovně: 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm

3. Vertikální nesouosost

- Úrovně: 0,51 mm, 0,63 mm, 1,27 mm, 1,40 mm, 1,78 mm, 1,90 mm

4. Závady ložisek (ve dvou pozicích – underhang a overhang):

- Poškození vnějšího kroužku
- Poškození valivých elementů
- Poškození vnitřního kroužku
- Každá závada ložiska byla měřena s přidanou nevyváhou 0 g, 6 g, 20 g a 35 g

Rozsah otáček: 737–3686 RPM
(s kroky přibližně 60 RPM)

Dataset obsahuje celkem 1951 měření, z toho:

- 49 normálních stavů (bez závady)
- 197 horizontálních nesouosostí
- 301 vertikálních nesouosostí
- 333 nevyvážeností
- 558 závad ložisek v underhang pozici
- 513 závad ložisek v overhang pozici

Zpracování dat – volba ukazatelů

V úvodní kapitole bylo naznačeno, že by teoreticky stačilo jako kombinace ukazatelů vybrat velikosti amplitud známých frekvencí získaných pomocí frekvenční analýzy, ale pokud se chceme zaměřit na strojové, tzn. automatické zpracování, musíme se vypořádat s několika problémy. Prvním problémem může být rozlišitelnost frekvenční analýzy, kdy se spojitá veličina otáčky a z ní určena hodnota otáčkové frekvence nevyskytuje v hledaném místě, proto je tedy nutné nalézt maximální amplitudu v okolí hledané frekvence. Výhodnější je tedy spočítat energii spektra v okolí hledané frekvence; pak tedy ukazatelem nebude hodnota amplitudy dané frekvence, ale energie v okolí hledané frekvence.

Hlavním problémem však zůstává podmínka koherence signálu, při jejímž nedodržení se výrazně deformuje velikost amplitud a energie.

EUCHNER

More than safety.



Jeden na všechno – Bezpečnostní zámek CTS

Bezpečnostní zámek s technologií unikátně kodovaných transpondérů

- ▶ Vysoká držící síla F_{max} 3900 N v kompaktním provedení
- ▶ Možnost dodatečné instalace únikového uvolnění jištění
- ▶ Aktuátor na plovoucím ložisku toleruje nesoustřednost při montáži a vibrace
- ▶ Flexibilní možnosti montáže - ideální pro posuvné i na pantech zavěšené dveře
- ▶ Připraveno pro Průmysl 4.0 v kombinaci s EUCHNER IO-Link komunikační bránou
- ▶ Nejvyšší bezpečnost díky kat.4 / PL e dle EN ISO 13849-1 a vysoké úrovni kódování dle EN ISO 14119

www.euchner.cz

Podmínka koherence při FFT

Většinou se pro frekvenční analýzu využívá algoritmus FFT (rychlá Fourierova transformace – Fast Fourier Transform), který předpokládá, že předkládaný časový ušek o délce T je reprezentativním vzorkem nekonečného opakujícího signálu. Při zpracování si z něj tedy vytvoří nekonečnou smyčku, kterou zformuje jednoduše tak, že za poslední hodnotou předkládaného pole vloží opět první hodnotu předkládaného pole, tedy začátek signálu. Pokud konec signálu naváže na začátek, dostáváme nekonečnou smyčku obsahující pouze jeden harmonický signál (za předpokladu, že vstupem byl pouze jeden harmonický signál). Pokud vlivem vzorkování a počtu vzorků se konec signálu neshoduje se začátkem, vznikne v nekonečné smyčce nelinearita (v místě spoje), která se ovšem v signálu nevyskytuje a má negativní vliv na výslednou frekvenční analýzu (je to umělá deformace signálu). Signál je tedy nekoherentní a dojde k efektu tzv. prosakování energie do okolí. Tento jev se obecně nazývá leakage.

Pro periodické signály, které vzorkujeme počtem vzorků N a známou vzorkovací periodou T , lze podmínku koherence definovat jako:

$$N \cdot T_{\text{vzorkovací}} = M \cdot T_{\text{signálu}}$$

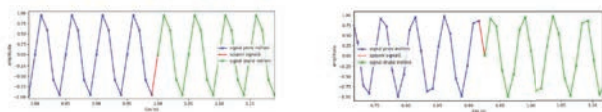
V této rovnici je M je libovolné celé číslo, tzn. pokud platí rovnost a M vyjde jako celé číslo, tak konec signálu a začátek bude na sebe navazovat, pokud M nebude celé číslo, dochází k nelinearitě, která je největší, pokud M vychází v polovině mezi dvěma celými čísly. To je patrné z následujícího příkladu, který demonstruje stejný signál, avšak různě nevzorkován. Při vykreslení místa spoje je patrná zmiňovaná nelinearita. Důležitou poznámkou je, že počet vzorků a/nebo vzorkovací periodu můžeme ovlivnit v jistých krocích (ne spojitě), ale skutečnou spojitou hodnotu periody signálu nikoliv.

Na příkladu použijeme matematicky generovaný signál o frekvenci 20 Hz, který je nevzorkován dvěma způsoby:

Vzorkovací frekvenci 100 Hz je pořízeno 100 vzorků. M je tedy rovno 20, což je celé kladné číslo – je splněna podmínka koherence.

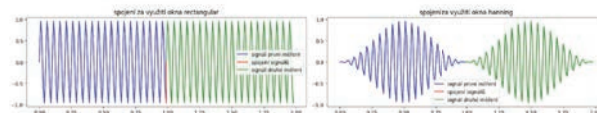
Vzorkovací frekvenci 108 Hz je pořízeno 100 vzorků. M je tedy rovno 18,52, což je téměř nejhorší případ.

Průběhy obou signálů jsou zobrazeny na obr. 1.



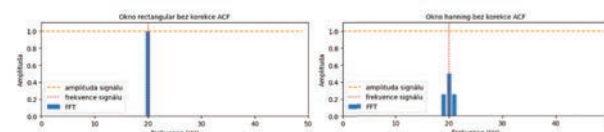
Obr. 1. Detail spojení harmonického signálu, kde $M=20$ vlevo a $M=18,52$ vpravo

Problém prosakování energie se snaží vyřešit používání časových oken v algoritmu FFT. Princip spočívá v tom, že předkládaný signál vynásobíme matematickým průběhem signálu okna ještě před zpracováním algoritmem FFT. Průběh okna má na začátku a konci hodnotu nula a největší amplitudu uprostřed signálu. Dochází tedy k tomu, že konec signálu a začátek bude právě v hodnotě blízké nule. Tím je tedy zaručeno vhodné napojení signálu (neobsahuje nelinearitu spojení), ale deformuje se amplituda signálu (na okrajích je signál zeslabován – tlumen), a tímto způsobem je ovlivněna i energie. Příklad signálu s aplikovaným oknem (konkrétně Hanningovo) zachycuje obr. 2.



Obr. 2. Detail spojení harmonického signálu bez okna vlevo a s oknem Hanning vpravo

Pokud provedeme FFT algoritmus pro tyto signály, tak očekávaný správný výsledek by měl být jedna spektrální čára o frekvenci 20 Hz s amplitudou 1, což u signálu s oknem typu obdélník (takže bez úprav) skutečně je, ovšem signál s aplikovaným oknem Hanning je výrazně zkreslen, jak je patrné z obrázku 3, právě kvůli útlumu na začátku a konci signálu.



Obr. 3. FFT harmonického signálu bez okna (okno typu obdélník) vlevo a s oknem Hanning bez ACF

Abychom tedy tyto útlupy amplitudy nebo energie na koncích signálu vykompenzovali, používají se korekční faktory – buď amplitudový (Amplitude Correction Factor – ACF) pro správnou interpretaci amplitudy, nebo energetický (Energy Correction Factor ECF) pro správnou interpretaci energie. Hodnoty těchto korekčních faktorů vychází z použitého průběhu okna a mírný vliv má také počet vzorků okna. Signál okna se generuje tak, aby měl stejný počet vzorků jako předkládaný signál. V literatuře lze nalézt konkrétní hodnoty těchto faktorů na základě použitého okna, jednoduše je lze vyjádřit následovně:

$$ACF = \frac{1}{\text{mean}(w)}$$

kde:

w – časový průběh použitého okna

$\text{mean}(w)$ – aritmetický průměr signálu aplikovaného okna

$$ECF = \frac{1}{rms(w)}$$

kde:

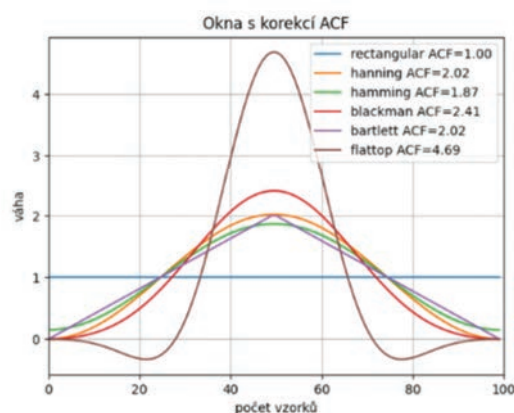
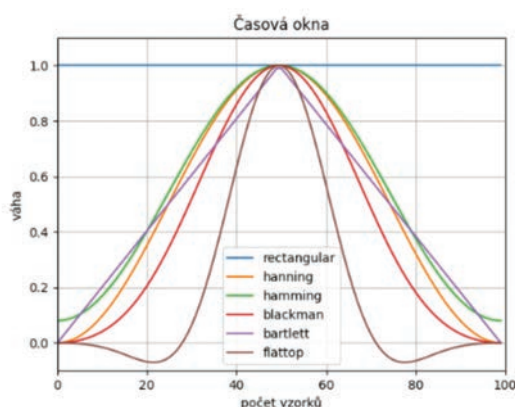
w – časový průběh použitého okna

$rms(w)$ – efektivní hodnota (RMS) signálu aplikovaného okna

Předkládaný signál je tedy vynásoben vygenerovaných časovým oknem a také použitým korekčním faktorem. Jak vypadají průběhy jednotlivých oken, je znázorněno na obr. 4.

Nejnámější časová okna:

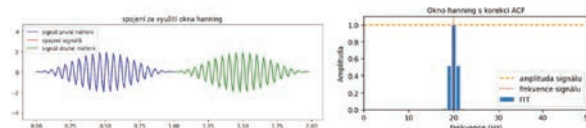
- Obdélníkové – váha je 1 pro celou délku, nedochází tedy k úpravě signálu
- Hanning
- Hamming
- Blackman
- Flattop
- Bartlett – trojúhelníkové okno



Obr. 4. Příklad signálů oken bez ACF (nahore) a s ACF (dole)

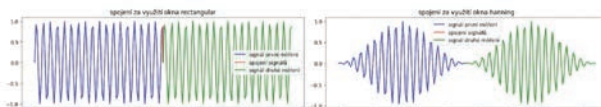
Výsledný signál, kde je tedy aplikováno jak okno (hanning), tak ACF, zobrazuje obr. 5, kde je patrné, že dochází k zesílení amplitudy nad původní maximální úroveň 1.

V případě frekvenčního spektra je sice očividné prosakování, ale amplituda je již při použití ACF interpretována korektně. V obou případech je tedy interpretace signálu dobrá a použití okna nám nepřineslo žádnou výhodu.



Obr. 5. Časový signál s aplikací okna a ACF (vlevo) a jeho výsledná frekvenční analýza (vpravo)

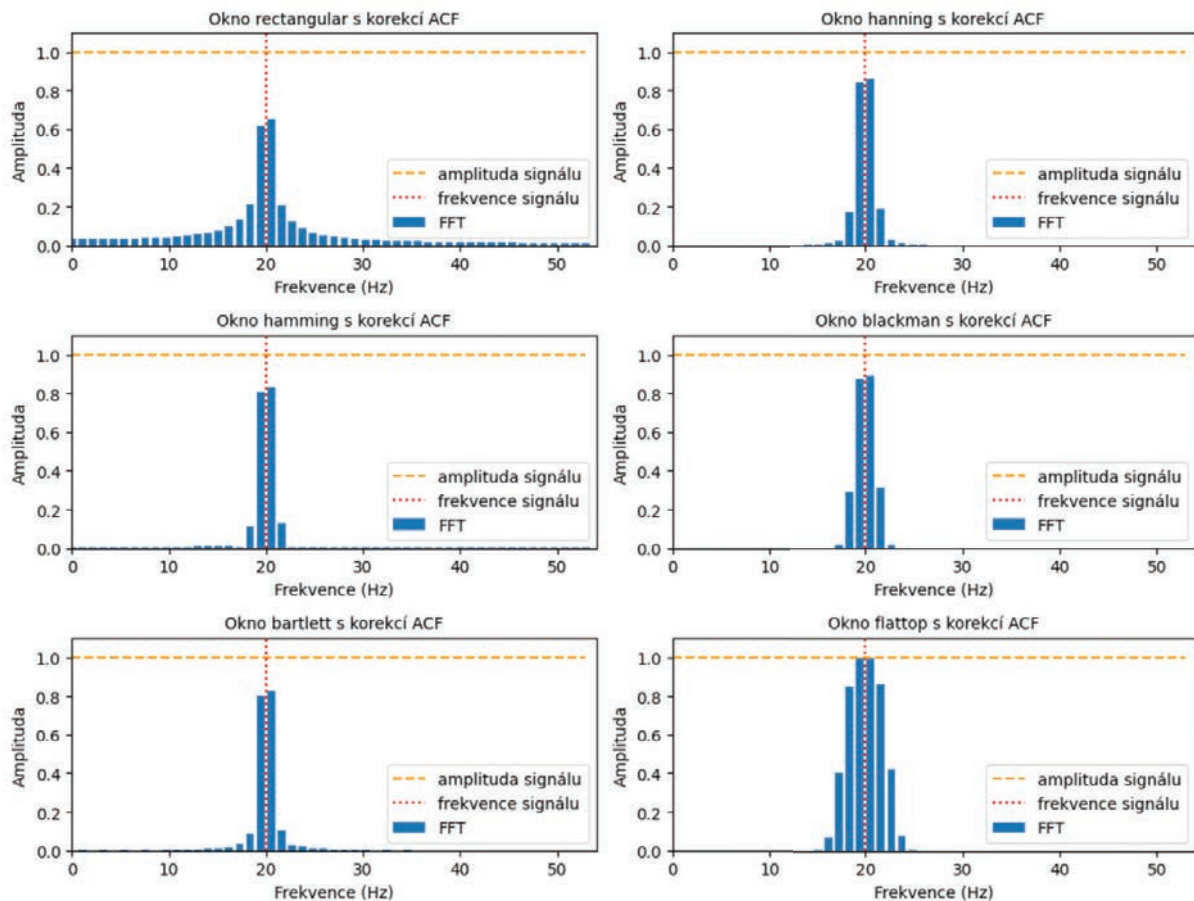
Situace je ale odlišná pro druhý způsob vzorkování signálu, kdy není splněna podmínka koherence. Z obrázku 6 vyplývá, že spojení signálu bez použití okna způsobuje výraznou nelinearitu, která je eliminována pomocí aplikace okna.



Obr. 6. Harmonický signál nesplňující podmínku koherence bez okna (vlevo) a s oknem hanning (vpravo)

Frekvenční spektra znázorněná na obr. 7 demonstrují výrazné prosakování signálu a deformace amplitudy, kterému se použití okna snaží zabránit. Pro názornost je zde znázorněno několik často používaných oken a z výsledků je zřejmé, že obdélníkové okno, tedy bez úprav, dopadlo nejhůře co se týká interpretace velikosti amplitudy.

Obr. 7. Frekvenční analýza harmonického signálu nesplňující podmínku pro různá okna včetně korekce ACF (na další straně)



Výběr ukazatelů

Dle výše uvedeného je tedy vhodné jako ukazatele zvolit energii spektra v okolí hledané frekvence. Kvůli útlumu mezi jednotlivými spektrálními čarami se volí jako okolí 3- až 5násobek šířky spektrální čáry. Při nízkém počtu hrozí, že není zahrnuta celá energie dané oblasti například vlivem mírného kolísání otáček během měření, nebo nepřesného měření otáček. Při vysokém počtu hrozí, že bude do výpočtu zahrnuta i energie signálu, která s hledanou frekvencí nesouvisí.

Konkrétně v tomto případě je volen 5násobek šířky spektrální čáry, což znamená 5 spektrálních čar napravo od hledané frekvence a 5 nalevo, takže jeden ukazatel je tedy energie obsazena v těchto spektrálních čarách. Jako hledané frekvence jsou voleny 1-, 2-, 3násobek otáčkové frekvence, a také subharmonické 0,5-, 1,5-, 2,5násobek otáčkové. Pro detekci ložisek je to chybová frekvence ložisek FTF, BPFO, BPFI a BSF a jejich druhá a třetí harmonická.

Výpočet energie pro jednotlivé frekvence je realizován jako:

$$E = \frac{\sqrt{\sum(A_i^2)}}{\sqrt{ENBW}}$$

kde:

- A_i jsou jednotlivé amplitudy odpovídající hledaným frekvencím; jsou získané pomocí algoritmu FFT a aplikací korekčního faktoru ECF, protože nám jde o interpretaci energie.*
- ENBW (Equivalent Noise BandWidth) je šířka pásma šumu definován jako*

$$ENBW = N \cdot \frac{\sum w^2}{(\sum w)}$$

kde:

- w – je signál okna o velikosti N .*

Nakonec je výsledná energie převedena na efektivní hodnotu. Za předpokladu, že zpracovávaná oblast zahrnuje jednu harmonickou frekvenci, využijeme převod obdobně jako u harmonického signálu:

$$E_{\text{efektivní}} = \frac{E}{\sqrt{2}}$$

Výsledkem je tedy hodnota energie signálu, která je blízká hodnotě RMS v hledané frekvenční oblasti, nicméně stále se jedná pouze o odhad RMS hodnoty. Výsledná hodnota má vypovídající hodnotu o energii signálu v hledané frekvenční oblasti.

Označení parametru je tedy
 <osa><stojan>_e_H_<násobek harmonické>,
 například „x1_e_H_1“ je energie v okolí
 první harmonické v ose X a stojanu 1.

Celý experiment je rozdělen na dva vyhodnocovací modely, a to vyhodnocení závad, které se netýkají ložisek, a naopak pouze na chyby ložisek. Důvodem je, že poruchy ložiska jsou simulovány v kombinaci s poruchou nevyváha, aby byl zvýrazněn projev poruchy. Podobné to je i v praxi, kdy projev poruchy jako nevyváha nebo nesouosost zvýrazňují i projev poruchy ložisek. Proto je vhodné použít modely dva, kdy jeden se zaměří na poruchy typu nevyváha, nesouosost, uvolněný základ apod. Druhý se pak zaměří na detekce poruch ložisek. Dále je nutné podotknout, že poruchy ložisek jsou vyhodnocovány ze signálu zrychlení měřeného akcelerometrem a ostatní poruchy jsou pomocí numerické integrace převedeny na rychlost. Důležité je zmínit, že dataset pro učení obsahoval všechny dostupné úrovně poruch a všechny dostupné kombinace otáček stroje, nedošlo tedy k žádnému výběru a pro učení byla použita všechna dostupná data, čímž bylo pokryto celé spektrum otáček.

Do modelu na vyhodnocení závad jiných než ložisek vstupují pouze údaje z jednoho snímače v osách X a Y. Celkem tedy jde o 12 parametrů, pro jednu osu to jsou:

- x1_e_H_1
- x1_e_H_2
- x1_e_H_3
- x1_e_H_0.5
- x1_e_H_1.5
- x1_e_H_2.5

A pro případ modulu vyhodnocení poruch ložisek vstupují do algoritmu údaje z obou snímačů v osách X a Y – celkem tedy 48 parametrů, pro jednu osu to jsou:

- X1_FTF_H_1
- x1_FTF_H_2
- x1_FTF_H_3
- x1_BPFO_H_1
- x1_BPFO_H_2
- x1_BPFO_H_3
- x1_BPFL_H_1
- x1_BPFL_H_2
- x1_BPFL_H_3
- x1_BSF_H_1
- x1_BSF_H_2
- x1_BSF_H_3

3DSCAN

CREAFORM
AMETEK

VAŠE PRVNÍ VOLBA PRO 3D SKENOVÁNÍ

3DSCAN - Váš partner pro inovace
v oblasti kontroly kvality



Výsledky zpracování

Testování klasifikátorů bylo provedeno v prostředí Matlab, konkrétně v aplikaci Classification Learner App [6.], která umožňuje otestovat všechny dostupné klasifikátory a zobrazit jejich míru úspěšnosti. Dále se pak pracuje pouze s tím modelem, který dosáhl nejlepších vlastností. Cílem bylo tedy otestovat míru úspěšnosti predikce při předkládání výše zmíněných ukazatelů, tzv. prediktorů.

Z hlediska testování byly provedeny tři experimenty. V prvním případě bylo cílem provést klasifikaci poruch do skupin „OK“ – bezvadný stav, „IMB“ – nevývaha, „VM“ – vertikální nesouosost a „HM“ – horizontální nesouosost, tzn. určit typ závady stroje bez ohledu na míru úrovně závady. Nejlepších vlastností dosahoval model KNN (celkově 99,6 %), jednotlivé výsledky formou klasifikační matice shrnuje obr. 8.

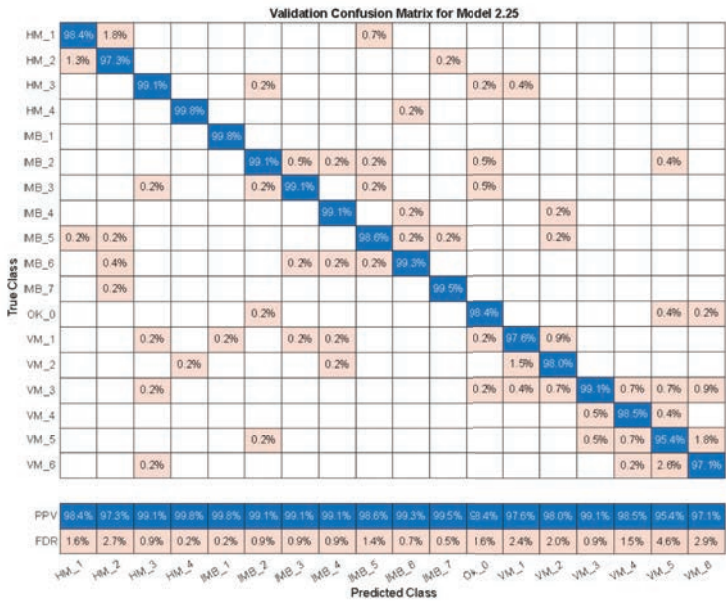
Druhý případ požadoval kromě typu poruchy určit i stupeň závady, to je tedy 18 různých skupin (tříd). Nejlepších vlastností dosáhl model KNN – 98,5 %, jednotlivé výsledky formou klasifikační matice zachycuje obr. 9. Tento experiment byl zvolen jako test, zda má vliv na určení poruchy (a její úrovně) otáčky stroje (jednotlivá měření měla různé otáčky).

Validation Confusion Matrix for Model 2.2!

True Class	HM	IMB	OK	VM
	99.4%	0.2%		0.1%
	0.3%	99.7%	0.7%	0.1%
	0.1%	0.0%	99.1%	
True Class				
	0.2%	0.1%	0.2%	99.7%

PPV	99.4%	99.7%	99.1%	99.7%
FDR	0.6%	0.3%	0.9%	0.3%
	HM	IMB	OK	VM
	Predicted Class			

Obr. 8. Nejúspěšnější model pro klasifikaci typu poruch



Obr. 9. Nejúspěšnější model pro klasifikaci typu poruch a jejich úrovní

Závěr

Z výsledků je patrné, že všechny experimenty dosahují velmi vysokou míru úspěšnosti predikce, což znamená, že zvolené energetické ukazatele mají velký potenciál signalizovat nejen stav stroje, ale také určit konkrétní poruchy. Nespornou výhodou je, že do výpočtu nevstupuje pouze velikost amplitudy konkrétní frekvence, ale blízké okolí sledované frekvence vyhodnoceno jako odhad energie naměřeného signálu. Samotná velikost amplitudy může být zkreslena vlivy měření jako počet vzorků, vzorkovací frekvence nebo vlivy zvolených parametrů algoritmu FFT a v neposlední řadě kolísání otáček díky zatížení stroje.

Cílem bylo vytvořit a otestovat univerzální ukazatele, které lze strojově zpracovat bez zásahu obsluhy a které nejsou závislé na aktuálních otáčkách stroje (nicméně otáčky musí být měřeny). Energetické ukazatele tedy mohou samotné nebo v kombinaci s dalšími parametry sloužit jako spolehlivý zdroj informací o stavu stroje a jsou vhodné pro klasifikaci poruch stroje.

- ZUTH, D. Ukázka využití strojového učení ve vibrodiagnostice. Řízení & údržba průmyslového podniku, 2018, č. 4, s. 14-16. ISSN: 1803-4535.
- ZUTH, D. STROJOVÉ UČENÍ VE VIBRODIAGNOSTICE – DATA Z FREKVENČNÍ OBLASTI. Technická diagnostika, 2019, roč. XXVIII, č. Z1, s. 253-258. ISSN: 1210-311X.
- MAFAULDA: Machinery Fault Database [Online]. Available at: https://www02.smt.ufrj.br/~offshore/mfs/page_01.html (Accessed: 23.1. 2025).
- HRABEC, Ladislav; HELEBRANT, František a MAZALOVÁ, Jana. Technická diagnostika a spolehlivost. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1449-0.
- BLATA, Jan a JURASZEK, Janusz. Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostiky techniczej: teorie a praktyka. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- Classification learner app. Available at: <https://nl.mathworks.com/help/stats/classification-learner-app.html> (Accessed: 23.1. 2025).

Článek prošel recenzním řízením.

Validation Confusion Matrix for Model 2.12

BOball	100.0%						
BOcage		100.0%					
BOouter			100.0%				
BUBall				100.0%			
BUcage					100.0%		
BUouter						100.0%	
OK							100.0%

PPV	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
FDR							

True Class

Predicted Class

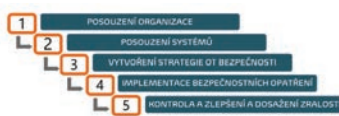
Obr. 10. Nejúspěšnější model pro klasifikaci typu poruch ložisek



IMPLEMENTACE OT KYBERNETICKÉ BEZPEČNOSTI

IRON OT PLÁN ZABEZPEČENÍ

Plán zabezpečení provozních technologií (OT), je strategický plán, který popisuje kroky, jež by organizace měla podniknout ke zvýšení bezpečnosti svých provozních technologií. Tato Roadmapa je přizpůsobena k ochraně systémů, které přímo řídí a monitorují fyzická zařízení a související procesy v odvětvích, jako je výroba, energetika, doprava, kritická infrastruktura státu a další.



- FAZE 1: POSOUZENÍ ORGANIZACE** zajistí vyhodnocení současného stavu zabezpečení organizace a identifikaci zranitelných oblastí.
- FAZE 2: POSOUZENÍ SYSTÉMŮ** poskytuje hloubkovou analýzu OT systémů s cílem pochopit jejich specifické bezpečnostní potřeby.
- FAZE 3: VYTVOŘENÍ STRATEGIE OT BEZPEČNOSTI** přináší formalizovanou strategii vytvořenou na míru, která řeší jedinečná rizika a požadavky OT prostředí organizace.
- FAZE 4: IMPLEMENTACE BEZPEČNOSTNÍCH OPATŘENÍ** realizuje bezpečnostní strategii, která zahrnuje mj. nasazení technologických řešení a provozních změn.
- FAZE 5: HODNOCENÍ, ZLEPŠOVÁNÍ A DOSAŽENÍ ZNALOSTI** zkvalitňuje účinnost zavedených opatření a zajišťuje neustálý dohled nad kvalitou bezpečnostních procesů a postupů.

BENEFITY IMPLEMENTACE

- Zvýšení bezpečnosti kritických IT/OT systémů
- Zvýšení odolnosti vůči kybernetickým hrozbám
- Zlepšení celkové kybernetické bezpečnosti organizace
- Zajištění souladu se zákony a průmyslovými normami
- Zvýšení důvěry zákazníků
- Základ pro neustálé zlepšování bezpečnosti
- Řízení a snižování rizik
- Snižování reakční doby na kybernetické incidenty
- Zvýšení povědomí o kybernetické bezpečnosti
- Zajištění kontinuity provozu
- Zvýšení konkurenceschopnosti
- Zavedení nebo vylepšení monitoringu sítě
- Zavedení nebo vylepšení segmentace sítě
- Minimalizace rizika narušení provozu
- Základ pro robustní bezpečnostní kulturu

KONTAKT:

- ✉ email: info@ironot.io
- ☎ telefon: +420 737 650 925
- 🌐 web: www.ironot.io

Follow us:



Comparison of OCT and IRNDT hidden defect inspection technologies

Moskovchenko A., Honnerová P., Maiwald F.

Abstract

This study investigates the application of optical coherence tomography (OCT) and flash-pulse thermography (IRNDT) for non-destructive testing of polymer and composite material assemblies. Four different sample types, including polymer joints, metal-polymer assemblies, and 3D-printed parts, were analyzed to evaluate the capabilities and limitations of each method in detecting and characterizing defects such as gaps, pores, and delaminations.

OCT demonstrated volumetric imaging with micrometer resolution and the ability to detect and measure small defects, such as gaps and delaminations, as well as to visualize structural details. However, the field of view is limited to a few millimeters and partial transparency is required. In contrast, IR thermography offered a broader field of view (usually ranging from a few centimeters to several tens of centimeters), enabling rapid inspection of large areas and the identification of macro defects and internal geometries. However, thermography is limited in its ability to detect small or deep defects due to the effects of thermal diffusion. The complementary strengths of these two methods highlight their potential for combined use, where OCT provides detailed, localized information and IR thermography delivers fast, large-scale assessments. The findings contribute to advancing non-destructive testing approaches for quality control in additive manufacturing and composite material assemblies.

Introduction

Polymer and composite materials are widely used in modern industry, enabling the creation of various components and compounds with complex shapes employed in the energy, mechanical, and instrumentation sectors. Quality control is an integral part of any industry, typically involving non-destructive testing (NDT) of materials and products. Hidden defects in materials and assemblies can compromise structural integrity, necessitating advanced NDT techniques to detect and characterize such flaws [1].

The inspection of various complex-shaped components and joints presents significant challenges for traditional NDT methods [2–4]. For example, ultrasound is limited in its application to thin components, intricate shapes, and materials with complex internal structures. Radiation-based methods, while effective, are associated with increased safety requirements and costly equipment. Electromagnetic methods are restricted to metallic materials. In contrast, Optical Coherence Tomography and infrared

thermography (IRNDT) offer promising alternatives for inspecting such products.

OCT provides volumetric imaging with micrometer resolution by analyzing back reflections of light from within the sample. [5,6]. IR thermography relies on the analysis of temperature fields on the surface of an object. When the surface is thermally stimulated, internal defects impede the heat flow through the material. This results in localized surface overheating above the defects, allowing their thermal imprints to become visible. Both methods (OCT and IRNDT) are particularly sensitive to defects common in polymer and composite materials, allowing for the inspection of products with diverse shapes and sizes [7,8]. Additionally, they are fast, relatively inexpensive, and non-contact.

However, each method has its limitations. The primary limitation of OCT is its applicability, which is confined to transparent and translucent materials due to the required light penetration. IR thermography, on the other hand, can be applied to a wider range of materials but is less accurate and does not provide as detailed a visualization of the internal structure as OCT.

This paper presents an experimental comparison of these methods as applied to the inspection of parts and joints made of polymer materials.

Experimental Setup and Samples

The experimental study involved the evaluation of four different specimens simulating typical polymer joints and components using two nondestructive testing (NDT) methods: OCT/IRNDT.

OCT System

The OCT system used was a TelestoTEL221 OCT (Thorlabs GmbH, Germany) with a central wavelength of 1.3 μm . Equipped with an LSM03 objective lens it provides $10 \times 10 \times 3.5 \text{ mm}^3$ imaging volume. This configuration enabled 0.01 mm resolution imaging by analyzing the back-reflected light from the sample surface and within the sample volume. The system was calibrated for materials with varying transparency levels to ensure precise gap measurements and defect detection.

IRNDT System

The IRNDT setup included a FLIR SC7600 infrared camera with a resolution of 512×640 pixels and a maximum frame rate of 125 Hz, along with a Hensel EH Pro 6000 flash lamp that delivered a pulse energy of 6 kJ with a duration of 7 μs . This configuration provided sufficient thermal excitation to detect subsurface defects. Measurements were conducted from the surface of the transparent polymer components, leveraging differential thermal properties to highlight internal flaws. The camera's field of view varied depending on the sample, ranging from 50 to 200 cm^2 , with a resolution of 2 to 5 pixels per millimeter.

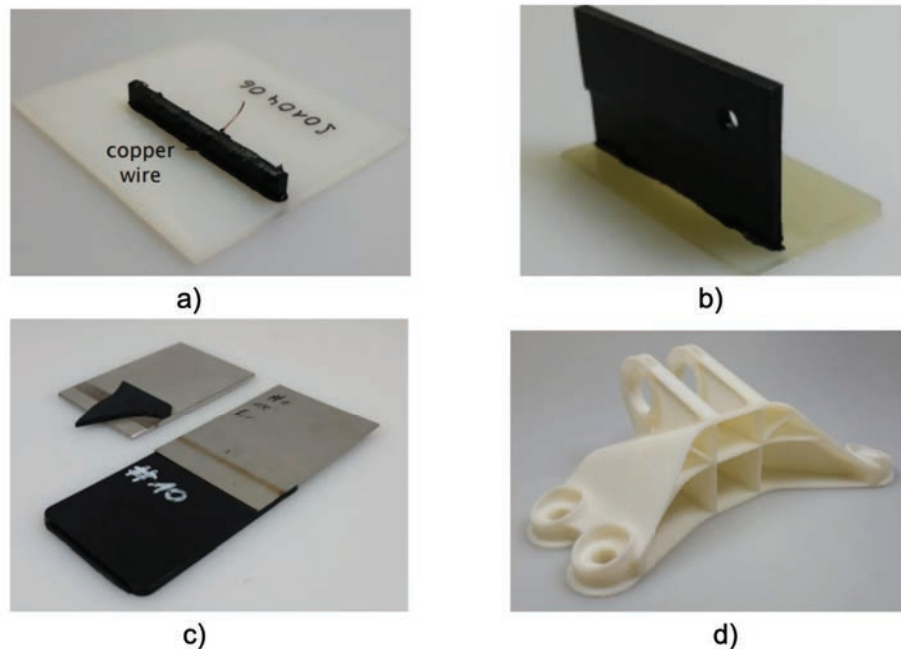


Figure 1. Experimental samples

Samples

- 1. T-Joint Assembly with an Embedded Copper Wire (Figure 1a):
- Upper Joining Partner: Laser-transparent PA6 (natural polymer).
- Lower Joining Partner: Laser-absorbent PA6 (soot filled polymer).
- 2. T-Joint Assembly with a Welding Seam Gap (Figure 1b):
- Upper Joining Partner: Laser-transparent PA6 (natural polymer).
- Lower Joining Partner: Laser-absorbent PA6 (soot filled polymer).
- 3. Metal-Polymer Assembly (Figure 1c):
- Upper Joining Partner: Sheet metal with a laser-structured surface.
- Lower Joining Partner: PBT GF30 polymer.
- 4. 3D-Printed Mount (Figure 1d):
- A complex-shaped part fabricated from PLA plastic using additive manufacturing technology.

Results and Discussion

The results obtained from Optical Coherence Tomography (OCT) provide visualizations of projections and cross-sectional slices of the internal structure of the object, similar to X-ray tomography. However, unlike X-ray tomography, OCT does not require prolonged recording or computational reconstruction; its images are generated in real time during the inspection process.

In contrast, the output of infrared thermographic inspection is a sequence of thermal images. Some of these images reveal internal material defects based on their influence on the rate of surface temperature changes. These defects, located at varying depths, become visible at different observation times due to their thermal response dynamics. Deeper defects take longer to appear on the surface, and their signals become more blurred due to the effects of heat diffusion. As a result, the minimum detectable defect size increases with depth. For instance, in polymers, defects measuring 1 mm can be detected at a depth of 1 mm, while at a depth of 3 mm, the minimum detectable defect size increases to 6 mm. These values also depend on material properties, defect type, heating power, and inspection conditions [8].

Although both methods generate graphical representations of results, a direct comparison is challenging because of their differing data characteristics, resolutions, and field of view. OCT provides high-resolution slices and 3D images of internal structures, while thermography captures surface-level thermal profiles that indicate the presence of subsurface defects.

Figure 2 illustrates a comparison of inspection results for Sample 1 using both methods, highlighting their respective strengths in defect detection.

Figure 2a demonstrates the capabilities of OCT in visualizing cross-sections of the sample, providing a detailed depiction of the defect's shape and location (embedded wire).

While IR thermography does not offer the same level of structural detail, the defect is clearly visible in the thermographic images.

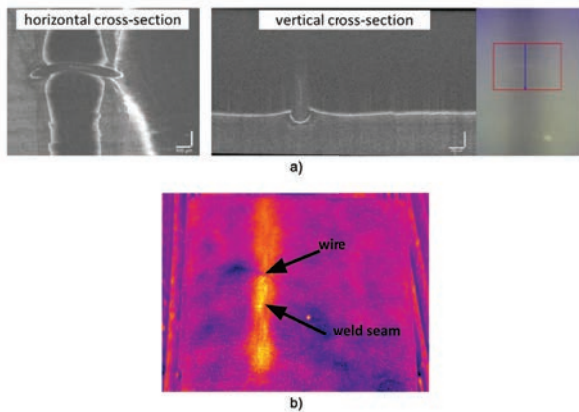


Figure 2. Comparison of inspection results for Sample 1 using OCT (a) and IRNDT (b)

Additionally, IR thermography provides a significantly larger field of view, making it suitable for monitoring extensive areas efficiently.

Figure 3 shows a comparison of the control results for the second sample.

The figure illustrates how both methods successfully detected the weld defect. In the OCT slice (Figure 3a), horizontal lines represent material boundaries. The defect in the weld is depicted as two parallel horizontal lines in the center with a visible gap between them, while properly welded seam shows no visible interface.

In the IR thermogram (Figure 3b), the weld boundary is visualized on the material surface as a darker (cooler) band due to the heat flow transferring through the weld into the joint. The defective area is identified as a gap in the weld, indicating a disruption in heat flow and confirming the presence of a poor joint. Figure 4 illustrates the inspection results for the third specimen, consisting of a metal and polymer plate compound.

Since both materials are opaque to visible and also infrared light, OCT does not provide any information about the internal structure.

In contrast, IR thermography enables visualization of the bonding between the parts and assessment of its quality. On the thermogram (Figure 4 b), several distinct regions can be identified: the uniform surface of the plastic plate, a cooler region corresponding to the plastic-metal connection, and the coldest area representing the welded seam, where heat flow passes most efficiently through the material. Beyond the seam, the surface of the metal plate is visible, appearing less uniform compared to the plastic plate due to the material's surface properties. Figure 5 presents the inspection results of the fourth sample using both methods.

The OCT method reveals small pores and delaminations, as well as the boundaries of 3D printing layers (Figure 5a). While IR thermography does not provide such detailed imagery or the ability to detect small defects, it offers a much larger inspection area,

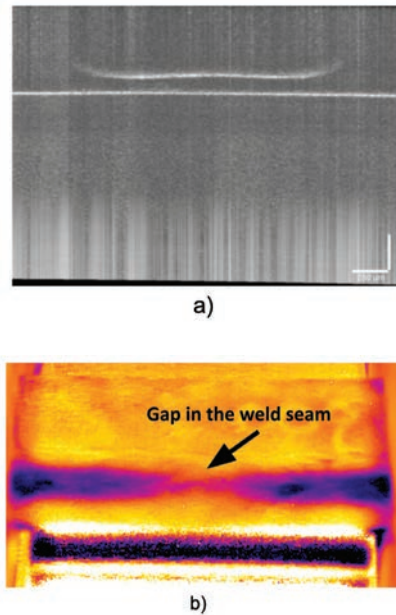


Figure 3. Comparison of inspection results for Sample 2 using OCT (a) and IRNDT (b)

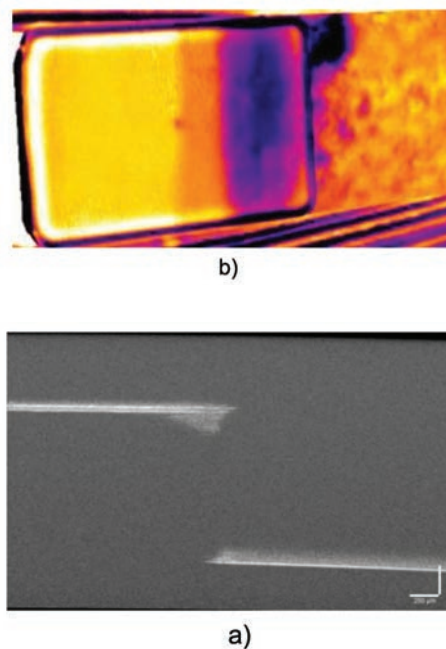


Figure 4. Comparison of inspection results for Sample 3 using OCT (a) and IRNDT (b)



BRNO
INDUSTRY

WEEK

8.-11. dubna 2025

www.industryweek.cz

encompassing the entire sample in a single image. Additionally, IR thermography reveals the macrostructure of the sample. For instance, in the figure, traces of vertical walls are visible through the horizontal surface. This demonstrates that IR thermography is more suitable for detecting macro defects and examining the internal geometry of such parts, whereas OCT is a well suited method for detailed internal analysis.

Conclusion

This study compared optical coherence tomography and flash-pulse thermography for non-destructive testing of various samples, focusing on their effectiveness in detecting and characterizing defects, particularly gaps in polymer and composite materials.

OCT demonstrated significant advantages in resolving fine details of internal structures. Its ability to measure the size of small gaps and differentiate between material layers makes it highly suitable for precise defect characterization. The method also provided clear visualization of material boundaries and microstructural features, such as 3D printing layers, delaminations, and pores. These capabilities highlight the strength of OCT for detailed, localized inspections, particularly for detecting small-scale defects.

IRNDT, on the other hand, offers the ability to detect gaps but is limited in measuring their precise size or resolving very small gaps. The effectiveness of this method is dependent on the length of the gap being comparable to the thickness of the transparent joining partner. Despite these limitations, IR thermography excels in providing a larger field of view, allowing for the rapid inspection of extensive areas. It is particularly effective for identifying macro defects and assessing internal geometry in scenarios where detailed microstructural resolution is less critical.

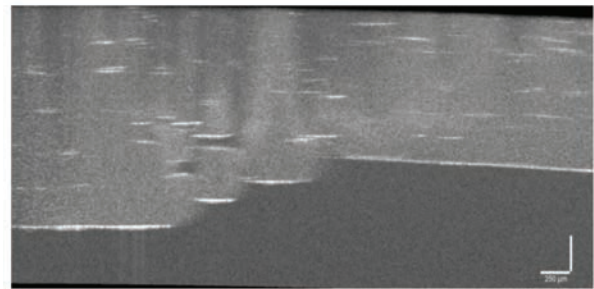
Overall, the complementary nature of these methods suggests that combining OCT and IRNDT could provide a more comprehensive evaluation. OCT is ideal for precise, localized inspections, while IR thermography offers a fast, large-area overview, making the two techniques suitable for different aspects of quality control in polymer and composite material assemblies.

Acknowledgements

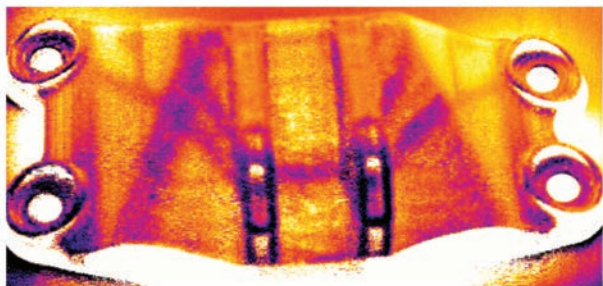
The results presented in this publication were obtained within the project Luaba22014, which is funded by the Ministry of Education, Youth and Sport.

References

- [1] Gholizadeh S. A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Struct Integr* 2016;1:50–7. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008>.
- [2] TOWSYFYAN H, BIGURI A, BOARDMAN R, BLUMENSATH T. Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures. *Chinese J Aeronaut* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.017>.
- [3] Charles J. Hellier. *Handbook of Nondestructive Evaluation, Second Edition*.



a)



b)

Figure 5. Comparison of inspection results for Sample 4 using OCT (a) and IRNDT (b)

McGraw-Hill Education; 2013.

[4] Federal Aviation Administration (FAA). *Aviation Maintenance Technician Handbook. Aviation Supplies & Academics*; 2018.

[5] Maiwald F, Roeder C, Schmidt M, Hierl S. Optical Coherence Tomography for 3D Weld Seam Localization in Absorber-Free Laser Transmission Welding. *Appl Sci* 2022;12:2718. <https://doi.org/10.3390/app12052718>.

[6] Huang D, Swanson EA, Lin CP, Schuman JS, Stinson WG, Chang W, et al. Optical Coherence Tomography. *Science* (80-) 1991;254:1178–81. <https://doi.org/10.1126/science.1957169>.

[7] Vavilov VP. Pulsed thermal NDT of materials: back to the basics. *Nondestruct Test Eval* 2007;22:177–97. <https://doi.org/10.1080/10589750701448407>.

[8] Moskovchenko A, Švantner M, Vavilov V, Chulkov A. Analyzing probability of detection as a function of defect size and depth in pulsed IR thermography. *NDT E Int* 2022;130:102673. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2022.102673>.

Článek prošel recenzním řízením.

Šéfredaktor: Ing. Daniel Zuth, Ph.D. | **Zástupce šéfredaktora:** Ing. Ladislav Hrabec, Ph.D. | **Tisk:** Tiskárna Printo spol. s r.o. | **Redakční rada:** doc. Ing. Juraj Grenčík, Ph.D., Ing. Martin Holec, Ph.D., Ing. Jan Hroch, Prof. Ing. Hana Pačaiová, Ph.D., Ondřej Švec, DiS. | **Vydavatel:** Asociace technických diagnostiků ČR, z. s., VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba **Vychází:** 2× ročně | **MK ČR:** 5 979 | **ISSN:** 1210-311x

Kopírování nebo rozšiřování časopisu, případně jeho částí, výhradně s povolením vydavatele.

ROBOTY 2025

**Přijďte zjistit, kam
se robotika posunula.**

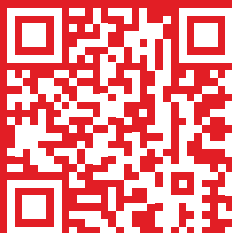
NA MSV

7.–11. října 2025

Brno – Výstaviště, Hala P

Konference ROBOTY 2025 bude poprvé součástí Mezinárodního strojírenského veletrhu. Přesouváme se do Haly P, kde vás čeká:

- živé technologie a robotická řešení,
- tematické instalace s reálnými scénáři nasazení,
- MSV Tour s komentovanými vstupy,
- podcastové studio s hosty z průmyslu,
- přímé napojení na program MSV.



DLOUHODOBÝ VZTAH

**Jsme správným partnerem
pro vaše IO-Link projekty.**

S rozbočovači IO-Link společnosti Murrelektronik zjednodušíte diagnostiku a údržbu, zkrátíte dobu uvedení do provozu, zvýšíte produktivitu a zároveň minimalizujete náklady!

- ➔ Varianty Plug & Play
- ➔ Modely se 4 analogovými kanály
- ➔ Různé bitmapping layouty

Mluvíme stejným jazykem!

➔ murrelektronik.cz

Use  **IO-Link**
Universal · Smart · Easy

