



# TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

1

ROČNÍK XXXIII

2024

ASOCIACE TECHNICKÝCH DIAGNOSTIKŮ ČESKÉ REPUBLIKY, z. s.

## TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA V ČESKÉ PRAXI

- |  |             |
|--|-------------|
| <b>Diagnostika asynchronních motorů a jejich testování</b><br><i>Diagnosics of asynchronous motors and their testing</i>                                       | <b>TD4</b>  |
| <b>Moderní přístupy v diagnostice technických systémů</b><br><i>Modern approaches in diagnostics of technical systems</i>                                      | <b>TD7</b>  |
| <b>Analýza vzorů částečných výbojů různých izolovaných vodičů</b><br><i>Analysis of partial discharge patterns of various insulated conductors</i>             | <b>TD12</b> |
| <b>Proč kontrolovat runout hřídele a jeho vliv na měření vibrací hřídele</b><br><i>Why check shaft runout and its effect on shaft vibration measurement</i>    | <b>TD16</b> |
| <b>Diagnostika transformátorových průchodek pomocí napětí o snížené frekvenci</b><br><i>Diagnosics of transformer bushings using reduced frequency voltage</i> | <b>TD18</b> |
| <b>Na jaké aplikace nelze kvantitativní termografii použít. Nebo lze?</b><br><i>What applications cannot be used within quantitative thermography. Or can?</i> | <b>TD23</b> |

[www.atdcr.cz](http://www.atdcr.cz)



# CONTROL ENGINEERING Česko

Mezinárodní zdroj informací o řízení,  
přístrojovém vybavení a automatizaci.



Objednejte si bezplatné zasílání tištěného časopisu na [www.controlengcesko.com](http://www.controlengcesko.com).



## Vážení přátelé technické diagnostiky,

rád bych vás všechny tímto úvodníkem přivítal v roce 2024. Věřím, že tento rok bude pro všechny úspěšnější než ten minulý a technická diagnostika bude jednou z hlavních cest pro úspory v průmyslových provozech.

Aktuálně se vám do ruky dostává číslo časopisu, které mapuje průřez všech našich diagnostických skupin. Dostáváte tedy informace z širokého spektra technické diagnostiky. Rád využiji tento prostor, abych vás také informoval o novinkách, které se v Asociaci technických diagnostiků momentálně dějí. Započali jsme pokusy o komunikaci s ministerstvy. Kladná odezva proběhla od ministra zdravotnictví Vlastimila Válka, kdy se uskutečnila schůzka se zástupci skupiny termodiagnostiky k tématu využití této disciplíny ve zdravotnictví. Samozřejmě v roce 2024 na tuto aktivitu navážeme a budeme oslovovat i další ministerstva. Velmi zajímavou informací je, že v tomto roce dojde ke vzniku nové odborné skupiny, která se bude zabývat diagnostikou paliv. V současné době se jedná o hodně aktuální téma a my jsme rádi, že se rodina ATD rozroste o dalšího člena.

Závěrem bych vám chtěl popřát příjemné čtení a hodně úspěchů ve vaší činnosti.



Ondřej Švec, DiS., CTD  
Prezident ATD ČR, z.s.



Chcete dřívější vydání speciálu **Technická diagnostika**?  
Napiště nám na [redakce@udrzbapodniku.cz](mailto:redakce@udrzbapodniku.cz)

ŠÉFREDAKTOR:  
ZÁSTUPCE ŠÉFREDAKTORA:  
GRAFICKÁ ÚPRAVA:  
REDAKČNÍ RADA:

ING. DANIEL ZUTH, PH.D.  
ING. LADISLAV HRABEC, PH.D.  
JIŘÍ RATAJ  
DOC. ING. JURAJ GREŇČÍK, PH.D.,  
ING. MARTIN HOLEK, PH.D.,  
ING. JAN HROCH,  
PROF. ING. HANA PAČAIOVÁ, PH.D.,  
ONDŘEJ ŠVEC, DiS  
ASOCIACE TECHNICKÝCH  
DIAGNOSTIKŮ ČR, Z. S.  
VŠB-TU OSTRAVA  
17. LISTOPADU 15 / 2172  
708 33 OSTRAVA - PORUBA  
2× ROČNĚ  
5 979  
1210-311X

VYDAVATEL:

VYCHÁZÍ:  
MK ČR:  
ISSN:

EDITOR-IN-CHIEF:  
ZÁSTUPCE ŠÉFREDAKTORA:  
GRAPHIC EDIT:  
EDITORIAL BOARD:

PUBLISHER:

VYCHÁZÍ:  
MK ČR:  
ISSN:

ING. DANIEL ZUTH, PH.D.  
ING. LADISLAV HRABEC, PH.D.  
JIŘÍ RATAJ  
DOC. ING. JURAJ GREŇČÍK, PH.D.,  
ING. MARTIN HOLEK, PH.D.,  
ING. JAN HROCH,  
PROF. ING. HANA PAČAIOVÁ, PH.D.,  
ONDŘEJ ŠVEC, DiS  
ASOCIACE TECHNICKÝCH  
DIAGNOSTIKŮ ČR, Z. S.  
VŠB-TU OSTRAVA  
17. LISTOPADU 15 / 2172  
708 33 OSTRAVA - PORUBA  
2× ROČNĚ  
5 979  
1210-311X

ETICKÝ KODEX: ČASOPIS TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA SE PŘI SVÉM VYDÁVÁNÍ ŘÍDÍ ETICKÝM KODEXEM, KTERÝ STANOVUJE PRAVIDLA PRO PUBLIKACI PŘÍSPĚVKŮ. TO SE TÝKÁ JAK POSUZOVÁNÍ AUTORSKÝCH PŘÍSPĚVKŮ, TAK NÁSLEDNĚHO RECENZNÍHO ŘÍZENÍ. JEHO ZNĚNÍM JSOU POVINNI SE ŘÍDIT AUTOŘI, RECENZENTI I REDAKCE. CELÉ ZNĚNÍ ETICKÉHO KODEXU JE ZVEŘEJNĚNO NA WWW.ATDCR.CZ.

# Diagnostika asynchronních motorů a jejich testování

## Diagnosics of asynchronous motors and their testing

ING. PETR NAHODIL, PH.D., DOC. ING. MILOŠ HAMMER, CSC.  
ELVITED – ING. PETR NAHODIL, VUT FSI BRNO <sup>1)</sup>

### Anotace

Diagnostika motorů elektrických pohonů napájených z frekvenčních měničů je v současné době důležitá. Tento článek popisuje možnosti využití diagnostických metod při sledování kondice elektrických pohonů v rámci prediktivní a proaktivní údržby. Popisuje ucelený pohled na multiparametrickou diagnostiku elektrických pohonů napájených nejen z frekvenčních měničů.

### 1. Úvod

Využití asynchronních motorů jako součást elektrických pohonů v průmyslu je v dnešní době široké, v mnoha případech jsou motory nasazovány společně s frekvenčními měniči, kde tato zařízení nahrazují dříve široce používané stejnosměrné regulované pohony. Aby uvedená zařízení spolehlivě a dlouhodobě fungovala, je třeba přistupovat k diagnostice elektrických pohonů multiparametricky s využitím diagnostických metod, jako je především elektrodiagnostika, vibrodiagnostika, termodiagnostika nebo tribodiagnostika. Všechny tyto diagnostické metody jsou pro ucelené posouzení stavu elektrických pohonů zejména asynchronních motorů velmi důležité.

### 2. Specifika elektrických motorů napájených z frekvenčních měničů

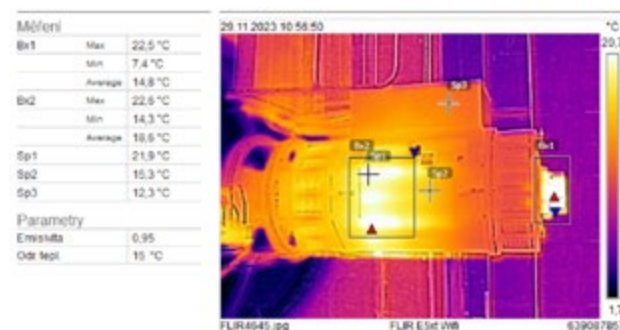
Běžné asynchronní motory jsou napájeny ze sítě sinusovým třífázovým napětím, kde tzv. souhlasné napájecí napětí (CMV – common mode voltage / vektorový součet všech tří napájecích fází) je nulové. Na nosné napájecí frekvenci jsou obvykle modulovány jen jednotky lichých harmonických násobků napájecí frekvence. V případě, že je elektrický motor napájen z frekvenčního měniče, nemá napájecí napětí sinusový průběh, souhlasné napětí (CMV) není nulové a v napájecím proudu se obvykle vyskytují vysoké frekvence (řádově kHz) způsobené spínací frekvencí frekvenčního měniče, které mají nepříznivý vliv jak na elektrický motor, tak i na další části poháněného zařízení. Z těchto důvodů je nutné dodržet všechna doporučení z hlediska správného připojení motoru k frekvenčnímu měniči a také dalších doporučení týkajících se instalace motoru k poháněnému zařízení. Tyto vlivy se pak projevují hřídelovým napětím, ložiskovými a kapacitními proudy, které ohrožují jak ložiska a mazací náplně elektromotoru, tak i další zařízení jako například ložiska a ucpávky čerpadel a ložiska a ozubení převodovek.

1) Ing. Petr Nahodil, Ph.D.  
ELVITED – Ing. Petr Nahodil  
Tišnovská 6, 679 23 Lomnice  
mobil: +420 737 275 354, e-mail: [elvited@seznam.cz](mailto:elvited@seznam.cz),  
<https://elvited.webnode.cz/>

Dalším specifickým moderních pohonů jsou dynamické účinky při jejich provozu. Velmi často dochází k častým a rychlým změnám otáček, změnám zátěžného momentu, výkonu apod. Těmito velmi často se opakujícími změnami dochází k namáhání jak strojních částí motoru (ložiska, rotorová klec, hřídel, spojka...), tak i mechanickému, elektrickému a tepelnému namáhání vinutí, které ovlivňuje životnost a spolehlivost elektrického motoru.

### 3. Multiparametrická diagnostika

Využití diagnostických metod u elektrických motorů je poměrně značné. Abychom mohli komplexně zhodnotit stav motoru, je třeba jej hodnotit z hlediska kondice vinutí a jeho izolačních vlastností, které testujeme většinou v odpojeném statickém stavu, ale rovněž z hlediska provozních (dynamických), tzn. využití diagnostických metod za provozu. Mezi tyto metody patří především vibrodiagnostika, ze které lze vyčíst především stav ložisek, vyvážení rotoru, geometrické nesymetrie magnetického pole, ustavení elektrického motoru vůči poháněnému zařízení a mnoho dalších závad. Další významnou metodou je elektrodiagnostika. Aplikací metod dynamické elektrodiagnostiky lze zjistit z analýzy statorového proudu stav rotorové klece a tyčí, nesymetrii napájecího proudu a napětí, moment na hřídeli, výkon, účinnost apod. Nedílnou součástí elektrodiagnostiky je také měření hřídelových napětí a proudů, ložiskových napětí, vyrovnávacích a kapacitních proudů v PE vodičích a v ekvipotenciálním pospojování strojního zařízení. Významné místo v multiparametrické diagnostice má také termodiagnostika. Její využití při analýze stavu elektrického motoru má také nezastupitelné místo zejména při kontrole účinnosti chlazení motoru – obr. 1, dále pak u sledování teplot ložisek a spojek, a především při kontrole ekletických spojů a jejich oteplení z důvodu přechodových odporů nebo kontrole oteplení jednotlivých vodičů. Pro správný provoz motoru je velmi důležité znát kondici mazání ložisek, což spadá do



Obr. 1 Snímek infračerveného spektra generátoru

tribodiagnostiky. Pomocí jejích metod lze například zjistit, zda nedošlo k záměně a smíchání nestejnorodých mazacích prostředků, zda plastické mazivo nebo olej není degradován například průchodem elektrického proudu přes ložisko, nebo kontaminován jinou látkou. Nesmíme zapomenout ani na tzv. vizuální prohlídku zařízení, díky které v některých případech dokážeme odhalit vady a závady, které nejsme schopni popsat žádnou z výše vyjmenovaných diagnostických metod.

V dalším textu jsou některé diagnostické metody podrobněji rozebrány.

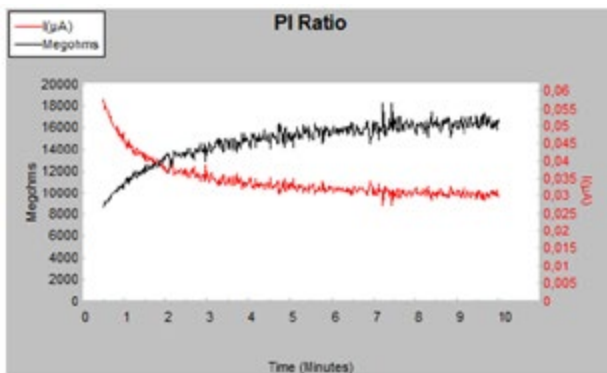
#### 4. Metody elektrodiagnostiky

Tyto metody můžeme rozdělit na dvě části:

- statická elektrodiagnostika – provádí se na elektrickém motoru, který je v klidu, a když je motor odpojen od napájecích kabelů,
- dynamická elektrodiagnostika – provádí se za chodu motoru, na němž analyzujeme napájecí a ostatní proudy.

##### a. Statická elektrodiagnostika

Pomocí statických metod diagnostikujeme především stav izolačního systému vinutí. Základním testem je **kontrola izolačního stavu** (obr. 2) vinutí vůči železu a kontrola izolačního stavu mezi jednotlivými fázemi. Aby bylo možné z dlouhodobého hlediska sledovat trendy hodnot naměřeného izolačního stavu, je důležité znát teplotu měřeného vinutí a naměřený izolační odpor přepočítat na teplotu 40 °C.



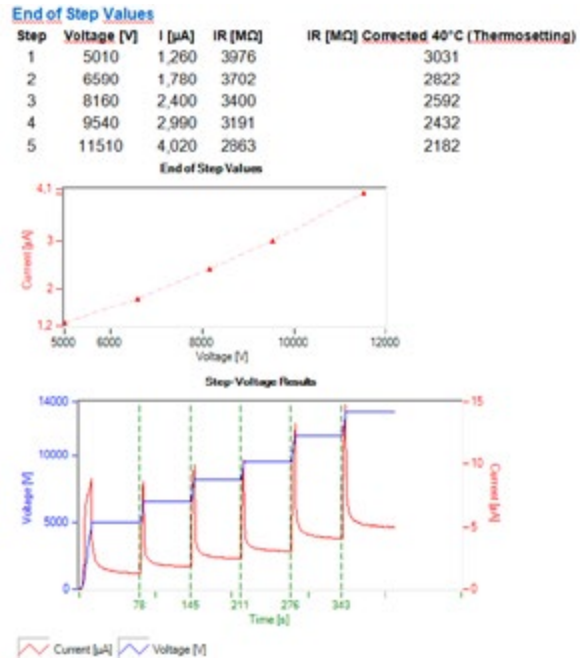
Obr. 2 Průběh proudu a izolačního odporu – polarizační křivky

Dalším parametrem hodnocení vinutí je hodnota **polarizačního indexu (PI)** a **hodnota dielektrické absorpce (DAR, DA)**. Tyto hodnoty popisují polarizační křivku při měření izolačního odporu a dávají obraz, zda vinutí není navlhle či znečištěné.

**Měření ohmických odporů jednotlivých fází.** Porovnáním naměřených ohmických odporů lze zjistit, zda v obvodu vinutí nejsou přechodové odpory, případně zda se nevyskytuje nějaký vodivostní problém na jednotlivých fázích. Předpokladem je, aby měření odporu bylo provedeno přístrojem, který umí měřit vyšším měřicím proudem a eliminovat odpory měřicích kabelů a přechodového odporu připojením měřicích sond.

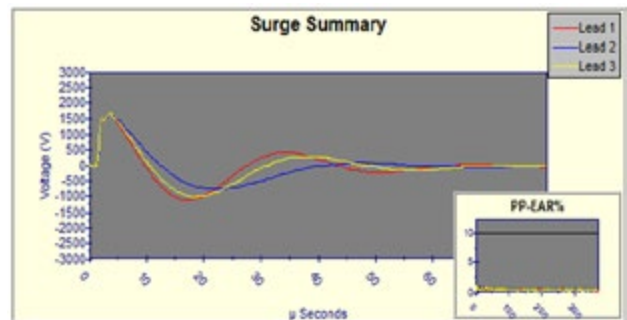
**Měření závislosti unikajících proudů na napětí (step test).** Tímto testem zjišťujeme odchylku od lineární závislos-

ti unikajícího proudu na napětí, nebo při dlouhodobějším testování změnu strmosti této křivky. Součástí tohoto testu bývá i kontrola **elektrické pevnosti vinutí**, která může být provedena i samostatně. Tento test je nejlépe vypovídající z hlediska stárnutí izolace. Příklad zachycuje obr. 3.



Obr. 3 Závislost unikajících proudů na napětí – Step test

Velmi důležitým testem je rázová zkouška vinutí, resp. **test strmou vlnou**. Tímto jsme schopni odhalit mezizávitové zkratky. Tam, kde nemůžeme rozpojit uzel motoru (hvězdu motoru např. u VN motoru), jsme testem schopni zjistit i mezifázové zkratky. Tato metoda spočívá v porovnání vln odezvy mezi jednotlivými fázemi. Příklad je uveden na obr. 4.

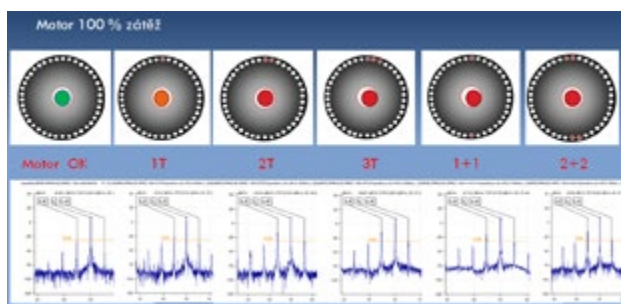


Obr. 4 Test strmou vlnou

U vysokonapěťových elektrických motorů aplikujeme navíc AC (střídavé) testy měření závislosti tg delta, kapacity a unikajících proudů na napětí. Vypovídajícím testem o stavu vysokonapěťové izolace je dále měření částečných výbojů ve vinutí.

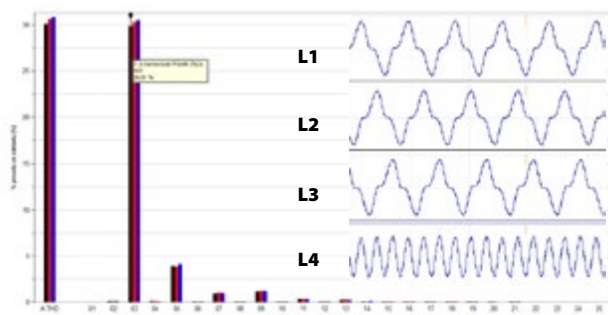
### b. Dynamická elektrodiagnostika

Dynamická diagnostika elektrického motoru je také jedním z důležitých segmentů diagnostiky, při které zjišťujeme chování motoru za provozu. Zde můžeme měřit například napájecí proudy, které jsou velmi důležité třeba pro nastavení ochran motoru, kdy vyhodnocujeme záběrný proud a ustálený proud při běžném provozu. Dále lze z naměřených dat zjistit například rozběhový čas, který je potřeba k roztočení pohonu na jmenovité otáčky. Tyto údaje jsou velmi důležité pro správné nastavení ochran motorů. Dalším faktorem, který můžeme vyčíst z analýzy proudů, je symetrie napájecích proudů. Ta může být ovlivněna přechodovými odpory v jednotlivých fázích, rozdílem napájecího napětí ve fázích, ale také třeba i začínajícím mezizávitovým zkratem ve vinutí. Dále z analýzy proudu můžeme vyčíst stav rotorové klece motoru pomocí analýzy postranního pásma napájecího proudu. Příklad je uveden na obr. 5.



Obr. 5 Analýza statorového proudu, kontrola rotorové klece

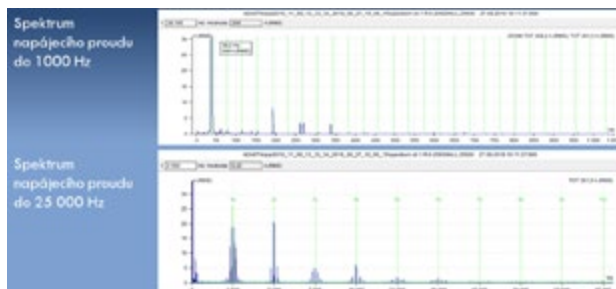
Další důležitou analýzou statorového proudu je vliv harmonických násobků, tzv. THD faktor (příklad je na obr. 6) a vliv vyšších frekvencí (kapacitních proudů), které jsou spojeny s funkcí frekvenčního měniče (příklad – obr. 7).



Obr. 6 THD faktor (zkreslení napájecí frekvence u generátoru)

Pokud měříme u elektrických pohonů proud i napětí, můžeme mít z měření mnoho dalších doplňujících informací – například příkon, velikosti napětí v jednotlivých fázích, pokles napětí při rozběhu, účinníku, momentu na hřídeli apod.

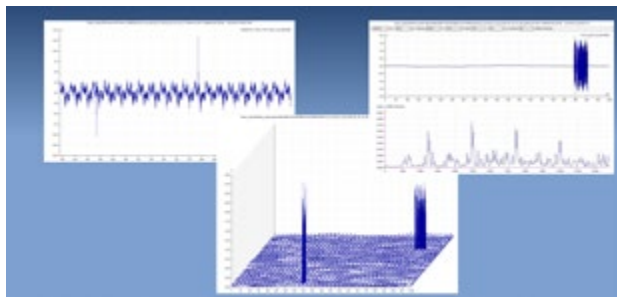
Ve všech těchto případech je vhodné provádět měření a vyhodnocení po delší časový úsek, zvláště pak, pokud zařízení pracuje v nějakých pracovních cyklech, kdy je potřeba



Obr. 7 Spektrum napájecího proudu

zaznamenat několik opakujících se cyklů za sebou, aby bylo možné vyhodnotit i přechodové děje.

Nedílnou součástí elektrodiagnostiky je také měření hřídeľových napětí a proudů, ložiskových napětí, proudů tekoucích přes spojku, v PE vodičích, ve stínění kabelů a také proudů v ekvipotenciálním pospojování zařízení. Tyto proudy je pak nutné hodnotit jak spektrálně, tak i v časovém průběhu z důvodu naměřených krátkých vysokofrekvenčních výbojů, které jsou právě velmi často detekovány v PE vodičích (obr. 8) a mohou se vyskytovat jen po velmi krátkou dobu, řádově i milisekundy. Z naměřených hodnot lze pak sestavit proudové mapy, které slouží k určení zdroje průsaku a uniku proudů. Tato měření bývají však velice náročná z důvodu rozsahu a počtu měřicích míst a náročnosti na jejich vyhodnocení.



Obr. 8 Vyšetřování proudu v PE vodiči uzemnění v časovém průběhu

### 5. Metody vibrodiagnostiky

Metody vibrodiagnostiky patří k nezákladnějším metodám v diagnostice elektrických motorů. Těmito metodami lze odhalit především mechanické závady, třeba závady poškození ložisek, nevyváhu rotoru, rezonanci, špatné ustavení, ale také závady, které jsou způsobeny deformací magnetického pole. K těmto závadám se řadí například excentrická vzduchová mezera, volné nebo nejčastěji zkřížené a deformované elektromotor vlivem špatného vypodložení patek motoru či kroučícího se rámu. Důležitým projevem na vibrace u elektrických motorů jsou také vlivy kapacitních proudů na ložiska, které se projevují ve spektrech zrychlení a přechodové děje při změně otáček a zatížení elektropohonu. Stejně jako tomu bylo u dynamické elektrodiagnostiky, je nutné měřit po určitou dobu či za několik



pracovních cyklů, abychom rozpoznali děje, které jsou ovlivněny otáčkami a které nejsou závislé na otáčkách elektropohonu.

Dobrým pomocníkem při vibrodiagnostice elektrických motorů bývá i převedení vibračního signálu na akustický poslech, kdy tento signál lze pomocí různých frekvenčních filtrů filtrovat či zrychlovat nebo zpomalovat.

## 6. Další metody a možnosti diagnostiky

Existuje ještě celá řada diagnostických metod, které lze uplatnit při diagnostice elektrických pohonů. Jako příklad lze kromě termodiagnostiky a tribodiagnostiky uvést analýzu rozptylových polí elektrického motoru, různá rozměrová a optická měření a v neposlední řadě také analýzu poškozených částí motoru ke zjištění prvotních příčin havárie či závady. Tyto rozborů se mohou týkat například poškozených a havarovaných ložisek, analýz poškozených vinutí apod. K dalším metodám je možné zařadit i měření koncentrace ozónu uvnitř elektrického motoru, který vzniká výbojovou činností u vysokonapěťových strojů. V některých případech je nutné provést i měření torzních kmitů na hřídeli, a to zvláště tam, kde hrozí torzní rozkmitání rotorové soustavy, případně pulzující krouticí moment. Dalším oborem uplatňujícím se při diagnostice elektromotorů je měření a analýza hluku. Zde lze i s výhodou použít hlukové kamery, aby bylo přesněji možné identifikovat zdroj hluku.

Mezi diagnostické metody lze také zařadit nedestruktivní testování, například využití ultrazvukových metod pro zjišťování trhlin na hřídeli, či prohlídku vnitřního prostoru elektrického motoru pomocí endoskopu.

## 7. Závěr

Výhodou popsaných metod bývá provedení dynamické elektrodiagnostiky a vibrodiagnostiky současně a vzájemné porovnání a vyhodnocení výsledků naměření i s ostatními provozními daty. Tyto analýzy kladou vysoké nároky na kvalifikaci a zkušenosti diagnostiků jak z hlediska znalosti diagnostických

oborů, tak z hlediska prací na vyhrazených elektrických zařízeních dle Nařízení vlády č. 194/2022 Sb.

Jak je vidět z výše uvedeného, diagnostika relativně jednoduchého elektrického pohonu je velmi rozsáhlá a může být i náročná. Základem všech prováděných měření je správná volba diagnostických metod, nastavení hodnotících parametrů a hlavně opakované měření v rámci on/off-line monitorování zařízení. Aby měla veškerá diagnostika smysl, nestačí jen provádět měření a monitorovat, ale z naměřených dat je vždy nutné učinit správné závěry, navrhnou opatření v rámci údržby strojů. Důležité je i vedení záznamů o historii oprav a poruch, kde tyto záznamy mohou pomoci jak při návrhu opatření, tak při nasazení moderních inteligentních systémů. Z naměřených trendů lze pak správně načasovat možnosti opravy, případně nějakého servisního zásahu, ať už je servisní zásah prováděn vlastními silami, nebo odborným servisním pracovištěm. Po opravě a servisním zásahu by mělo být vždy učiněno opakované měření, aby se potvrdila účinnost navržených a správně aplikovaných opatření a měli jsme opět zaznamenaný výchozí stav zařízení po opravě.

## Literatura:

- [1] VEDRAL, J. a R. SEDLÁČEK, R. bezdemontážní diagnostika vysokonapěťových elektrických strojů. Vydalo České vysoké učení technické v Praze. Česká technika – nakladatelství ČVUT Praha 2023. ISBN 978-80-01-07135-9.
- [2] CZICHOS, H. Handbook of Technical Diagnostics. Springer Verlag. Heidelberg. 2020.
- [3] NAHODIL, P. Reengineering systému údržby pohonů s proměnlivými otáčkami s využitím multiparametrické diagnostiky. Brno, 2022. Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. MILOŠ HAMMER, CSc.

*Článek prošel recenzním řízením.*

# Moderní přístupy v diagnostice technických systémů

## Modern approaches in diagnostics of technical systems

MILOŠ HAMMER, VUT V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ<sup>1)</sup>

ALENA HÁJKOVÁ, VUT V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ<sup>2)</sup>

### Anotace

V současnosti dochází v průmyslu k digitalizaci a automatizaci většiny procesů. Jednou z oblastí digitalizace je také diagnostika různých technických systémů, zvláště pak strojů. K tomu se nyní využívá moderních přístupů, ke kterým patří

i on-line diagnostika uvedených zařízení. Hlavní myšlenkou zavedení on-line diagnostických systémů je i trvalé sledování stavu zařízení a případně efektivní plánování údržby nebo zjištění přesné závady stroje v krátkém časovém úseku. Možný přístup k řešení je různý, nadějná je snaha využít hardwaru

1) doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Technická 2896/2, 616 69 Brno

tel.: +420 541 142 194, mobil: +420 728 888 597,

e-mail: hammer@fme.vutbr.cz

2) Ing. et Ing. Alena Hájková

VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Technická 2896/2, 616 69 Brno

Mobil: +420 728 964 249,

e-mail: Alena.Hajkova@vutbr.cz

vlastních řídicích systémů, např. programovatelných logických automatů (PLC) sledovaného objektu, získat data a tato vyhodnotit vhodným softwarem. Předkládaný článek seznamuje s možností aplikace analyzačního softwaru CMS X-Tools společnosti Siemens. Ten byl využit na našem pracovišti k monitoringu vibrací, konkrétně je v článku popsáno určení reálné závady na poškozeném ložisku.

Součástí textu je také naznačení dalších moderních přístupů v diagnostice technických systémů, a to využití teorie rizik. Je předložen příklad možnosti řešení, konkrétně v diagnostice závad na ložisku.

## 1. Úvod

Pro první část článku je použit konkrétní systém SIPLUS CMS a rovněž analytický systém pro vyhodnocení dat, vše od firmy Siemens. Následně je v textu stručně rozebrán konkrétní experiment a jeho vyhodnocení. V článku je dále následně naznačeno možné použití teorie rizik při rozboru diagnostiky závad na ložisku.



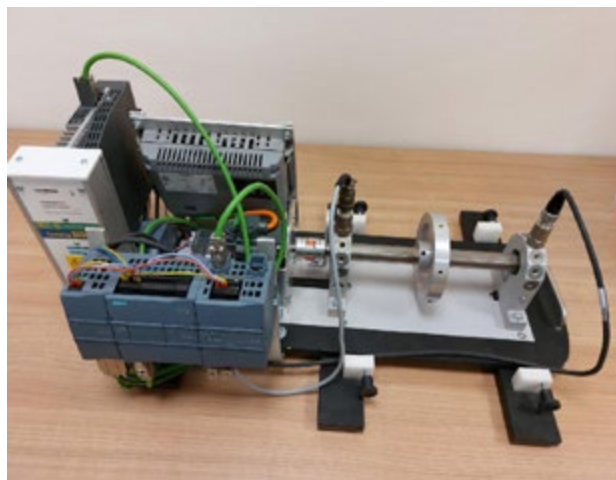
Obr. 1 SIPLUS CMS1200 [3]

## 2. Použitý systém SIPLUS CMS, popis modelu a jeho komponent

V našem experimentu byl použit systém SIPLUS CMS1200 (obr. 1). Tento funguje ve spolupráci s programovatelným automatem SIMATIC S7-1200, který může sloužit k nepřetržitému sledování stavu objektů pomocí diagnostických metod. Tou je v našem případě vibrodiagnostika. Celkem lze připojit až 28 vibračních senzorů. Analýza dat už probíhá v samotném diagnostickém systému. K analýze poslouží široká škála metod pro vyhodnocování dat – např. spektrální analýza FFT, sledování charakteristických hodnot ložisek, sledování trendových hodnot, analýza frekvenčních spekter atd. Veškeré tyto analýzy si lze zobrazit a následně vlastními silami vyhodnotit v analytickém systému CMS X-Tools, kam jsou přímo všechna data streamována.

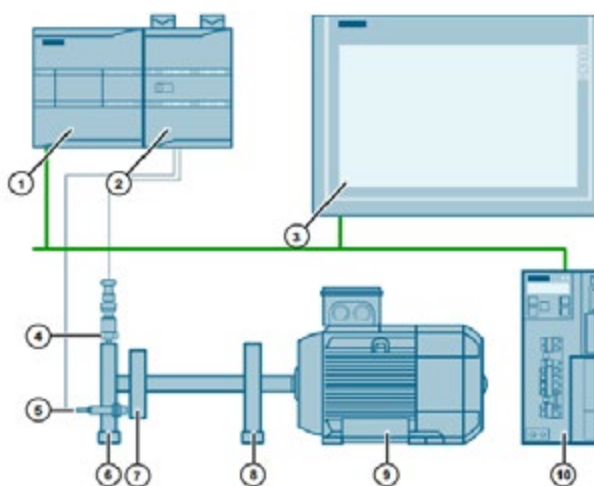
Experiment pro vibrační monitoring probíhal na modelu dle obr. 2. V levé části obrázku je znázorněn hardware modelu. Popis některých nejdůležitějších částí je uveden v textu dále. V pravé části obrázku se nachází soustava, která v našem případě slouží k realizaci a měření vibrací. Tato soustava je hřídelí spojena se servomotorem modelu.

Dále je pojednáno o konkrétních zařízeních použitých k on-line vibračnímu monitoringu modelu. Rozebrán bude dotykový panel SIMATIC HMI TP700 Comfort, monitorovací systém SIPLUS CMS1200 SM 1281, programovatelný logický automat SIMATIC S7-1200 a servomotor SINAMICS V90. Tato kombinace zařízení může být jednou z variant, jak zavést on-line monitoring od firmy Siemens ve skutečné praxi.



Obr. 2 Model pro praktickou realizaci monitoringu vibrací

Pro názornost je ještě uveden obecný obr. 3, který zachycuje přehled zapojení zařízení právě pro vibrační monitoring. Jedná se o schéma, které je v hlavních částech podobné modelu dle obr. 2.



Obr. 3 Přehled zapojení zařízení v modelu pro vibrační monitoring [3]

Jako ve většině průmyslových aplikacích je dotykový panel určen především ke komunikaci s uživatelem. V tomto případě byl použit dotykový panel SIMATIC HMI TP700 Comfort (na obr. 3 označen číslem 3, podobně číslem označena i jiná zaří-



zení dále v textu). Zařízení nedisponuje žádnými funkčními tlačítky, tzn. veškerá tlačítka na displeji musejí být softwarově naprogramována. Velkou výhodou je možnost komunikace s dalšími zařízeními v rámci široké škály komunikačních protokolů. Komunikovat je možné pomocí PROFINET, IRT, PROFIBUS, Ethernet nebo MPI. Pokud jde o interface panelu, jsou k dispozici porty pro zapojení switche, kabelů RS422 / RS485, USB 2.0 a dvě SD karty. Zajímavostí je umístění reproduktor pro zvukové reakce na základě vyhodnocení programu.

Hlavním zařízením systému pro vibrační monitoring je SIPHERUS CMS1200 SM1281 (na obr. 3 označení 1, 2). Jde o rozšiřovací modul pro programovatelný logický automat (PLC) SIMATIC. Tento modul zajišťuje monitorování požadovaných komponent. Uvnitř modulu je vibrační karta, která zaznamenává a analyzuje data získaná z použitých senzorů. Pro velkokapacitní aplikace lze PLC rozšířit až o 7 těchto modulů zároveň. Standardní modul je vybaven funkcemi: harmonické frekvence pro poruchy ložiska, analýza trendů, spektrální analýza (Fast Fourier Transformation), extrakce hrubých dat pro vlastnoruční analýzu (nejčastěji soubory typu.wav), vlastní webový server (HTTP). Paměť zařízení je 1Gbyte. Konstitucí je modul uzpůsoben pro měření v průmyslových závodech, je vcelku odolný vůči vyšším teplotám a možným pádům z výšek. Obecně je nutné propojení s řídicím PLC, které zajišťuje správný chod kompletního on-line systému.

K vytvoření aplikace pro PLC od firmy Siemens je nutné použít software TIA Portál, který bude popsán dále. Samotný kontrolér lze použít u různých typů průmyslových aplikací (regulace teploty, řízení dopravníku atd.). Modely z řady SIMATIC mají širokou škálu variant. V tomto případě byla k dispozici CPU (centrální řídicí jednotka) s osmi digitálními inputy, šesti digitálními outputy a dvěma analogovými inputy pro přenos spojitých veličin. Napájení pro PLC je v tomto případě připojeno jako samostatný rozšiřující modul.

Ovládání pohybu modelového rotoru bylo zajištěno díky dostupnému servomotoru SINAMICS V90 (na obr. 3 označení 10). Jedná se o kompaktní zařízení, které je propojeno s řídicím PLC SIMATIC a průběžně lze regulovat velikost otáček. Komunikace může probíhat pomocí PROFINET, USS, Modbus RTU nebo pulzního rozhraní. Výkon servomotoru se pohybuje v rozmezí od 0,05 až 7 kW. Uvnitř jsou již integrovány některé bezpečnostní funkce, které po stlačení připojeného tlačítka přejdou do aktivního módu. Dále je možné využívat různé typy integrovaných kodérů pro splnění aplikačních požadavků. Veškerá nastavení je možné provádět v prostředí TIA Portál.

Pro požadovaný chod servopohonu bylo nutné naprogramovat řídicí program PLC a následně získaná data vyhodnocovat. K tomu byly využity softwarové aplikace firmy Siemens TIA Portal a CMS X-Tools. První zmíněný byl použit pro zhotovení programů, které

byly nahrány do PLC a HMI panelu. CMS X-tools je diagnostický nástroj, se kterým bylo následně prováděno vyhodnocování vibrací na základě naměřených dat.

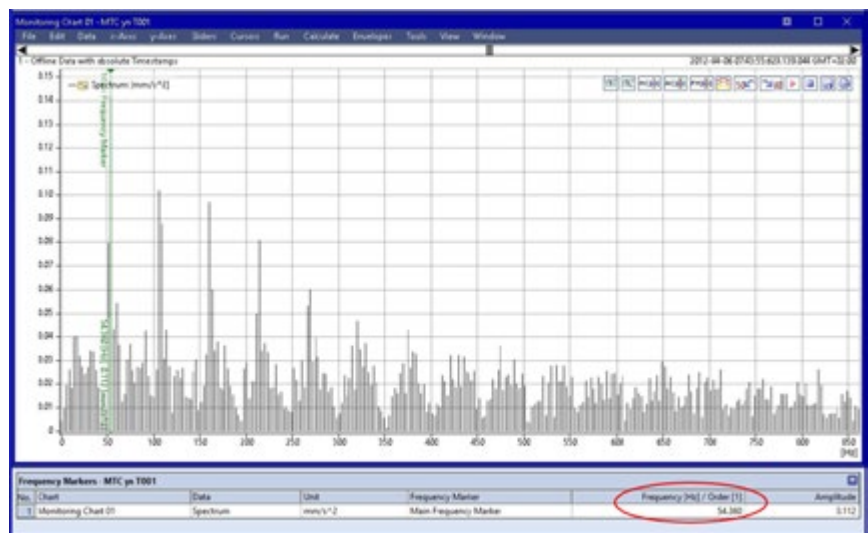
TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) poskytuje přístup k programování různých typů automatizačních zařízení na jednom místě. Díky flexibilitě lze rychleji pracovat se všemi zařízeními ve firmě a šetřit finance nákupem pouze jedné aplikace. Aplikace po instalaci nabízí všechny základní softwary pro práci s produkty od firmy Siemens v jednom rozhraní. Jedná se o STEP 7 (programovatelné automaty), WinCC (vizualizace HMI panelu), SINAMICS Startdrive, SIMOCODE ES a SIMOTION SCOUT TIA. Není tedy nutné instalovat každý zvlášť nebo spouštět více aplikací zároveň.

Podrobnější popis výše uvedených produktů je uveden v literatuře, totéž se týká i softwaru.[1]

### 3. Získání a vyhodnocení dat

Potřebná data byla získána v modelu dle obr. 2. Vyhodnocení proběhlo v prostředí CMS X-Tools. Na našem pracovišti bylo řešeno několik diagnostických úloh. Pro potřeby tohoto příspěvku je stručně popsáno určení závady na ložisku.

K rozboru byla zvolena metoda obálkové metody (ENVELOPE). Obálková analýza představuje metodu, která nejen indikuje porušení ložiska, ale ve spojení s FFT analýzou také určí, která část ložiska je poškozena [29]. Poruchy na ložiscích mohou být na vnějším kroužku, vnitřním kroužku, valivém elementu či kleci ložiska. Protože každá z těchto komponent má různou rychlost vzhledem k hřídeli, dají se určit frekvence, na kterých se projevují tyto poruchy [5]. V prostředí CMS X-Tools byl vytvořen analyzační model reprezentující metodu obálkové analýzy za využití knihoven funkcí. Výsledkem procesu obálkování signálu je převod harmonických násobků poruchových frekvencí na frekvenční složky viditelné v oblasti spektra. Poruchové frekvence valivých ložisek lze vypočítat ručně pomocí dostupných vzorců nebo použít existující kal-



Obr. 4 Výsledné spektrum pomocí metody obálkové analýzy s vyznačenou poruchovou frekvencí pro vnější kroužek ložiska

kulátory různých společností. Vibrační monitoring SIPLUS CMS nabízí na web serveru výpočet těchto frekvencí. V záložce *Bearing types* lze zadat typ použitého ložiska s jeho parametry a poté dopočítat hledané frekvence. V případě této úlohy byly doplněny otáčky a proběhl výpočet. Na výsledném spektru podle obr. 4 lze pozorovat opakující se špičkové hodnoty. Pomocí dostupných kurzorů v rozhraní analyzátoru bylo zjištěno, že první špičková hodnota spektra odpovídá frekvenci 54,36 Hz. Tato hodnota je velmi blízká vypočtené hodnotě 53,70 Hz, která ukazuje na poruchu vnějšího kroužku ložiska. Rozdíl přibližně 0,7 Hz je v tomto případě zanedbatelný, protože se může jednat pouze o chybu v rozlišení. Obecně v diagnóze vibrací není obvyklé dospět k naprosto přesným shodám, a proto je tento výsledek uspokojivý.

Dále lze ve spektru sledovat opakující vlastnost poruchové frekvence, kdy dochází k jejím harmonickému opakování i s jejími postranními pásmy. Harmonické násobky byly zobrazeny pomocí harmonického kurzoru, kde software nalezne i vyznačí první, druhou, třetí a čtvrtou harmonickou frekvenci signálu.

Následně po datové analýze byla provedena vizuální kontrola ložiska. Ložisko mělo skutečně na vnějším kroužku silnou prasklinu a při chodu bylo také slyšet hlasité praskání. Takové ložisko by bylo v průmyslu nutně okamžitě vyměnit, aby bylo zajištěno bezpečné a efektivní fungování stroje. [1], [3], [6]

#### 4. Aplikace teorie rizik v diagnostice

Za nový přístup v diagnostice strojních zařízení a jejich komponent lze považovat spojení diagnostických metod s teorií rizik [7].

V současné době je problematika rizik a jejich analýz vysoce aktuální a zasahuje téměř do všech aspektů průmyslové výroby, ať už se jedná o finanční analýzy nákladů a návratnosti výrobku, bezpečnost strojních zařízení, proces výroby produktu, životní cyklus výrobku apod.

Riziko může být obecně vyjádřeno jako pravděpodobnost vynásobená dopadem konkrétní události na podnik/zařízení/osobu. Lze ho také chápat jako součin několika dalších faktorů, které jsou stanoveny v souladu s kontextem konkrétní aplikace.

V rámci technické diagnostiky se nabízí několik přístupů, jak rizika řešit a aplikovat.

Konkrétním příkladem může být diagnostika valivých ložisek. Existuje několik metod, kterými lze odhalit závadu na ložisku. Každá z nich odhalí závadu v jiné fázi poškození ložiska. V první a druhé fázi poškození se, vzhledem k nízkým amplitudám a vysokým frekvencím, signál při vykreslení do frekvenčního spektra může jevit jako šum. Z pohledu rizik je klíčové včasné odhalení závady, tedy diagnostikovat ji co nejdříve. Pro odhalení poškození v první fázi je vhodné použití speciálních metod jako např. technologie SEE. Brzké odhalení závady s sebou nese výrazné ušetření nákladů a možnost naplánovat údržbu, tedy výměnu ložiska, ve vhodném termínu.

Na tomto základu lze demonstrovat, jak by se dala využít zmíněná rizika. Stanoveným cílem je co nejvčasnější odhalení závady na ložisku. Jednotlivé metody lze ohodnotit na základě kritérií, v tomto případě je hlavním kritériem ranost odhalení (odhalitelnost). Kromě často používané metody spektrální

analýzy FFT je pozitivně hodnocena technologie SEE, která dokáže poškození odhalit již v první etapě vývoje závady. Další je obálková metoda ENVELOP nebo například metoda špičkové energie SE a metoda vysokofrekvenční detekce HFD, které odhalí poškození v druhé etapě. Ve třetí etapě stačí i běžné akcelerometry a poškození už lze vidět v celkovém spektru. K odhalitelnosti lze přidat i další kritéria. Zde se může jednat například o dopad: čím dříve jsme schopni poruchu odhalit, tím menší má dopad na provoz, náklady nebo univerzálnost metody. Ohodnocení a rozdělení škály u těchto parametrů závisí na stanoveném cíli a je individuálně stanoveno hodnotitelem. Jednou z možností je řešení uvedené v tabulce 1. Analogicky byly vytvořeny tabulky pro náklady, dopad a univerzálnost, v tomto článku nejsou řešeny.

Tabulka 1

Odhalitelnost	
1	nejlepší odhalitelnost v průběhu první etapy
3	odhalitelnost v průběhu druhé etapy
6	odhalitelnost v průběhu třetí etapy
9	nejhorší odhalitelnost, hrozí porucha celého ložiska, a tím i stroje

Pro jednotlivé metody byla vytvořena výsledná tabulka, která obsahuje výpočet vhodnosti použití konkrétních metod s orientací na co nejrychlejší odhalení poruchy. Čím nižší výsledné číslo je, tím vhodnější je použití metody. Výběrem metody s nejnižším číslem se sníží riziko poruchy a vyřazení ložiska z provozu a taktéž se sníží náklady plynoucí z výpadku stroje při poruše. Díky kombinaci několika kritérií je možné nastavit různou váhu a při změně orientace (například na univerzálnost metody) lze přepočítat výslednou vhodnost. Výběr kritérií a nastavení jejich velikosti je individuální a subjektivní dle hodnotitele. V tabulce 2 je uveden příklad možné aplikace tohoto principu.

Problematika rizik je velice rozsáhlá a její implementace do technické diagnostiky by mohla přispět k zvýšení efektivity a snížení nákladů. Nicméně v současné době je teprve v začátcích a tento text si klade za cíl pootevřít pomyslné dveře a nastínit základní myšlenky. Pro vytvoření komplexnější metodiky je nezbytná spolupráce skupiny odborníků různého zaměření, aby se zabránilo subjektivizaci a profesní slepotě. Cílem tohoto článku je ukázat možná propojení teorie rizik a technické diagnostiky a nabídnout nový moderní pohled použitelný v technické praxi.

#### 5. Závěr

Předkládaný článek je příspěvkem k moderním přístupům v oblasti technické diagnostiky.

Je popsáno využití rozvíjejících se on-line systémů k posouzení stavu strojů a jejich komponent. Na našem pracovišti se klasickou off-line diagnostikou zabýváme již delší dobu a v poslední době k tomu přistupuje právě i on-line diagnostika s různým zaměřením. Vzhledem k nutnosti rozvíjet i oblast automatizace a informatiky využíváme moderní hardwarové a softwarové produkty v technické diagnostice, v článku na uvedeném příkladu je naznačena verifikace ve vibrodiagnostice.

Tabulka 2

Metoda	Popis	Odhaltitelnost	Dopad	Náklady/Údržba	Univerzálnost	Vhodnost	Komentář
ENVELOP	Umožňuje odhalení závady v druhé etapě poškození ložiska.	3	3	1	6	54	Velmi vhodná metoda k včasnému odhalení poškození ložiska. Použití je doporučeno.
SEE	Umožňuje odhalení závady v první etapě poškození ložiska.	1	1	1	6	6	Nejvhodnější metoda k posouzení stavu ložiska vzhledem k rychlosti odhalení a nákladům na údržbu. Použití je značně doporučeno.
Poslech	Umožňuje odhalení závady těsně před kritickým poškozením ložiska.	9	9	6	1	486	Nejméně vhodná metoda. Nedoporučuje se k prediktivní diagnostice.
SE	Umožňuje odhalení závady v druhé etapě poškození ložiska.	3	3	1	6	54	Velmi vhodná metoda k včasnému odhalení poškození ložiska. Použití je doporučeno.
FFT	Umožňuje odhalení závady v třetí etapě poškození ložiska.	6	6	3	1	108	Vhodná v současné době obecně využívaná metoda určená k včasnému odhalení poškození ložiska. Výhodou je možnost zjištění i druhu závady.

Dále je v článku naznačeno na konkrétním příkladu využití teorie rizik v diagnostice ložisek.

Ve světě lze zaznamenat u průmyslových firem různý přístup k řešení problémů v technické diagnostice. Na našem akademickém pracovišti podporujeme snahy, které směřují v technické praxi k reálným výsledkům a jsou obecně použitelné k rozvoji závěrů diagnostických metod, následně údržby, zvýšení spolehlivosti a kvality, a tím i posílení konkurenceschopnosti firem.

#### Literatura

- [1] MAREK, Vojtěch. *Analýza vibrací pomocí moderních on-line systémů*. Brno, 2023. Dostupné také z <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149560>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Miloš Hammer.
- [2] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika*. Ostrava: VŠB-univerzita, 2004. 178 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [3] Anon., 2022. *Monitoring of Machine Vibration Variables with a SIPLUS CMS1200 Condition Monitoring System* [online]. [cit. 2022-12-11]. Červen 2022. B.m.: Siemens AG. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/>

[109480750/monitoring-of-machine-vibration-variables-with-a-siplus-cms1200-sm-1281-condition-monitoring-system?dti=0&lc=en-CZ](https://www.siemens.com/press/en/2023/02/01/condition-monitoring-system-with-a-siplus-cms1200-sm-1281-condition-monitoring-system?dti=0&lc=en-CZ).

- [4] Anon., 2020. *TIA Portal Modules for Automation System SIMATIC S7-1200 from Version V14 SP1* [online]. [cit. 2023-02-01]. 2020. B.m.: Siemens. Dostupné z: <https://www.automation.siemens.com/sce-static/learning-training-documents/tia-portal/learn-training-textbook-s7-1200-en.pdf>.
- [5] TOMEH, Elias, 2015. *Technická diagnostika: vibrační diagnostika stroju a zařízení*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 9788074941740.
- [6] Anon., 2023. *Blocks for activating the SINAMICS with SIMATIC S7-1200/1500 in the TIA Portal* [online]. [cit. 2023-04-07]. Březen 2023. B.m.: Siemens. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109475044/sinamics-communication-blocks-drive-lib-for-reading-and-writing-drive-data-within-tia-portal-context?dti=0&lc=en-TH>.
- [7] TICHÝ, M. *Ovládání rizika: analýza a management*. Praha: C.H. Beck, 2006. 396 s. ISBN 80-7179-415-5.

Článek prošel recenzním řízením.



# Analýza vzorů částečných výbojů různých izolovaných vodičů

## *Analysis of partial discharge patterns of various insulated conductors*

ONDŘEJ KABOT, JAN FULNEČEK, STANISLAV MIŠÁK, LUKÁŠ PROKOP

VSB-TUO, CEET, CENTRUM ENET

17. LISTOPADU 15, OSTRAVA, ČESKÁ REPUBLIKA

ONDREJ.KABOT@VSB.CZ, JAN.FULNECEK@VSB.CZ, STANISLAV.MISAK@VSB.CZ, LUKAS.PROKOP@VSB.CZ

### Abstrakt

Izolované závěsné vodiče představují alternativu k zesíleným hliníkovým vodičům. Některé distribuční společnosti mají snahu nahradit některé ALFe vodiče ve své nadzemní distribuční síti závěsnými izolovanými vodiči. Aby byla distribuční síť co nejspolehlivější, budou nadzemní vedení vybavena on-line detektorem poruch izolace. Problematická detekce poruch izolace je jednou z největších nevýhod závěsných izolovaných vodičů vysokého napětí, a to z důvodu velmi nízkého poruchového proudu. Při tomto typu poruch se však obvykle projevuje aktivita částečných výbojů. Na základě těchto poznatků byl ve VŠB-TUO navržen on-line monitor částečných výbojů pro detekci izolačních poruch na nadzemních vedeních středního napětí. Předkládaný článek popisuje testování různých izolovaných vodičů z hlediska aktivity částečných výbojů při poruchách s vysokou impedancí.

### I. Úvod

Nadzemní vedení vysokého napětí (VN) je obvykle vybaveno běžnými vodiči ALFe bez vnější izolace. V zalesněné oblasti dochází na elektrických vedeních často k zemním a mezifázovým poruchům kvůli okolní vegetaci [1]. K odstranění této příčiny poruch lze vodiče ALFe nahradit izolovanými vodiči (CC).



Obr. 1 HIF v reálném prostředí

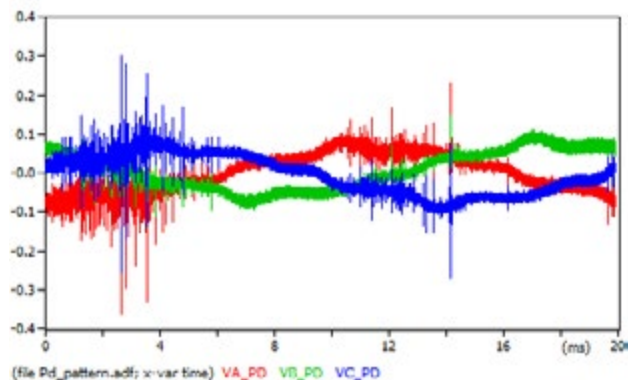


Obr. 2 Poškozený izolační systém CC v důsledku činnosti PD

CC se skládá z hliníkového jádra, které je pokryto tenkou vrstvou izolačního materiálu XLPE. Největší nevýhoda CC spočívá v problematické detekci vysoko impedančních poruch izolace (HIF) [2]. Pokud zůstane strom nebo větev v přímém kontaktu s CC, mohou se uvnitř izolace XLPE objevit částečné výboje (PD) (příklad této situace zachycuje obr. 1). Proud, způsobený činností částečných výbojů, je velmi malý a nelze jej detekovat standardními reléovými ochranami [3]. Tyto výboje způsobují pomalou degradaci CC, která vyústí v poruchu izolace (obr. 2).

### II. Nejnovější poznatky

V současné době se na evropském trhu vyskytuje několik zařízení, která jsou schopna detekovat HIF. Jejich citlivost je



Obr. 3 Příklad vzoru PD získaného v třífázovém systému

však nízká kvůli nízkému proudu při typickém HIF. Například Schneider Viligohm [4] je schopen detekovat HIF s impedancí 1 M $\Omega$  nebo nižší. Počáteční impedance HIF se však pohybuje v rozmezí G $\Omega$ . Při impedanci 1 M $\Omega$  nebo nižší je již izolace CC poškozena a téměř propálena. Společnost ELEXEIM vyrábí ochranné relé NOJA 769, které je rovněž schopno detekovat HIF [5]. Jeho nejnižší detekovatelný poruchový proud je však 200 mA, což je hodnota odpovídající již silně poškozenému izolačnímu systému CC. Nízká citlivost je hlavním důvodem, proč žádné z těchto ochranných relé není schopno detekovat HIF v jeho počáteční fázi, kdy rychlé odstranění HIF zabrání vážnému poškození izolačního systému CC.

Na VŠB-TUO probíhá výzkum v oblasti on-line detektorů HIF [6]. Tyto detektory nezjišťují hodnotu poruchového proudu, ale analyzují získaný napěťový signál z chráněného nadzemního vedení na přítomnost aktivity PD. Aktivita PD vytváří typický vzor v časové oblasti napěťových signálů (viz příklad na obr. 3). Tento vzor je v signálu přítomen po celou dobu trvání HIF, včetně jeho iniciační fáze. Pro aktivitu PD uvnitř izolačního systému CC se typický vzor generovaný HIF skládá z vrcholů umístěných na vzestupném a sestupném sklonu sinusovky 50 Hz [7].

Včasná detekce aktivity PD může zabránit škodám způsobeným výpadkem CC a nadzemního vedení. Vzhledem k vysoké citlivosti byl tento detektor zvolen jako nejvhodnější zařízení pro online diagnostiku izolace CC, plánovanou v distribuční síti. Abychom se ujistili, že detektor bude schopen správně pracovat s různými typy CC od různých výrobců, provedli jsme řadu experimentů. Cílem těchto experimentů bylo prozkoumat vliv vlastností zakrytého vodiče na získané vzorky PD.

### III. Popis experimentu a získávání dat

#### A. Testované zařízení

Bylo testováno pět vzorků CC (obr. 4). Zaměřili jsme se výhradně na analýzu vzorce PD, který byl generován vzorkem CC během HIF. Vzorky se od sebe lišily průřezem, tloušťkou izolace a tvarem hliníkového jádra CC (viz tab. I). Všechny vzorky měly stejnou délku 5 m.

Tabulka I. Fyzikální rozměry testovaných vzorků

Vzorek CC	Typ	Průměr jádra (mm)	Vnější průměr (mm)
1	SAX 25ADX-K	13,2	17,8
2	SAX W70	9,9	14,3
3	SAX BSZV	13,4	18,4
4	Neznámý	7,8	12,6
5	SAX SCE	10,9	15,8

#### B. Získávání experimentálních dat

V experimentu jsme použili stejnou měřicí metodu a uspořádání, jaké je použito v dříve popsaném detektoru [6], viz schéma zapojení na obr. 5.

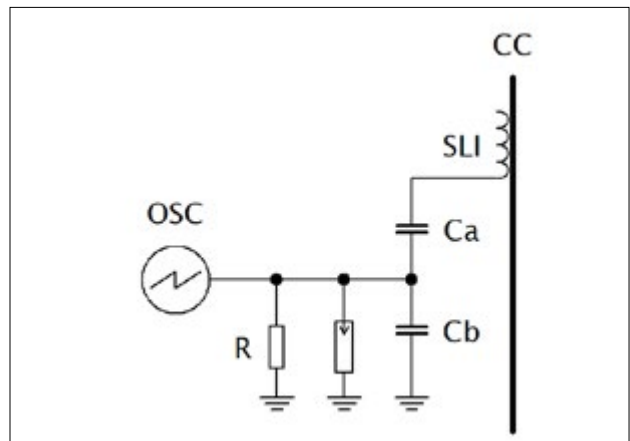
Jako snímač napětí se používá jednovrstvá cívka (SLI). Je navinuta přímo na povrchu CC a skládá se z 85 závitů izolovaného měděného drátu. Cívka je připojena ke kapacitnímu děliči CD (který se skládá z kapacit  $C_a$  a  $C_b$ ). Výstup kapacit-



Obr. 4. Zkoumané vzorky CC

ního děliče je připojen přes svodič přepětí k osciloskopu. Celé uspořádání ilustruje obr. 6.

V laboratorních podmínkách se měření PD obvykle provádí pomocí úzkopásmových detekčních přístrojů. V našem experimentu byla použita širokopásmová detekce. Širokopásmová detekce poskytuje lepší rozlišení impulsu. Při vzorkovací frekvenci 40 MS/s se zkoumá frekvenční pásmo až do 20 MHz. Nastavení měření pro každý testovaný vzorek CC bylo ověřeno kalibrací. Amplituda kalibračního impulsu byla 5 nC.

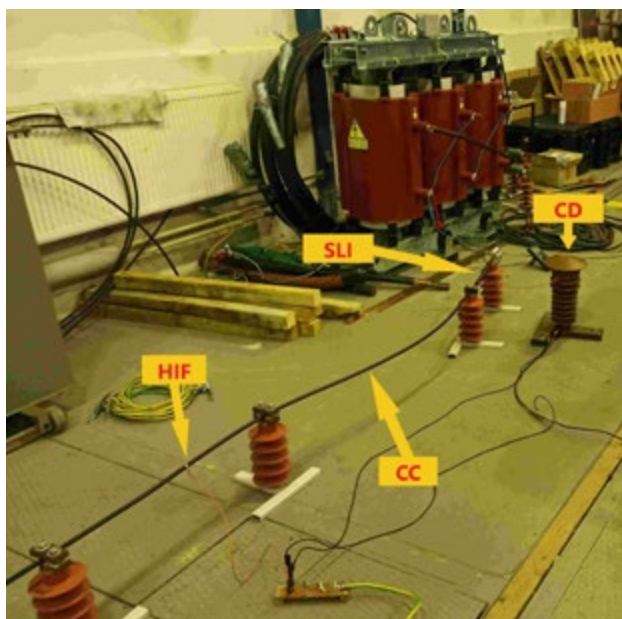


Obr. 5. Schéma zapojení senzoru SLI

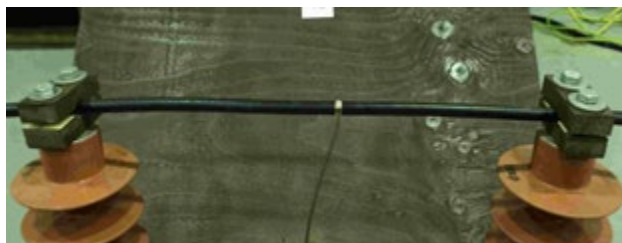
#### C. Simulace HIF

Pro simulaci HIF byl každý vzorek vybaven měděnou páskou. Páska byla vytvarována do tvaru kroužku a přilepena k povrchu CC vodivým lepidlem. Tato měděná páska byla připojena k zemnímu potenciálu. Přítomnost zemního potenciálu na povrchu CC vytváří poruchy v elektrickém poli CC, což je příčinou přítomnosti PD. Detail měděné pásky zachycuje obr. 7.

Pro získání statisticky průkazných výsledků bylo na každém vzorku simulováno několik HIF. Během všech testů byly oba konce CC opatřeny korónovými štíty, aby se snížil náhodný



Obr. 6 Laboratorní měřicí zařízení



Obr. 7 Simulace poruchy HIF

šum na pozadí pulzů. Rovněž byla použita korónová kamera, aby se potvrdilo, že kromě simulovaných HIF neexistují žádné další zdroje jakýchkoli výbojových aktivit, viz obr. 8.

#### IV. Analýza získaných dat

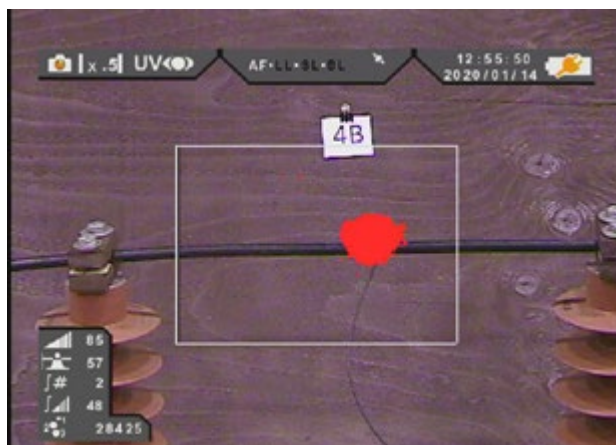
Data získaná osciloskopem byla analyzována pomocí softwaru Matlab. Signál obsahoval diskrétní spektrální interference pozadí (obr. 9).

Prahová hodnota pro extrakci pulzů byla stanovena na základě zkoumání částí signálu, kde nejsou přítomny dílčí výboje. Přestože při tomto postupu mohly být některé částečné výboje odfiltrovány, bylo nutné získat co nejspolehlivější údaje.

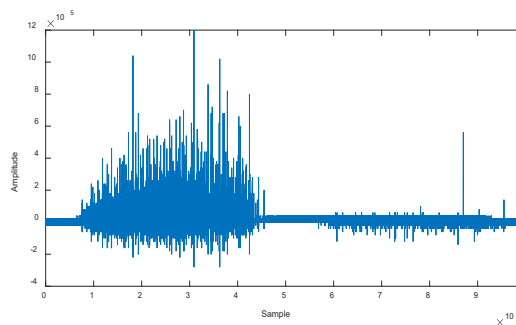
Po odstranění šumu ze signálu (obr. 10) byla použita funkce Matlabu „*findpeaks*“ k určení počtu zbývajících pulzů v souboru dat pro každé z 10 měření. Průměr těchto počtů byl stanoven jako výsledná hodnota pro každý typ kabelu.

#### V. Výsledky experimentu

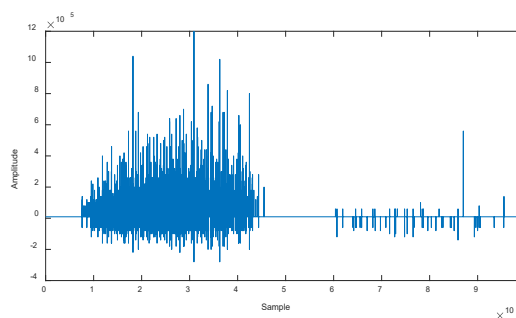
Počet impulzů PD pro každý vzorek se liší. Průměrný počet je uveden v následující tabulce. Každá hodnota je průměrem deseti měření s různým umístěním HIF. Pro kontrolu správnosti



Obr. 8 Pozorování HIF prostřednictvím korónové kamery



Obr. 9 Získaný nezpracovaný signál



Obr. 10 Signál po odstranění šumu

získaných signálů byla pro všechna měření každého jednotlivého vzorku CC vypočtena směrodatná odchylka  $s$  [8] podle (1),

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

kde  $x_i$  je počet PD ve zkoumaném signálu,  $\bar{x}$  je střední hodnota všech vzorků a  $N$  je počet vzorků. Výsledky průměrných počtů shrnuje tab. II.



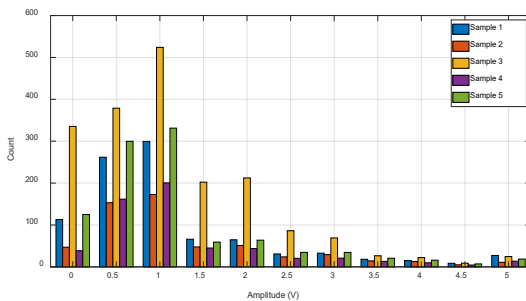
Jak je patrné z tabulky, průměrný počet pulzů PD se u jednotlivých vzorků liší. Pro každé měření byl vytvořen histogram pomocí funkce „hist“ s pevným parametrem binů pro lepší srovnatelnost (viz histogram na obr. 11). Průměrný výsledek byl určen jako definující pro každý vzorek jak pro počet pulzů, tak pro jejich amplitudy. Impulzy na klesající hraně 50 Hz nosné vlny byly zanedbány, protože amplituda a počet vrcholů v této části PD vzorku jsou nevýznamné. Proto byla analyzována pouze náběžná hrana.

Pro podrobnější zkoumání těchto výsledků byla provedena simulace elektrického pole uvnitř izolace CC během simulovaného HIF (obr. 12 a obr. 13). Bohužel se nám nepodařilo vytvořit model vzorku CC č. 5, protože obsahuje polovodivou vrstvu neznámých vlastností.

Tabulka II. Výsledky analýzy PD

Ukázka	Průměrný počet PD	Směrodatná odchylka s
1	937	76
2	568	49
3	1890	40
4	571	61
5	1009	40

Maximální hodnota intenzity elektrického pole pro každý vzorek CC je uvedena v tab. III.

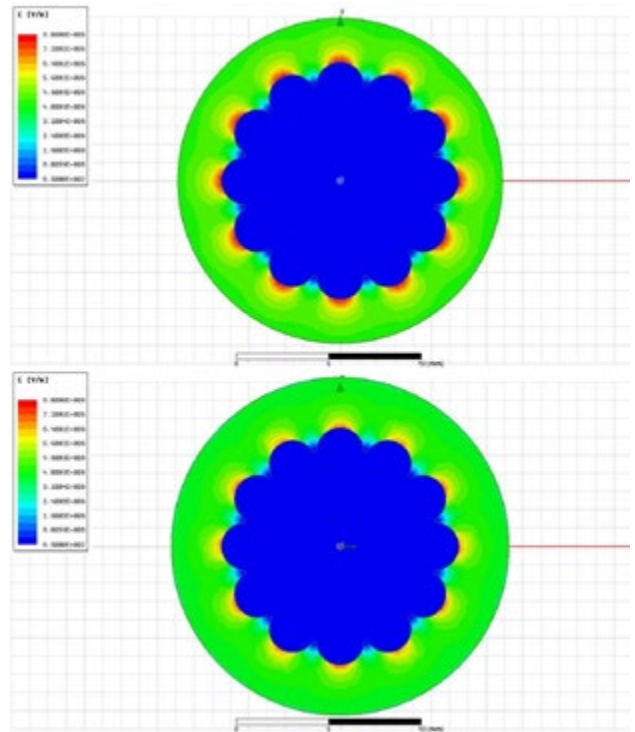


Obr. 11 Histogram detekovaných pulzů

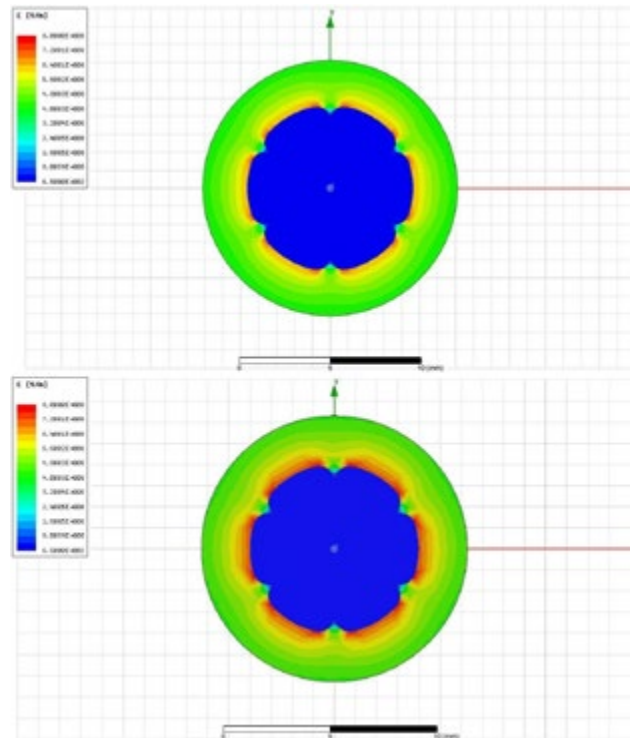
Tabulka III. Maximální intenzita elektrického pole uvnitř vzorků CC

Ukázka	Maximální intenzita elektrického pole (MV/m)
1	7,9
2	7,2
3	7,1
4	7,8

Původně se předpokládalo, že s rostoucí maximální intenzitou elektrického pole se bude zvyšovat i počet vrcholů PD. Jak vyplývá z výsledků, počet vrcholů PD v tab. II neodpovídá maximální hodnotě intenzity elektrického pole v tab. III.



Obr. 12 Elektrostatické pole uvnitř vzorků 1 (nahore) a 3 (dole)



Obr. 13 Elektrostatické pole uvnitř vzorků 2 (nahore) a 4 (dole)

Z výsledků simulace vyplývá, že počet vrcholů PD závisí především na tvaru průřezu jádra. Tento tvar určuje počet zdrojů maximálního toku elektrického pole v jádře CC.

Například vzorky číslo 2 a 4 měly shodný tvar jádra. Během experimentu tyto vzorky generovaly téměř identickou aktivitu PD. Jejich maximální amplitudy intenzity elektrického pole se však lišily, viz tab. II. Podobná situace nastane při porovnání vzorků 2 a 3. Měly téměř identickou hodnotu maximální intenzity elektrického pole, ale byl zde velký rozdíl v počtu pulzů generovaných PD aktivitou. Je zřejmé, že náš původní předpoklad byl chybný.

## VI. Závěr a budoucí cíle

Detekce HIF založená na rozpoznávání vzorů PD poskytuje lepší citlivost než jiné metody, protože nezávisí na hodnotě poruchového proudu. Obecný tvar vzoru se zdá být stejný pro všechny testované vzorky CC, ale v počtu vrcholů v získaných vzorcích existují drobné rozdíly. Počet pulzů zřejmě závisí na přesném tvaru hliníkového jádra. Čím více se tvar jádra liší od dokonalého kruhu, tím vyšší je intenzita aktivity PD. Vyšší počet pulzů PD znamená rychlejší degradaci izolačního systému, ale také zvyšuje pravděpodobnost detekce HIF. V reálném prostředí bude počet pulzů záviset také na kontaktní ploše HIF. Pro správnou detekci HIF na základě přítomnosti obrazce PD je nutné důkladné prozkoumání konkrétního CC. Je to proto, že vyhodnocovací algoritmus dříve popsaného detektoru používá jako hlavní vstupní parametry počet detekovaných PD pulzů. Na základě předběžné analýzy vzorků CC lze stanovit prahové hodnoty pro konkrétní vedení.

Naše budoucí práce se zaměří na pokročilou kvantifikaci a klasifikaci různých vzorů PD získaných z různých CC za různých podmínek.

## VII. Odkazy

- [1] M. Lehtonen, „Fault rates of different types of medium voltage power lines in different environments,“ in *Proceedings of the 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference*, Kuressaare, 2010, s. 197–202.
- [2] V. Veerasamy, N. I. Abdul Wahab a R. Ramachandran, „High-impedance fault detection in medium-voltage distribution network using computational intelligence-based classifiers,“ *Neural Comput & Applic*, č. 31, 2019, s. 9127–9143.
- [3] P. Pakonnen, „Detection of incipient tree faults on High Voltage Covered Conductor Lines,“ doktorská disertační práce, Tampere University of Technology, Tampere, Finsko, 2007.
- [4] „Insulation monitoring for ungrounded networks“, Schneider Electric, dostupné online: <https://download.schneider-electric.com/>.
- [5] „OSM automatic recloser“, ELEXIM - Noja Power, dostupné online: <https://www.elexim.net/nojapower/>.
- [6] S. Mišák a V. Pokorný, „Testing of a Covered Conductor's Fault Detectors,“ in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, s. 1096–1103, červen 2015.
- [7] H. Illias, G. Chen a P. L. Lewin, „Partial discharge behavior within a spherical cavity in a solid dielectric material as a function of frequency and amplitude of the applied voltage,“ in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 2, pp. 432–443, April 2011.
- [8] X. Han, N. A. Heckert, J. J. Filliben a Y. Wang, „Statistical analysis of partial discharge phenomena. Time of occurrence distributions,“ 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Atlanta, GA, USA, 1998, s. 407–411, svazek 2.

Článek prošel recenzním řízením.

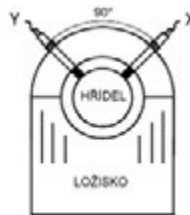
# Proč kontrolovat runout hřídele a jeho vliv na měření vibrací hřídele

## Why check shaft runout and its effect on shaft vibration measurement

ING. LUKÁŠ HRAZDÍRA

Monitorování vibrací strojních zařízení se v posledních desetiletích stalo moderním postupem monitorování jejich technického stavu a spolehlivosti. Kromě měření vibrací ložiskového domku je obecně uznávanou metodou pro posouzení skutečného stavu stroje měření vibrací hřídele (zjednodušeně řečeno: měření posunu hřídele). Monitorování vyžaduje zákazník nebo technická norma. Ovládání stroje je často nastaveno tak, že pokud vibrace stroje překročí předem stanovenou hodnotu, stroj se přepne do stavu alarmu, nebo se rovnou vypne. Monitorování změny polohy je velice přesné a využívá bezkontaktních sond na principu vířivých proudů.

Jednoduše lze funkci sondy popsat takto. Sondy mají na svém hrotu cívkou. Touto cívkou prochází proud, který vytváří magnetické pole. Jakmile se sonda přiblíží k vodivému povrchu, indikují se u povrchu kovu vířivé proudy. Vznik těchto



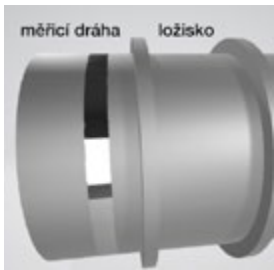
Obr. 1 Pozice sond

vířivých proudů snižuje intenzitu magnetického pole a je detekován cívkou sondy jako pokles napětí. V určitém rozsahu je úbytek napětí lineárně úměrný změně vzdálenosti sondy od kovového povrchu. Potom v našem případě měření rotující hřídele se s jejími vibracemi mění její vzdálenost (nebo mezera) od bezkontaktní sondy. Změna mezery při otáčení hřídele vyvolává odpovídající změnu napětí, která je úměrná vibracím. Úbytek napětí je poté zpracován v programu a převeden do uživatelsky vhodného zobrazení.

Sondy bývají umístěny v blízkosti každého kluzného ložiska v páru X a Y, které mezi sebou svírají úhel 90°, jak je

uvedeno na obrázku 1. Sondy X a Y určují okamžitý pohyb a průměrnou polohu osy hřídele při jeho otáčení. Kromě uvedeného příkladu sledování pohybu v radiálním směru se sondy používají i pro sledování pohybu v axiálním směru. V některých případech snímají kombinaci, tedy změnu vzdálenosti šikmé plochy na hřídeli.

Bohužel stejně jako u většiny metod i tato metoda měření vibrací má své limity a rizika, která nejsou zanedbatelná. V tomto případě se jedná o kvalitu oblasti hřídele, které se říká měřicí dráha. Je to přibližně 35 mm široký proužek po obvodu hřídele, nad kterým jsou umístěny měřicí sondy.



Obr. 2 Měřicí dráha

Sondy jsou tak citlivé, že tolerují jen minimální mechanické nedokonalosti a materiálové (elektrické) nedokonalosti měřicí dráhy. Měřením a opravami runoutu hřídelí se zabýváme řadu let a musím říct, že tyto nedokonalosti se vyskytují vždy. Nedokonalosti hřídele se nazývají runout hřídele a jedná se v podstatě o hodnotu chyby měření vibrací.

Většina technických norem s tímto faktorem počítá a aby se minimalizovala možnost rušivého ovlivnění následného měření vibrací, stanovuje maximální přípustnou hodnotu této chyby. Limit runoutu je stanoven na 25 % limitu vibrací stroje. Jinými slovy, čtvrtina limitu vibrací je uvolněna pro chybu (nedokonalost) měřicí dráhy na hřídeli. Příklad požadavků uvádím v tabulce.

Norma	Vibrace hřídele $\mu\text{m}_{p-p}$	Celkový runout $\mu\text{m}_{p-p}$
IEC 60034-14 (B) 3000ot/min	50	12,5
API 541	38,1	9,5
API 546 <3600ot/min	50	12,5
Shell, BP	50	12,5

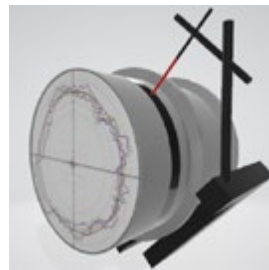
Pokud by byla hodnota runoutu vysoká, může dojít k těmto dvěma extrémním situacím v závislosti na fázovém úhlu runoutu a vibrací. Pokud budou mít stejný směr, tak se budou hodnoty sčítat a budou měřeny větší vibrace než skutečné. Může docházet k bezdůvodnému spouštění alarmu. Pokud budou mít opačný směr, hodnoty se budou odčítat a budou měřeny menší vibrace než skutečné. Může dojít k tomu, že nebudou detekovány vysoké vibrace a nespustí se alarm.

Ve srovnání s jinými měřeními je tato chyba měření poměrně vysoká, pokud jde o její procentuální vyjádření. Na druhou stranu absolutní hodnota  $9,5\mu\text{m}_{p-p}$  je ve srovnání s rozměry hřídele poměrně nízká. Ve skutečnosti je velmi náročné vyrobít povrch hřídele, který splňuje požadavky na runout. Měření runoutu na rotorech se tím stává jedním z klíčových a kritických bodů výroby rotoru. Dalším nepříznivým faktorem je to, že hodnota se měří na kompletním rotoru (turbíny, generátoru atd.) před montáží. V této fázi se jedná o velice drahou komponentu před finální montáží.

Výrobci se proto snaží zavádět velké množství preventivních opatření a měřicím plochám se věnuje zvláštní péče během celé výroby až po montáž celého stroje.

Celkový runout lze rozdělit na dvě hlavní složky:

- Mechanický runout popisuje geometrickou odchylku hřídele od ideální kružnice a lze ji ovlivnit vhodnou technologií obrábění.
- Elektrický runout definuje materiál hřídele v blízkosti snímače. Vlastnosti materiálu, které nepříznivě ovlivňují vznik vířivých proudů (viz popis principu funkce sond vířivých proudů).



Obr. 3 Schéma měření ve V-Blocích

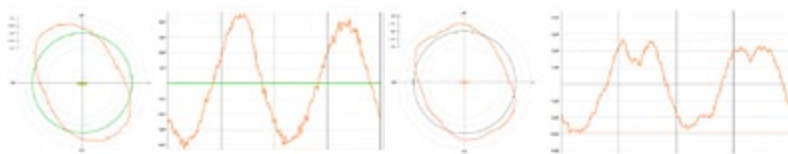
Měření runoutu není jednoduchá disciplína a podrobnější popis by se do tohoto článku nevešel. Pokusím se problematiku stručně popsat. Je nutné si uvědomit, že se bavíme o měření v rámci desetin mikrometru dílců vážících desítky tun. Měření se provádí za nízkých otáček hřídele. Rotor je umístěn ve V-Blocích, nebo na přesném soustruhu. Celkový runout se měří pomocí již dříve popsaných sond polohy na bázi

vířivých proudů. Mechanický runout se měří velice přesnými indukčními sondami. Oboje sondy existují ve více variantách. Pro vyhodnocení používám unikátní měřicí systém, který zpracovává data z více měření těchto sond. Dokáže vypočítat elektrický runout, který je v reálných podmínkách neměřitelný. Používá i kompenzace vlivu geometrie ložiskového sedla na měření. Výsledný runout je číselná hodnota v  $\mu\text{m}$ , která definuje rozdíl mezi největší a nejmenší vzdáleností povrchu hřídele od sondy v průběhu jedné otáčky hřídele.

Příčin velké hodnoty mechanického runoutu může být několik. Mezi nejčastější patří chyby při obrábění měřicí dráhy a ložiskového sedla. Například nedodržení parametrů obrábění, nevhodný nástroj, nedodržení kruhovitosti, vibrace hřídele během obrábění, nečistota ve středícím dílku, nepřesnost soustruhu, nesouosost obou ploch atd. Další příčinou vysoké hodnoty mechanického runoutu může být poškození měřicí plochy (otlaky, škrábance), drsnost povrchu a v extrémních případech prohnutí hřídele. Na minimalizaci rizika jsou u výrobce zaváděny preventivní opatření. Často je možné dle výsledků z měřicího systému určit příčinu problému.

U elektrického runoutu je situace odlišná. Zde bývají hlavní příčinou faktory, které narušují rovnoměrný vznik vířivých proudů v materiálu hřídele. Může se jednat o změnu permeability v důsledku nehomogenity materiálu, zbytkový magnetismus v materiálu hřídele, změny elektrické vodivosti, koncentrace napětí na hranicích zrn a také dutiny, vměstky či trhliny pod povrchem nebo v neposlední řadě nevhodně zvolený materiál. Na minimalizaci rizika opět existuje několik opatření, které musí zavést více článků ve výrobním řetězci, protože příčiny mohou vzniknout již v hutích, během tváření, tepelného zpracování, manipulace nebo opracováváním u výrobce.





Obr. 4 Mechanický runout před opravou 8,7 µm<sub>p-p</sub> a po opravě 5,4 µm<sub>p-p</sub>

Pokud máme naměřenou vysokou hodnotu runoutu, tak máme k dispozici několik možností řešení. K opravě mechanického runoutu lze použít několik metod v závislosti na příčině. Způsob opravy závisí také na strojním vybavení, které je k dispozici. Pokud je to možné, nejvhodnější opravou je srovnání pomocí strojního obrábění a broušení. Pokud to možné není, existují účinné metody ručního zapravení povrchu. Jedná se o přesnou ruční práci, kterou je možné snížit mechanický runout až o 15 µm<sub>p-p</sub>.

Pro snížení hodnoty elektrického runoutu existuje také několik metod. Mezi neúčinnější patří přebroušení, leštění diamantem, lokální leštění a broušení pomocí brusných nástrojů, škrábání, tepání a v neposlední řadě odmagnetování a řízená magnetizace. Používání těchto metod vyžaduje precizní práci, zkušenosti a vhodný měřicí systém pro měření runoutu. Používáním těchto metod je možné celkový runout velice efektivně snížit například až z 90 µm<sub>p-p</sub>. Na obrázku 6 je zachycen příklad úpravy celkového runoutu špičku po špičce z počátečních 16,3 µm<sub>p-p</sub> na konečných 7,6 µm<sub>p-p</sub>. Krok po kroku se takto upravuje (ladí) celkový runout.

Poslední možností úpravy jsou metody, které jsou postaveny na výrobě nové měřicí dráhy pomocí alternativního homogenního materiálu. Jedná se o měřicí kroužek, galvaniza-



Obr. 5 Lokální úprava runoutu

ci, cold spray a navarování. Tyto metody jsou ale často v rozporu s požadavky technických norem,

kteří zakazují aplikaci cizího materiálu v oblasti měřicí dráhy.

Pokud tedy máme věřit měřeným hodnotám vibracím hřídele, musíme mít pod kontrolou runout hřídele v oblasti měřicích drah. Pro výrobce strojních zařízení se jedná o kritickou část výroby, protože pro některé normy jsou požadavky velice striktní a netolerují žádné výraznější odchylky. Stálost provedených úprav jsem měl ojediněle možnost ověřit po měsíci a odchylky byly minimální. Jednoduše to není možné, protože kontrola runoutu patří mezi poslední operace před finální montáží stroje. Z odborných publikací a zkušeností mám potvrzeno, že runout se může časem měnit a jde o velice citlivý parametr hřídele. Při údržbě a případném vyjmutí rotoru ze stroje musí být brán velký důraz na ochranu těchto ploch před mechanickým poškozením, ovlivněním magnetem a podobně. Jakékoliv poškození těchto ploch znamená automaticky ztrátu možnosti monitorování vibrací hřídele. Jedinou možností potom zbývá opětovné naladění plochy pro správnou funkci senzorů vibrací hřídele.

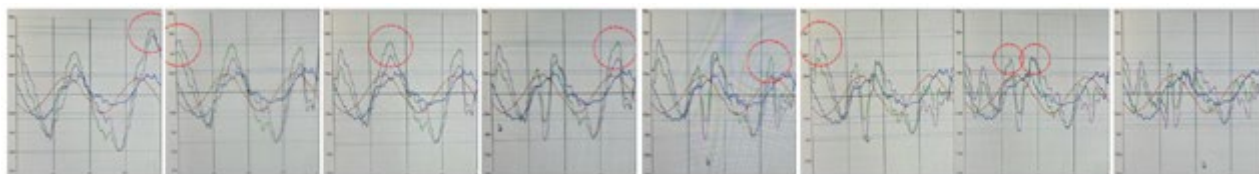
**Ing. Lukáš Hrazdára**

Mobile: +420 737 450 658

Email: lukas.kasa@post.cz

Podlesí 1933/10, Blansko 678 01, Czech Republic

IČ/ID: 19334401, DIČ/TaxID: CZ8007263803



Obrázek 6 Příklad úpravy celkového runoutu, červeně označeny místa úpravy

## Diagnostika transformátorových průchodek pomocí napětí o snížené frekvenci

### Diagnosics of transformer bushings using reduced frequency voltage

VÁCLAV STRAKA, TMV SS, VACLAV.STRAKA@TMVSS.CZ

PAVEL ZÍTEK, TMV SS, PAVEL.ZITEK@TMVSS.CZ

ANTONÍN KRŇOUL, TMV SS, ANTONIN.KRNOUL@TMVSS.CZ

#### Anotace CZ

Transformátorové průchočky bývají považovány za jedno z kritických součástí výkonových transformátorů. Pravidelnou diagnostikou je možno detekovat defekty a tím i včas přijmout

vhodná nápravná opatření. Jednou ze standardně používaných metod je měření kapacity a ztrátového činitele  $\tan \delta$  (respektive jejich výpočet). Tyto metody jsou uvedeny jak ve standardech, tak referenční hodnoty jsou uváděny přímo výrobcí, včetně

hodnot limitních. V poslední době je však možno tyto testy provádět i napětím o snížené frekvenci, což přináší nejen vyšší citlivost při detekci rozvíjejících se poruch tak do budoucna i snížené nároky na výkon testovacích přístrojů.

**Annotation ENG:**

*Transformer bushings are considered one of the critical components of power transformers. With regular diagnostics, it is possible to detect defects and thus take appropriate corrective measures in time. One of the standard methods used is the measurement of the capacity and the dissipation factor  $\tan \delta$  (respectively their calculation). These methods are listed in the standards, and the reference values are given directly by the manufacturer, including limit values. Recently, however, it is possible to perform these tests with a voltage with reduced frequency, which brings not only higher sensitivity in the detection of developing faults, but also reduced demands on the performance of testing devices in the future.*

**1. Úvod**

Jedním z nejdůležitějších prvků nadřazené elektrizační soustavy a rozvodných elektrických sítí je výkonový transformátor. Jeho funkcí je transformovat napětí na požadovanou hodnotu potřebnou k přenosu elektrického výkonu. Je tedy důležitým článkem spojení mezi výrobou a spotřebou elektrické energie.

Poruchou transformátoru může dojít k výpadku elektrické energie určité oblasti zahrnující osídlené aglomerace a průmyslové zóny. Přerušení dodávky elektrické energie způsobuje nemalé finanční ztráty nejen distribučním společenstvem, ale také velkoodběratelům zastavením výrobního procesu. Proto je nutné předcházet takovýmto situacím pravidelnou kontrolou a údržbou transformátoru.

Frekvenční diagnostika transformátoru se jeví být vhodným prostředkem pro detekci různých vlivů a jevů v transformátoru.

Nízkofrekvenční diagnostika (dielektrická spektroskopie ve frekvenční doméně) je metoda určená primárně pro detekci a měření vlhkosti přímo v papírové izolaci a papírových bariérách výkonových transformátorů bez ohledu na teplotu stroje či okolí.

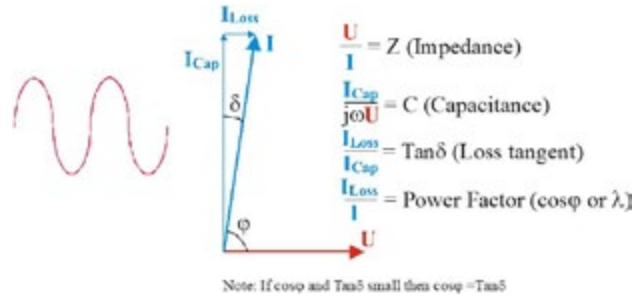
Vysokofrekvenční diagnostika je určena na detekci mechanických změn v uspořádání transformátoru. Tato metoda je schopna postihnout změny jak v oblasti vinutí, tak i magnetického obvodu a připojení na přepínač odboček.

Tento materiál bude primárně diagnostice transformátorových průchodek napětím o snížené frekvenci a součástí budou též aplikační příklady.

**2. Kapacita a ztrátový činitel  $\tan \delta$**

Kapacita a ztrátový činitel  $\tan \delta$  jsou často používanými parametry užívanými pro hodnocení stavu izolačních systémů, nejen prvků výkonových transformátorů. Ačkoliv se často zmiňuje „měření“ těchto parametrů, jedná se o parametry vypočítané z komplexních hodnot napětí a proudu. Grafické zobrazení na obrázku 1.

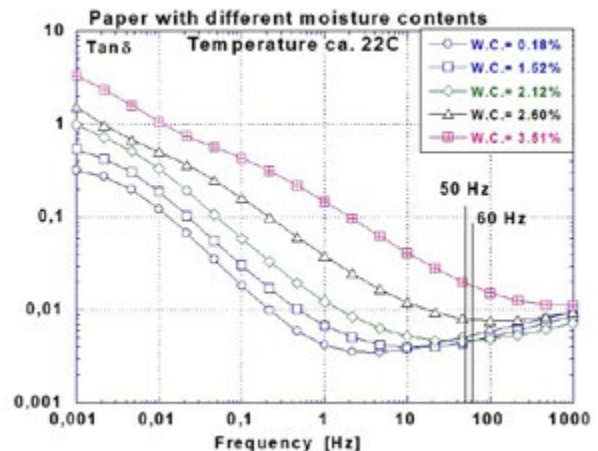
Je též zobrazen způsob výpočtu tzv „power factor“. Jedná se o způsob výpočtu používaný hlavně na amerických kontinentech, nejedná se o jinou terminologii pro identický parametr, i když vypovídající hodnota je obdobná.



Obr. 1 Výpočet kapacity a  $\tan \delta$

Při terénních měřeních se obvykle využívá měření při frekvenci blízké hodnotě síťové frekvenci, tedy 50 nebo 60 Hz. Je nutno říci, že limitní hodnoty jsou definovány při vztažené teplotě. Důvodem je teplotní závislost  $\tan \delta$ . Problematice teplotní závislosti a jejího využití bude dedikována separátní kapitola.

Pokud bychom se zaměřili na možnost diagnostiky snížených izolačních schopností prvku, mohli bychom je demonstrovat na obrázku 2

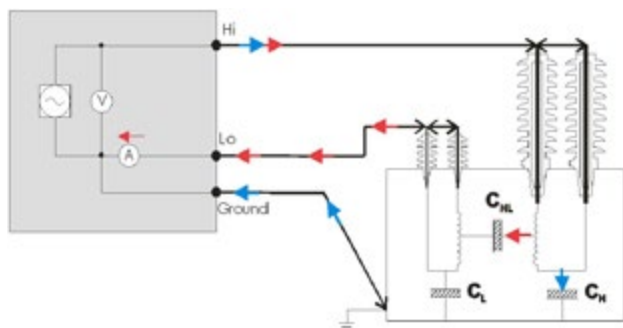


Obr. 2 Závislost  $\tan \delta$  na obsahu vlhkosti

Na obrázku 2 je možno vidět závislost parametru  $\tan \delta$  na obsahu vlhkosti v rozsahu až do 4% (hmotnostních). Grafická závislost je rozšířena i o frekvenční závislost tohoto parametru. Tato závislost bude využita v následující části materiálu.

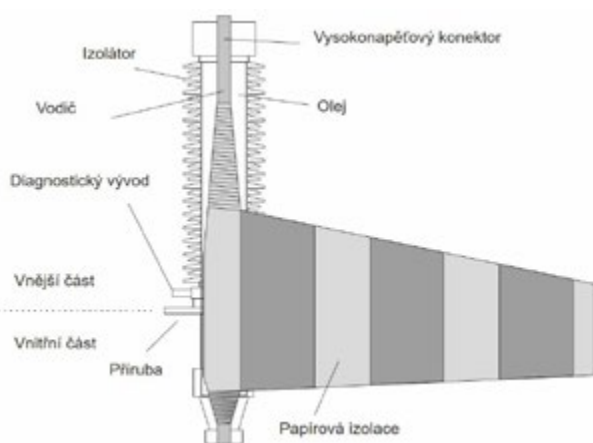
Vlastní měření je v rámci diagnostiky obvykle prováděno generováním vn napětí na příslušné frekvenci, přičemž je měřen svodový proud. Oba parametry jsou měřeny jako komplexní a následně je vypočtena kapacita a ztrátový činitel.

Způsoby zapojení jsou definovány standardy a obvykle jsou označovány jako zapojení GST nebo UST s dodatky guard, ground atd. Ve své podstatě se vždy jedná o měření parametrů kapacity, jak je zobrazeno na obrázku 3 včetně obvyklých zapojení. Jako příklad je naznačeno dvouvinuťové trafo, v případě transformátorů s vícero vinutími by došlo k navýšení počtu různých zapojení včetně separátního měření na průchodkách (pokud to průchodky konstrukčně umožňují).



Obr. 3 Obvyklé zapojení testů

Pokud bychom se podívali na konstrukční uspořádání průchodky, mohli bychom jej zjednodušeně zobrazit jako na obrázku 4.



Obr. 4 Příklad konstrukčního uspořádání průchodky

Průchodka, sloužící k bezpečnému prostupu napětí skrz stěnu na zemním potenciálu, může mít různé materiálové složení, nicméně principiálně se výrazně svojí funkcí neliší. Můžeme se setkat s například následujícími označeními:

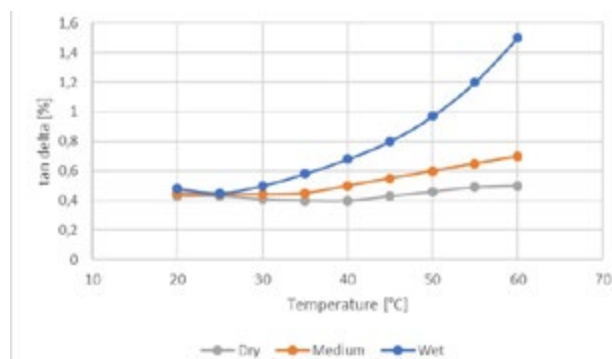
- RBP – Resin Bonded Paper
- OIP – Oil Impregnated Paper
- RIP – Resin Impregnated Paper
- RIS – Resin Impregnated Synthetic
- RIF® – Resin Impregnated Fiberglass

Výrobci nebo provozovatelé mají obvykle definovány limity pro kapacitu a tg, případně se odkazují na mezinárodní standardy IEC a IEEE, či materiály CIGRE (zdroje jsou uvedeny v rámci seznamu literatury).

Z hlediska diagnostiky je konstrukčně zásadní, zdali má průchodka měřicí vývod (obvykle propojení s poslední vrstvou). Měřicí vývody nalezneme na absolutní většině zvn průchodek 420 a 220 kV, velké části vvn průchodek (110 kV) a v některých případech na vn průchodkách. V případě, že měřicí vývod není součástí průchodky, je zapotřebí měření průchodky nahradit měřením průchodky společně s příslušným vinutím.

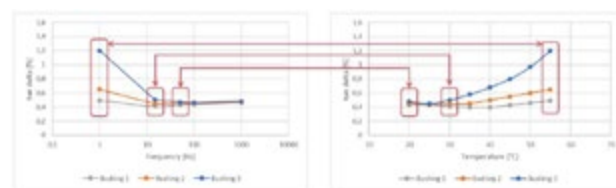
Měření by mělo být prováděno vždy při vztažné teplotě. V terénu toto není možno zaručit, v praxi jsou obvykle pro měření na odlišných teplotách využívány korekční faktory. Tento přístup je sice zavedený, nicméně je prokázáno, že korekční faktory definované standardy nejsou spolehlivým řešením vzhledem k individuální charakteristice průchodek, která se mění v průběhu životnosti. Jako jediné spolehlivé řešení se jeví použití metody individuálních korekčních faktorů, které jsou získány vždy před vlastním měřením a jsou tudíž vždy validní.

Důvodem pro měření při definované vztažné teplotě je teplotní závislost  $\tan \delta$ , která je zobrazena na obrázku č. 5. Uvedeny jsou jako příklady nenavlhlý izolační systém, středně navlhlý, a s navlhnutím odpovídajícím konci životnosti izolačního systému.



Obr. 5 Teplotní závislost tg delta

Teplotní závislost je ve své podstatě možno považovat za převrácenou teplotní závislost. Pokud změnu teploty prvku nahradíme změnou frekvence, dostaneme identický charakter odezvy inverzního charakteru, jak je naznačeno na obrázku 6.



Obr. 6 Vztah mezi teplotní a frekvenční závislostí

Tuto vlastnost je možno s úspěchem využít nejen pro teplotní korekci naměřených dat, ale i pro poměrně citlivou a jednoznačnou detekci zhoršujících se izolačních vlastností prvků, které se projevují na nižších frekvencích (nebo vyšších teplotách) mnohem výrazněji, než při vztažné teplotě a frekvencích blízkých síťové frekvenci.

Tento jev je již zohledněn například v materiálech CIGRE – Cigre TB 445 NB DFR a to i pro hodnoty se zvýšenou i sníženou frekvencí. Hodnoty jsou uvedeny na následujícím obrázku 7:

Jako snížená frekvence je uváděna hodnota 15 Hz, nicméně měření je možno i při frekvenci 1 Hz, jak je uvedeno na příkladu v následující tabulce na obrázku 8:



Frequency	RIP		OIP		RBP	
	new	aged	new	aged	new	aged
15Hz	<0.6%	<0.7%	<0.5%	<0.7%	<0.7%	<1.5%
50/60Hz	<0.5%	<0.5%	<0.4%	<0.5%	<0.6%	<1%
400Hz	<0.6%	<0.7%	<0.5%	<0.7%	<0.7%	<1.5%

at 20°C

Table 40: Indicative DF/PF Limit Values for Condenser Bushings  
(Source - "New Diagnostic for High Voltage Bushings")

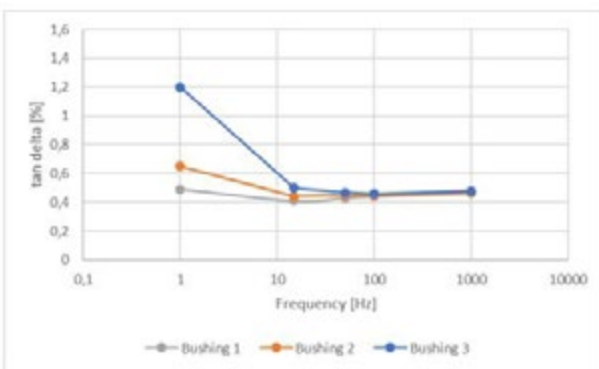
Obr. 7 Referenční hodnoty Cigre TB 445 NB DFR

Analysis results		
%DF @ 50 Hz & 20°C	%DF @ 15 Hz & 20°C	%DF @ 1 Hz & 20°C
< 0.50 % OK	< 0.50 % OK	< 0.70 % OK
0.50 - 0.70 % Deteriorated	0.50 - 0.70 % Deteriorated	0.70 - 1.0 % Deteriorated
0.70 - 1.0 % Investigate	0.70 - 1.0 % Investigate	1.0 - 2.0 % Investigate
> 1.0 % Bad	> 1.0 % Bad	> 2.0 % Bad

Obr. 8 IDAX 1 Hz – příklad limitních hodnot pro sníženou frekvenci

Pokud bychom porovnali vypovídající schopnost měření na nízké frekvenci 1 Hz s limity uvedenými v materiálu CIGRE, jsou rozdíly výrazně dynamičtější a lépe detekovatelné. Viz příklad na obrázku 9.

Jako příklad jsou uvedeny hodnoty pro 3 identické průchodky. Zatímco na frekvenci 50 Hz je možno hodnotit všechny 3 průchodky jako vyhovující se zcela minimálními rozdíly mezi



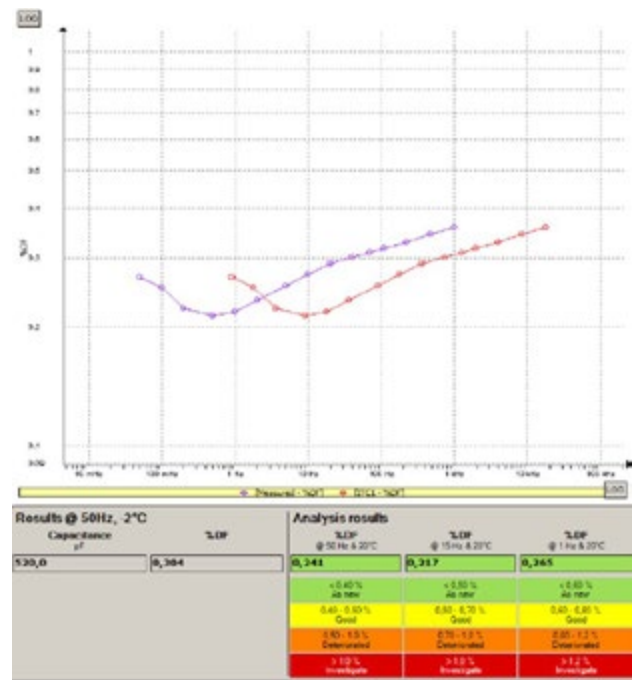
	%DF @ 50 Hz & 20 °C	%DF @ 15 Hz & 20 °C	%DF @ 1 Hz & 20 °C	Condition
Bushing 1	0,43	0,41	0,49	Dry
Bushing 2	0,45	0,44	0,65	Medium
Bushing 3	0,47	0,5	1,2	Wet

Obr. 9 Porovnání 50, 15 a 1 Hz hodnot

hodnotami, při hodnotě 15 Hz je průchodka 3 hodnocena jako podezřelá, tak při hodnotě 1 Hz je průchodka č. 3 zcela mimo akceptovatelné limity.

I v případě, že by průchodky nebyly měřeny při vztažné teplotě, je možno výsledky, díky individuální teplotní korekci založené na frekvenční odezvě, možno správně korigovat, jako je uvedeno na obrázku č. 10. Pokud by byly použity korekční faktory uváděné ve standardech, mohlo by dojít k chybným závěrům. Obecně je možno hodnotit používání statických korekčních faktorů jako přežitá a zanášející nejistotu do korigovaných hodnot.

Fialová křivka zobrazuje naměřené hodnoty, zatímco červená teplotně kompenzované na základě frekvenční odezvy.



Obr. 10 Teplotní kompenzace za použití frekvenční odezvy

### 3. Aplikační příklady

Jako první příklad můžeme využít zestárlou průchodku vvn. Je možno vidět, že zatímco frekvence 505 Hz nevykazuje odchylky v hodnotách, při hodnotě síťové frekvence je průchodka hodnocena jako podezřelá, tak při hodnotě testovacího napětí 1 Hz je průchodka hodnocena jako jednoznačně mimo akceptovatelné limity.

Bushing C1 Test		Test Mode:												
Test No.	ID	DFn	Pn	Test Mode	IEEE RT	50Hz					50Hz		50Hz	
						Capacitance C (pF)	DF	tan delta	tan delta	tan delta	Power Factor %	Power Factor %	Power Factor %	Power Factor %
11	01	007	01	010	010	1.00	0.0001	0.26	0.21	0	0.26	0.26	0.28	0.33
12	02	007	01	010	010	1.00	0.0002	0.26	0.26	0	0.24	0.44	0.31	0.35
13	03	007	01	010	010	1.00	0.0003	1.18	0.65	A	0.44	0.60	0.43	0.49
14	04	007	01	010	010									
15	05	007	01	010	010	0.07	0.0001	0.24	0.20	0	0.24	0.24	1.10	1.22
16	06	007	01	010	010	0.07	0.0001	0.24	0.20	0	0.24	0.24	0.28	0.31

Obr. 11 VVN průchodka data



Obr. 12 VVN průchodka

Tento případ je specifický v tom, že průchodky byly starší konstrukce a neobsahovaly měřicí vývody – proto byly měřeny současně s příslušným vinutím v dané fázi

Stav průchodek a jejich stáří je možno odvodit i z obrázku 12.

Jako další příklad je možno poukázat na obdobný případ vvn průchodek. Hodnoty jsou uvedeny na obrázku 13.

Ačkoliv hodnoty při síťové frekvenci jsou v akceptovatelných limitech, měření při 1 Hz signalizuje zásadní problém.

#### 4. Závěr

Standarty poměrně dobře popisují metodiku měření při frekvenci napětí blízké frekvenci síťové, a pro tato měření jsou dlouhodobě uvedeny limitní hodnoty, jako mnohem výhodnější se jeví současné měření při frekvenci 1 Hz. Je

pravdou, že se jedná o měření nad rámec standardního rozsahu, nicméně využívá identického zapojení, jako měření standardizovaná. Z hlediska časové náročnosti u průchodek dvouvintuového trafa můžeme počítat s prodloužením doby měření cca o 1 minutu. Tento časový nárůst je možno hodnotit jako zcela zanedbatelný. Na druhou stranu je vypovídající schopnost o stavu izolačního systému výrazně vyšší v porovnání se stávajícími postupy. Z hlediska nároků na přístrojové vybavení – obě měření, jak na frekvenci síťové, tak se sníženou frekvencí, je možno provádět jedním přístrojem, tudíž nevznikají nároky na nutnost investice do dvou sad přístrojového vybavení.

Na toto téma pořádali autoři webinář, který zahrnoval hlubší popis teoretického pozadí metod, stejně tak širší spektrum aplikačních případů. V případě zájmu je možno poskytnout záznam tohoto webináře.

#### Literatura

- [1] W. A2.34, "Guide for transformer maintenance," Cigre, 2011.
- [2] IEEE C57. 19. 01-2017 - IEEE Standard for Performance Characteristics and Dimensions for Power Transformer and Reactor Bushings.
- [3] IEC 60137:2017 - Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V.
- [4] IEEE C57.152-2013 - IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Fluid-Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors.
- [5] IEEE C57. 19. 100-2012 - IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings
- [6] IEEE C57. 12. 90-2015 - IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.
- [7] Dr. P. Werelius, Dr. D. Robalino, J. Cheng and M. Ohlen, "Dielectric Frequency Response Measurements and Dissipation Factor Temperature Dependence," 2012.
- [8] Dr. D. Robalino, "Accurate Temperature Correction of Dissipation Factor Data for Oil-Impregnated Paper Insulation Bushings: Field Experience," 2011.

Článek prošel recenzním řízením.

Connection Diagram			60Hz										1Hz		
Test No.	NB DFR	Dsg	Test Mode	TEST kV	Capacitance		Equivalent @ 10 kV		POWER FACTOR %			Δ %PF @ 20°C	%VDF	POWER FACTOR %	
					C (pF)	Δ pF	mA	Watts	Measured	@ 20°C	IR			Measured	
11	✘	H1	UST-R	10.0	419.8	10.2	1.58	0.0977	0.62	0.52	G	0.00	0.05	0.37	
12	✘	H2	UST-R	10.0	423.4	10.6	1.60	0.0978	0.61	0.52	G	0.00	0.05	0.29	
13	✘	H3	UST-R	10.0	424.8	12.2	1.60	0.0968	0.61	0.52	G	0.00	0.05	0.31	
14	✘	X1	UST-R	10.0	262.4	2.6	0.99	0.0241	0.24	0.23	G	0.04	0.04	0.24	
15	✘	X2	UST-R	10.0	261.7	2.3	0.99	0.0246	0.25	0.24	G	0.02	0.04	0.27	
16	✘	X3	UST-R	10.0	260.9	3.1	0.98	0.0313	0.32	0.30	G	0.04	0.04	1.85	

Obr. 13 VVN průchodka data 2

# Na jaké aplikace nelze kvantitativní termografii použít. Nebo lze?

*What applications cannot be used within quantitative thermography. Or can?*

VÁCLAV STRAKA, "TMV SS" S.R.O.  
DAVID KUBOŠ, "TMV SS" S.R.O.  
PAVEL PETRÁŇ, "TMV SS" S.R.O.

MIKOLÁŠ CHOURA, "TMV SS" S.R.O.  
PAVEL ZÍTEK, "TMV SS" S.R.O.

## Anotace

V praxi diagnostiků využívajících metodu kvantitativní termografie jsou typově nejrozšířenější termokamery osazené mikrobolometrickým detektorem. Jedná se obecně o vhodné řešení pro oblast prediktivní údržby, nicméně tyto systémy mají své limity neumožňující jejich využití na určité typy aplikací. Materiál je věnován představení některých aplikačních příkladů, které není možno spolehlivě kvantifikovat pomocí termokamer s mikrobolometrickým detektorem, avšak které jsou řešitelné jinými způsoby v rámci kvantitativní termografie. Součástí budou nejen aplikační příklady, ale též teoretické zdůvodnění limitů pro danou aplikaci.

*In the practice of diagnostics using the method of quantitative thermography, thermocameras fitted with a microbolometric detector are the most widely used type. This is generally a suitable solution for the field of predictive maintenance, however, these systems have their limits that prevent their use for certain types of applications. The material is devoted to presenting some application examples that cannot be reliably quantified using thermal cameras with a microbolometric detector, but which can be solved by other methods within quantitative thermography. It will include not only application examples, but also theoretical justification of the limits for the given application.*

## 1. Úvod

Termokamery se staly standardní součástí diagnostiky v oblasti prediktivní údržby. Technologický rozvoj výrazně zlepšil jejich cenovou dostupnost, stejně tak došlo ke snížení jejich hmotnosti a rozměrů. Tento posun je výsledkem rozvoje technologie maticových detektorů na bázi mikrobolometru. Tento typ detektorů se vyskytuje v naprosté většině kamer využívaných v oblasti prediktivní údržby. Lze říci, že se jedná o dostupný nástroj diagnostiky, který je masově rozšířen. Tato technologie je využívána k širokému spektru úloh, často si však uživatelé nejsou vědomi některých technologických limitů, které mohou vést k nedostatečně přesné kvantifikaci teplot či jejich rozložení. Stejně tak některé úlohy jsou považovány za nerealizovatelné. V následujících částech budou zmíněny některá technologická omezení a možnosti jejich řešení při specifických úlohách. Bude se jednat o následující aspekty (nejedná se o kompletní výčet, pouze nástin některých omezení):

- citlivost (NETD),
- rychlost snímání a odezvy s vlivem na kvantifikaci zdánlivých teplot,
- synchronizace snímání se zkoumaným jevem,

- měření skrz materiály a/nebo na povrchu specifických materiálů,
- scény s velkou teplotní dynamikou,
- zobrazení malých geometrických detailů.

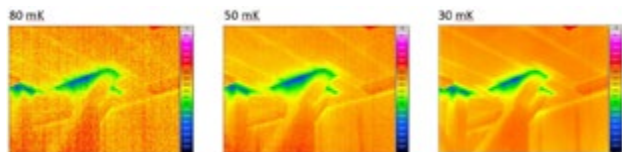
## 2. Citlivost (NETD)

Teplotní citlivost termokamery bývá označovaná parametrem NETD. Jedná se zjednodušeně o nejmenší zobrazitelný teplotní rozdíl při dané teplotě objektu a vzorkovací rychlosti. Obvykle se udává v mK a u dobrých kamer osazených mikrobolometrickým detektorem se pohybuje v rozsahu 30–50 mK, u špičkových 20 mK. Jedná se o hodnoty porovnatelné s kamerami vybavenými kvantovými detektory. Ačkoliv je tento parametr velmi podobný, je citlivosti u kamer vybavených mikrobolometrickým detektorem dosaženo dodatečným vyhlazováním šumu. Detektor sám o sobě má citlivost kolem 30–35 mK (v závislosti na kvalitě a konkrétním konstrukčním provedení), nicméně je potřeba připočítat šum generovaný elektronikou termokamery, optickým systémem atd. Pokud by signál nebyl dodatečně zpracován, mohli bychom počítat s hodnotami kolem 50–90 mK. Někteří výrobci nevyhlazují signál v rámci celého zorného pole (kvůli výpočetní náročnosti), ale pouze v jeho středové části. Vyhlazení šumu má obvykle za následek částečnou ztrátu kontrastu, což bývá kompenzováno jinými prostředky. Tato stať může být pokládána za bezpředmětnou, nicméně pokud je plánováno další zpracování radiometrického záznamu (termogramu), je potřeba vzít do úvahy, že nejsou zpracovávána „raw data“, nýbrž data, která byla již zpracována a ovlivněna jiným algoritmem, který uživateli obvykle není znám. Pokud je tedy předpokládána další práce z daty, je potřeba je mít nefiltrovaná, s vlastní úrovní šumu. Pokud je aplikace náročná na rozlišení teplotních rozdílů, je zapotřebí použití kamery osazené kvantovým detektorem, který má výrazně nižší hodnoty nativního šumu a uživatel může pracovat s daty neovlivněnými dodatečným vyhlazením šumu. Tyto kamery, osazené kvantovými detektory, dosahují nativně hodnot od 10 do 30 mK. Nejde pouze o vizuální kvalitu termogramu, ale o „raw data“, která je možno dále zpracovávat.

Pokud je tedy požadavek na „raw data“ neovlivněná jakoukoliv formou vyhlazování šumu současně s požadavkem na špičkové hodnoty NETD, tort zadání není řešitelné kamerami s mikrobolometrickým detektorem, ale kamerami osazenými detektorem kvantovým s vysokou nativní citlivostí. Hodnota šumu není pouze parametrem ovlivňující vizuální stránku termogramu, ale parametrem charakterizující „kvalitu“ dat,



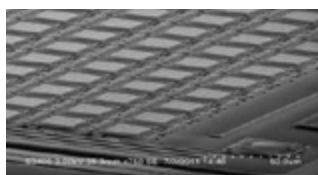
ovšem pouze v případě, pokud vezmeme v úvahu způsob, zda došlo k ovlivnění tohoto parametru před vytvořením vlastního termogramu.



Obr. 1 Vliv NETD

### 3. Rychlost snímání a záznamu

Jedním z parametrů uváděných u kamer bývá i záznamová / zobrazovací rychlost kamery. Bývá určující nejenom pro plynulost zobrazení dějů ale sekundárně, jak následně vysvětlíme, i pro přesnost měření.



Obr. 2 Struktura mikrobolometrického detektoru [6]

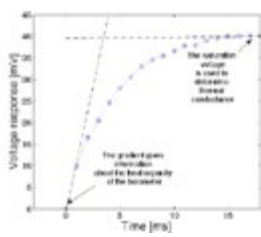
Dnešní systémy s bolometrickými detektory mají obvykle udávanou zobrazovací frekvenci v rozmezí 25–60 Hz pro plné rozlišení detektoru a v závislosti právě na fyzickém rozlišení detektoru (počtu pixelů – příklad viz obrázek 2). Je možné se setkat i se systémy pracujícími s obrazovou frekvencí nižší,

například 7,5 nebo 9 Hz, avšak ty je možno považovat spíše za spadající do skupiny informativních měřidel nevhodných pro sledování dynamických jevů.

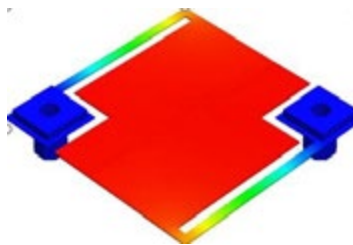
Mikrobolometrický detektor je ve své podstatě analogový tepelný detektor, jehož minimální čas pro spolehlivou kvantifikaci je minimálně 5 ms (tzn. 200 Hz). Jeho tepelná časová konstanta (čas potřebný na změnu vlastní teploty o 63,2 % specifického teplotního rozpětí) je  $\geq 5$  ms (teoretická hodnota nezohledňující ochlazení detektoru). Ve skutečnosti jsou však minimální časy odlišné a pohybují se v rozhraní 7–10 ms. Hodnoty minimálních časů jsou všeobecně známy všem, kteří jsou alespoň částečně obeznámeni s vlastnostmi mikrobolometrických detektorů, přičemž minimální hodnoty se pohybují obecně nad hranicí 7 ms, v závislosti na velikosti pixelu detektoru a jeho kvalitě. Pokud tedy chceme kvantifikovat spolehlivě rychlé děje, můžeme za maximální rychlost považovat 100–120 Hz, rychlosti vyšší pak pouze za informaci,

že došlo k jevu bez jeho spolehlivé kvantifikace. Ukázka rychlosti odezvy (saturace) detektoru v reakci na zářivý tok emitovaný sledovaným objektem je na obrázku 3. Příklad teplotního rozložení na jednom pixelu detektoru je na obrázku 4.

Stejně tak je třeba vzít v potaz, že mikrobolometrický detektor v daném čase/fre-



Obr. 3 Odezva mikrobolometrického detektoru [2]



Obr. 4 Tepelné rozložení mikrobolometrického detektoru [2]

kvenci integruje hodnotu signálu a není možno aktivně řídit excitační čas, který si můžeme zjednodušeně představit jako dobu závěrky/expozice u fotoaparátů. Pokud tedy budeme mít dynamický děj, ať již z hlediska změny teploty, případně změny pozice či tvaru, je třeba brát

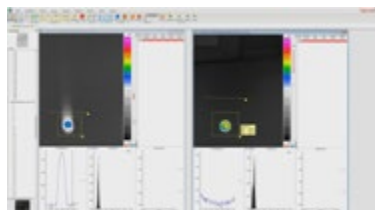
v úvahu tuto charakteristiku detektoru, nebo pro danou aplikaci použít jiný než bolometrický detektor.

Současně je zapotřebí upozornit na rozdíl, mezi zobrazovací frekvencí a rychlostí ukládání. Pokud nepožijeme statické termogramy, ale rozhodneme se ukládat sekvenci termogramů, případně radiometrické video, tak frekvence ukládání může být omezena (v případě ukládání do vnitřní paměti kamery), případně musíme mít vhodné připojení a možnost ukládat. Pro představu – jeden termogram o velikosti 640×480 pixelů může mít velikost 300–500 kB.

Pokud je požadována vyšší zobrazovací/záznamová frekvence, je tento požadavek obvykle řešen zmenšením zobrazované plochy detektoru, tzv. windowing. Pak se lze setkat i se specifikacemi uvádějícími rychlosti 120, 150 nebo i 200 Hz. U hodnocení těchto rychlostí je potřeba vyjít z fyzikálních vlastností mikrobolometrického detektoru.

Oproti tomu, pokud pro snímání dynamického jevu (ať již z hlediska teplotního nebo kinematického) použijeme termografickou kameru využívající kvantový detektor (někdy označovaný jako „chlazený“), můžeme pracovat s integračními časy detektoru obvykle v rozmezí jednotek až stovek mikrosekund ( $\mu$ s), tedy s časy o jeden až tři řády nižšími než v případě termografické kamery s mikrobolometrickým detektorem. Další vlastností kamer s fotonovými detektory je fakt, že je možno definovat vzorkovací frekvenci kamery nezávisle na integračním čase detektoru, (při respektování že vzorkovací frekvence  $f \leq 1/IT$ , přičemž  $IT$  je integračním časem detektoru [s]), či vzorkovací frekvenci synchronizovat se snímaným jevem (rotační pohyb, excitace při IR NDT – nedestruktivním testování pomocí termografie).

Jako příklad můžeme uvést následující záznam porovnávací identický jev při snímání pohybujícího se kruhového objektu kamerou s mikrobolometrickým detektorem (vlevo) a kamerou s fotonovým detektorem (vpravo).



Obr. 5 Porovnání záznamu dynamického jevu mezi kamerou s mikrobolometrickým detektorem a kvantovým detektorem [2]

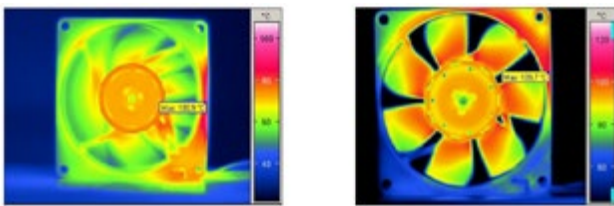
U levé části můžeme vidět rozmazaný záznam s viditelnou tepelnou stopou (připomínajícím ocas komety) způsobenou dlouhou tepelnou konstantou mikro-

bolometrického detektoru (vzorkovací frekvence detektoru 60 Hz). Záznam provedený kvantovým detektorem (vpravo, vzorkovací frekvence detektoru 60 Hz, IT = 300  $\mu$ s) nevykazuje ani zdánlivé signály ani deformaci objektu. Vizualní stránka není jediným rozdílem. Z hlediska kvantifikace termogramů je možno vysledovat i rozdílné zdánlivé teploty (teplotní stupnice je v obou případech nastavena identicky) lišící se o cca 10 % pro nejvyšší zdánlivé teploty sledovaného objektu. Tento rozdíl je způsoben právě rozdílnou technologií, obou detektorů a faktem, že se objekt pohybuje. Statické části scény jsou kvantifikovány identicky.

Pokud je tedy zapotřebí kvantifikovat rychlý mechanický nebo teplotní děl, není vhodné využívat standardní kamery osazené mikrobolometrickým detektorem, ale je zapotřebí využít kamery osazené fotonovým detektorem. Je tedy možno konstatovat, že využitá technologie neovlivňuje pouze vzhled jako takový, ale i kvantifikaci hodnot v závislosti na velikosti objektu, teplotně homogenní plochy a rychlosti (případně směru) pohybu.

#### 4. Synchronizace snímání se zkoumaným jevem

V některých případech je pro spolehlivé provedení kvantifikace zapotřebí nejen dostatečně rychlý systém s rychlou odezvou detektoru, ale současně možnost záznam trigovat (spouštět signálem) generovaným externím zdrojem, a to například pro sledování konkrétních částí rotačních prvků tak, aby byl zajištěn nejen nezarušený termogram, ale současně bylo možno sledovat vývoj teplot v čase na konkrétních rotačních prvcích, například lopatkách ventilátorů či jiných oběžných prvcích. Mikrobolometr jako takový nemůže být spolehlivě trigován externím signálem, proto jsou pro úlohy tohoto druhu kamery osazené mikrobolometrickým detektorem nevhodné a je nutné použít systémy osazené kvantovým detektorem, který tyto druhy měření principiálně umožňuje. Příklad je možno nalézt na následujícím obrázku, přičemž záznam vlevo je pořízen kamerou s mikrobolometrickým detektorem, zatímco vpravo systémem s kvantovým detektorem.

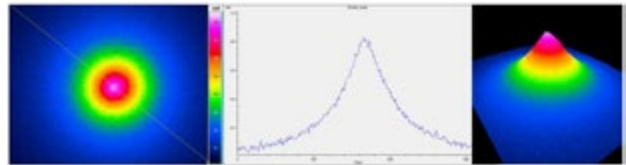


Obr. 6 Porovnání záznamu dynamického jevu mezi kamerou s mikrobolometrickým detektorem a kvantovým detektorem na rotačním prvku [2]

Synchronizace snímání umožňuje například nejen sledování teplotního profilu jednotlivých lopatek v čase, ale například též vývoj teplotního jevu na pozadí v časové ose, přičemž měření je prováděno mezerami mezi lopatkami.

Obdobný požadavek je vznášen například u metod aktivní termografie a analýzy záznamu metodou „lock-in“. V těchto případech je nutná velmi precizní synchronizace mezi kame-

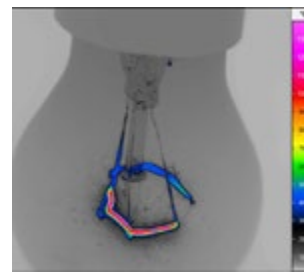
rou a excitačním dějem. Byť se v některých případech na tyto aplikace využívají i kamery s mikrobolometrickými detektory (v případě pomalých tepelných odezav analyzovaného vzorku na vnější excitaci), nicméně výrazně vhodnější je využít kvantové detektory. Příkladem takového postupu je i ukázka detekce minimálního oteplení elektronického prvku analyzované metodou lock-in (excitační energie 70  $\mu$ W, špičková hodnota oteplení 0,8 mK–0,0008  $^{\circ}$ C, rozlišení termogramu přibližně 8  $\mu$ K–0,000008  $^{\circ}$ C)



Obr. 7 Příklad možného teplotního rozlišení díky trigování termokamery a zpracování metodou „lock-in“

Pokud tedy úloha vyžaduje měření rotačních prvků, kde je trigování (synchronizace) nutné, je zapotřebí využít systém s kvantovým detektorem

#### 5. Měření skrz materiály a/nebo na povrchu specifických materiálů



Obr. 8 Příklad měření skrz sklo

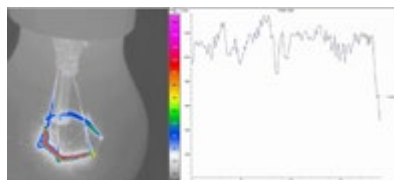
a chová se odrazivě. Kamery pracující v jiných vlnových oblastech, například MWIR, umí využít spektrální filtrace a měřit jak na konkrétních površích, tak skrz materiál. Ilustrativní příklad můžeme vidět na následující obrázku, měření teploty vlákn uvnitř skleněné baňky.

Pokud tedy úloha předpokládá měření skrz specifické materiály, nebo na jejich povrchu, kvantové detektory nabízejí výrazně širší možnosti řešení dané úlohy pomocí spektrální filtrace.

#### 6. Scény s velkou teplotní dynamikou

V některých případech úloha předpokládá kvantifikaci scény s velkou teplotní dynamikou. U standardních systémů pro oblast prediktivní údržby, vybavených mikrobolometrickými detektory, je zapotřebí nejprve nastavit požadovaný teplotní rozsah (fyzicky systém použije teplotní filtr nebo sníží radiační tok pomocí štěrbin), což vede buď k limitaci požadovaného rozsahu, nebo výrazné ztrátě teplotního rozlišení (díky limitaci bitové hloubky záznamu.

Řešením pro tyto úlohy jsou kamery s kvantovými detektory, některé z nich zvládají nejen měřit v několika teplotních rozsazích víceméně současně, ale některé z nich dokáží současně pracovat i s vysokoteplotními filtry. Výsledkem je možnost měřit scény s teplotní dynamikou až 1 700–2 000 °C a to bez ztráty bitové hloubky. Příkladem může být měření vývoje teploty na vláknu, ještě navíc umístěném ve skleněné baňce.



Obr. 9 Scéna s velkou teplotní dynamikou

Obrázek 9 zachycuje statický termogram s profilem teploty na vláknu, nicméně se jedná o výřez z časového záznamu vývoje teploty v čase. Teplotní dynamika na ukázce je přibližně 1 300 °C

Pokud tedy úloha předpokládá dynamický teplotní jev s velkým rozsahem teplot, řešením jsou opět termokamery osazené kvantovými detektory, v tomto případě spojené i se specifickou funkcí termokamery.

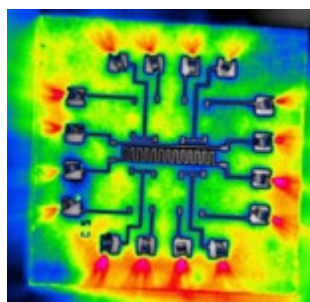
## 7. Zobrazení malých geometrických detailů

Tepele radiometrické detektory mikrobolometry mohou mít různý počet pixelů, obvykle se setkáme s rozlišeními od 120×80 px až po 1024×768 px (aktuálně nejvyšší standardně dostupné rozlišení radiometrických mikrobolometrických detektorů). Fotonové radiometrické detektory se standardně vyskytují v rozlišení od úrovně 640×512 px až po 1920×1536 px). Tento parametr je vysoce důležitý z hlediska požadavků na zobrazení dané plochy s dostatečným geometrickým rozlišením (IFOV). Je třeba rozlišovat mezi fyzickým rozlišením detektoru a rozlišením termogramu. Existují způsoby pro navýšení rozlišení termogramu. Některé jsou však pro mikroskopické aplikace zcela nevhodné a je potřeba být obezrán se způsobem navýšení rozlišení. U mikroskopických aplikací je jediným korektním způsobem optomechanický rozklad obrazu umožňující navýšit rozlišení termogramu až na čtyřnásobek. Postupy prezentované jako „využití mikrootřesů zeměkoule“ či jiné jsou pouze matematickou interpolací mezi-lehlých virtuálních pixelů a nejsou korektně aplikovatelné.

Dalším parametrem je fyzická velikost jednoho pixelu. Byť tento parametr nevypadá podstatně, je důležité jej znát z hlediska definice schopnosti zobrazení detailu. Obvykle bývá ve specifikacích označen jako „pixel pitch“. Nejedná se o faktickou velikost jednoho pixelu detektoru, ale o vzdálenost středů dvou sousedících pixelů. Význam tohoto parametru je ve vztahu k použité optice – v oblasti mikroskopických aplikací se IFOV neuvádí v úhlových jednotkách (mRad), ale jako fyzická velikost zobrazeného pixelu na předmětu – obvykle v  $\mu\text{m}$ . Důvodem je minimální hloubka ostrosti při mikroskopickém zobrazení a prakticky fixní pracovní vzdálenost. Tyto objektivy jsou obvykle definovány jako „ $\times 0,5$ “, „ $\times 1$ “ nebo až „ $\times 8$ “. Tuto číselnou hodnotu můžeme považovat za jmenovatele ve zlomku, kde čitatelem je „pixel pitch“. Jako příklad můžeme například zvolit detektor s pixel pitch 17  $\mu\text{m}$  a použitý objektiv

„ $\times 0,5$ “. fyzická velikost zobrazeného pixelu je pak 34  $\mu\text{m}$ .

Je zapotřebí vzít v potaz ještě jeden, byť zdánlivě méně podstatný parametr, a to je vlnové pásmo, ve kterém daný termografický systém pracuje. Termokamery využívané pro prediktivní údržbu (s mikrobolometrickými detektory) pracují v dlouhovlnném (LWIR) infračerveném pásmu, obvykle přibližně 7,5–14  $\mu\text{m}$ , zatímco termokamery s kvantovými detektory mohou pracovat i v MWIR pásmu cca 1,5–5,5  $\mu\text{m}$ . z toho vyplývá i fyzikální omezení velikosti detailu, který je možno zobrazit a spolehlivě kvantifikovat. Zatímco u LWIR mikrobolometrických systémů můžeme uvažovat o minimální velikosti jednoho pixelu termogramu na úrovni 15–20  $\mu\text{m}$ , u MWIR systémů s vhodným mikroskopickým systémem je možno dosahovat hodnot řádově lepších a dostat se až k velikostem cca 1,3  $\mu\text{m}$  / pixel.



Obr. 10 Mikroskopická struktura

Příkladem může být termogram na obrázku 10, mikroskopická struktura, velikost pixelu cca 1,3  $\mu\text{m}$  / pixel, detektor kamery 1 280×1 024 pixelů, pixel pitch 15  $\mu\text{m}$ , mikroskopický objektiv Mx8.

Pokud je tedy cílem zobrazení co nejmenších mikroskopických detailů, cestou je systém s kvantovým detektorem pracujícím v MWIR pásmu, samozřejmě s vhodným mikroskopickým objektivem.

## 8. Závěr

Cílem materiálu není kritika termokamer určených pro oblast prediktivní údržby, případně termokamer osazených mikrobolometrickým detektorem. Záměrem autorů bylo poukázat na možná řešení úloh, který jsou termokamerami pro prediktivní údržbu naprosto neřešitelné, případně řešitelné se zásadními omezeními.

Celý materiál byl koncipován úmyslně naprosto nekomerčně, jednotlivé popisované jevy nejsou spojeny s konkrétními výrobci, případně jsou údaje anonymizovány. Autoři jsou připraveni poskytnout zájemcům bližší informace či konzultovat dotazy a požadavky vzešlé z tohoto materiálu.

## Literatura

- [1] ČSN EN 16714-3 Nedestruktivní zkoušení – Termografické zkoušení – Část 3: Termíny a definice.
- [2] Infratec GmbH, Infrarotsensorik und Messtechnik, Dresden: Manual of infrared camera VarioCAM® HD.
- [3] OIML R 141 2008.
- [4] Interní materiály “TMV SS“, s. r. o.
- [5] www.tmvss.cz
- [6] www.lno.ca, 2018
- [7] [https://cs.wikipedia.org/wiki/%C3%9Ahlov%C3%A11\\_rychlost](https://cs.wikipedia.org/wiki/%C3%9Ahlov%C3%A11_rychlost)

Článek prošel recenzním řízením.





# papouch.com

eshop s průmyslovou elektronikou



Datové  
převodníky



Měření a  
monitorování



Průmyslový  
Ethernet



Komponenty  
do průmyslu



Zakázková  
řešení

**silex**  
technology

**Relay** M-BUS  
SOLUTIONS

**PiiGAB**  
PROCESSINFORMATION

**PAPOUCH**

**SOLARIX**

**LANTRONIX**

**DATCON**  
INDUSTRIAL MEASUREMENT

**ADVANTECH**

**NETIO**

**iSMACONTROLLI**

## I/O moduly Quido

I malá automatizace umí velké věci

Vstupy



Hlídání oken, dveří,  
stavu strojů a linek...

Výstupy



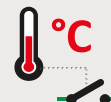
Ovládání osvětlení,  
technologií, stykačů...

Impulzy

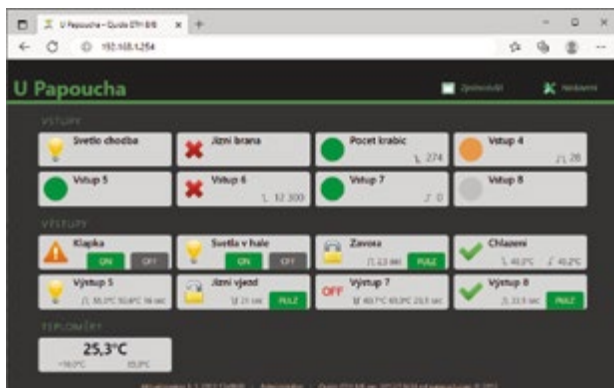


Měření energií:  
voda, topení, elektřina

Teploměr



Hlídání teploty  
vzduchu, vody, ...





## Poznejte budoucnost automatizace s VARIO-X.

Navštivte nás na veletrhu AMPER v Brně!

Na stánku Murrelektronik se představí nově i portfolio Murrplastik, kam patří průmyslové řešení pro ochranu kabelů, vedení kabelů a jejich značení.

