

ISSN 1210-311X MK ČR: 5 979

TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

1

ROČNÍK XXXII

2023

ASOCIACE TECHNICKÝCH DIAGNOSTIKŮ ČESKÉ REPUBLIKY, z. s.

TERMODIAGNOSTIKA A TRIBODIAGNOSTIKA

Problematika mikroskopické termografie

Issues of microscopic thermography

Jak snadno zapříčinit poruchu strojního zařízení

How easy to cause machinery failure

www.atdcr.cz

TD4

TD11

29. mezinárodní veletrh elektrotechniky, energetiky, automatizace,
komunikace, osvětlení a zabezpečení

AMPER[®] 2023

21. – 23. 3. 2023
VÝSTAVIŠTĚ BRNO



UDRŽITELNÁ ENERGETICKÁ ŘEŠENÍ A SPOLEHLIVÁ INFRASTRUKTURA

AUTOMATIZACE & DIGITALIZACE V PRŮMYSLU

AMPER SMART & SAFE CITY – technologie pro chytré domy i města

AMPER e-MOTION – program věnovaný e-mobilitě

www.amper.cz

pořádá  TERINVEST

Vážení čtenáři a přátelé technické diagnostiky.

Dovolte, abych vás informoval o novinkách a plánech v rámci Asociace technických diagnostiků ČR, z.s. V termínu 31. 1.–1. 2. 2023 proběhl jubilejní 40. ročník odborné konference DIAGO. Za velmi vysoké účasti bylo diskutováno a prezentováno mnoho zajímavých témat z oblasti technické diagnostiky. Také bylo vzpomenu na historii této úspěšné konference a na její minulé představitele.

A co je tedy v rámci ATD ČR, z.s. nového?

Prvním a důležitým bodem je skutečnost, že členská schůze vygenerovala nové vedení asociace. Statutární orgán nově pracuje ve složení: Ondřej Švec, DiS., CTD (prezident), prof. Dr. Ing. Pavel Němeček, CTD (viceprezident) a Ing. Ladislav Hrabec, Ph.D., CTD (tajemník). K dalším změnám došlo také v nejvyšším orgánu asociace. Doporučuji tedy navštívit stránky www.atdcr.cz, kde naleznete všechny podstatné změny.

Čeká nás rok, který bude určitě plodný. V rámci asociace plánujeme vznik nové odborné skupiny, která by se měla zabývat diagnostikou motorových paliv. Byl by to další krok k rozšíření základny asociace a také možnost vychovávat nové odborníky v této diagnostické disciplíně. Veškeré přípravy jsou na dobré cestě a já věřím, že se nám vznik nové skupiny podaří realizovat v tomto roce.

Chceme také dále úzce spolupracovat s časopisem Řízení a údržba průmyslového podniku v rámci odborných příloh o technické diagnostice. Plnohodnotnou přílohu technické diagnostiky naleznete v podzimním čísle časopisu. Odborné články obstará skupina tribodiagnostiky.

Budeme se tedy těšit, že se na stránkách časopisu Řízení a údržba průmyslového podniku budeme pravidelně setkávat i nadále.



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

ŠÉFREDAKTOR:
ZÁSTUPCE ŠÉFREDAKTORA:
GRAFICKÁ ÚPRAVA:
REDAKČNÍ RADA:

ING. DANIEL ZUTH, PH.D.
ING. LADISLAV HRABEC, PH.D.
JÍŘÍ RATAJ
DR HAB. INŽ. WITOLD BIALY
ING. MARTIN HOLEK, PH.D.
PROF. ING. VÁCLAV LEGÁT, DRSC.
DOC. ING. VIERA PEŤKOVÁ, PHD.
ING. FRANTIŠEK VDOLČEK, CSC.
ASOCIACE TECHNICKÝCH
DIAGNOSTIKŮ ČR, Z. S.
VŠB-TU OSTRAVA
17. LISTOPADU 15 / 2172
708 33 OSTRAVA - PORUBA
2× ROČNĚ
5 979
1210-311X

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

ING. DANIEL ZUTH, PH.D.
ING. LADISLAV HRABEC, PH.D.
JÍŘÍ RATAJ
DR HAB. INŽ. WITOLD BIALY
ING. MARTIN HOLEK, PH.D.
PROF. ING. VÁCLAV LEGÁT, DRSC.
DOC. ING. VIERA PEŤKOVÁ, PHD.
ING. FRANTIŠEK VDOLČEK, CSC.
ASOCIACE TECHNICKÝCH
DIAGNOSTIKŮ ČR, Z. S.
VŠB-TU OSTRAVA
17. LISTOPADU 15 / 2172
708 33 OSTRAVA - PORUBA
2× ROČNĚ
5 979
1210-311X

VYDAVATEL:

PUBLISHER:

VYCHÁZÍ:
MK ČR:
ISSN:

VYCHÁZÍ:
MK ČR:
ISSN:

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.

Problematika mikroskopické termografie

Issues of microscopic thermography

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

JIŘÍ SVOBODA, TMV SS, JIRI.SVOBODA@TMVSS.CZ

DAVID KUBOŠ, TMV SS, DAVID.KUBOS@TMVSS.CZ

PAVEL PETRÁŇ, TMV SS, PAVEL.PETRAN@TMVSS.CZ

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

MIKOLÁŠ CHOURA, TMV SS, MIKOLAS.CHOURA@TMVSS.CZ

ANOTACE CZ:

Kvantitativní termografie je v posledních letech využívána ve zvýšené míře i pro mikroskopické aplikace vyžadující dostatečné zobrazení detailů zkoumaného objektu. Jedná se nejenom o zobrazení s dostatečným geometrickým rozlišením, ale současně i dostatečně spolehlivou kvantifikaci radiačního toku emitovaného objektem a korektní přepočtení na teploty. Tato oblast má některé limity a specifika, kterým je věnován následující materiál.

ANNOTATION ENG:

Quantitative thermography has been increasingly used in recent years also for microscopic applications requiring a sufficient display of the details of the examined object. It is not only a display with sufficient geometric resolution, but also a sufficiently reliable quantification of the radiation flux emitted by the object and a correct conversion to temperatures. This area has some limits and specifics to which the following material is devoted.

1. ÚVOD

Pojem mikroskopická termografie (nebo mikrotermografie) není standardizován a je zřejmě zapotřebí jej blíže vysvětlit, respektive objasnit jeho chápání autory. Jedná se o geometrickou rozlišovací schopnost v jednotkách mm až μm , přičemž jsou zdánlivé teploty objektu vizualizovány (kvalitativní termografie) anebo vypočítávány pro každý pixel termogramu (kvantitativní

termografie). Byť se může zdát, že se jedná v porovnání s klasickou termografií primárně právě o minimalizaci velikosti zobrazovaného pixelu, právě s tímto je spjato několik aspektů, které je nutno brát v potaz.

Mezi základní aplikace, kde je mikroskopické termografie využíváno, je možno považovat mikroelektroniku, materiálový výzkum, pokročilé materiály a fyzikální, chemické, medicínské a biologické experimenty. Tento výčet samozřejmě není kompletní, je možno jej pouze považovat za nástin stávajícího využití.

Mikroskopická termografie není limitována pouze na metody „pasivní termografie“ (teplotní pole jsou vyvolána například standardním provozem), ale je s úspěchem využívána i v oblasti tzv. „aktivní termografie“ (řízené excitování vzorku externím zdrojem energie, ať již ve formě pulzu, tak periodicky se opakujícího signálu).

V následujících kapitolách budou zmíněny vybrané aspekty, které je nutno brát v potaz, tak vybrané aplikace.

Stejně jako v jiných oblastech je zapotřebí při provádění experimentu brát v potaz požadavky na vypovídající schopnost experimentu, které determinují požadavky na použité vybavení, případně si být jednoznačně vědom parametrů použitého vybavení a jejich případného vlivu na výsledek.

2. TECHNICKÉ PARAMETRY VYBAVENÍ A JEJICH VLIV

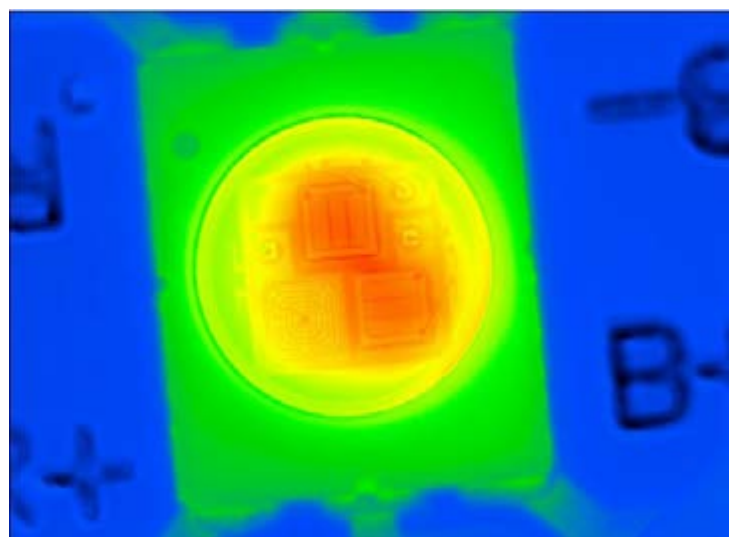
Před počátkem vlastního měření je zapotřebí vytvořit odhad požadavků vlastního experimentu a vyhodnotit, zda-li uvažované technické vybavení je dostatečně vhodné, případně vybrat vhodné vybavení. Kvalita pořízených dat významně ovlivňuje následné vyhodnocení, proto je zapotřebí vzít tyto parametry do úvahy. V potaz je vhodné vzít zejména parametry uvedené v následujících podkapitolách.

2.1. SPEKTRÁLNÍ ROZSAH

Spektrální rozsah má vliv nejenom z hlediska množství energie emitovaného objektem (vliv emisivity a Wienův zákon posuvu), ale též z hlediska případné propustnosti měřeného objektu. Neexistuje univerzální rada, jaké pásmo je nejvhodnější. Vždy záleží na konkrétním experimentu a objektu. Obecně jsou v oblasti termografie rozlišována 3 pásma s následujícími přibližnými rozsahy – SWIR 0,8–2 μm , MWIR 2–5 μm a LWIR 8–14 μm

2.2. TECHNOLOGIE DETEKTORU

Ačkoliv termogram vypadá ve finále podobně, technologie detektoru je často limitující z hlediska



Obrázek 1 – RGB LED, MWIR kamera 640×512 px, M=1,0×, FOV (9,6×7,7) mm, IFOV 15 μm , velikost jednotlivých LED cca 1×1 mm

dané aplikace. Obzvláště u RD a NDT aplikací je zapotřebí chování detektoru vzít v potaz. Obecně můžeme rozdělit detektory do dvou základních skupin a to tepelné (mikrobolometry, někdy také označované jako nechlazené) a fotonové (též označované jako chlazené). Za první vlastnost je možno považovat způsob vyčítání detektoru – zatímco fotonové detektory je možno vyčíst najednou (snapshot), tepelné detektory jsou vyčítány metodou „line-by-line“, tedy po jednotlivých řádcích či skupinách řádků. Výsledkem vyčítání metodou „line by line“ může být nejen deformace obrazu, ale též fakt nejednotného systémového času jednotlivých částí termogramu, což ve výsledku například limituje použití Fourierovy transformace.

Stejně tak je třeba vzít v potaz triggování / synchronizaci kamery – přesnou synchronizaci umožňují pouze kamery s fotonovými detektory, nikoliv kamery s detektory tepelnými.

2.3. TEPLOTNÍ ROZLIŠENÍ

Jedná se o schopnost detektoru / kamery rozlišit rozdíly zdánlivých teplot sledovaného objektu. Obvykle je tento parametr označován jako NETD (Noise equivalent temperature difference) a jeho hodnota je uváděna v mK při vztažené teplotě 25 nebo 300 °C. Zatímco nejlepší tepelné detektory dosahují hodnot v rozmezí 30–35 mK (detektory – pro reálné hodnoty je zapotřebí připočíst šum produkovaný též kamerou jako takovou a optikou), u fotonových detektorů je tato hodnota v závislosti na kvalitě detektoru na úrovni až 10mK. Horší teplotní rozlišení tepelných detektorů často výrobci kompenzují vyhlazováním šumu, nicméně je možno říci, že obecně kamery s fotonovými detektory jsou výrazně citlivější. Pro RD aplikace jsou obvykle doporučovány kamery s fotonovými detektory.

2.4. GEOMETRICKÉ ROZLIŠENÍ DETEKTORU

Tepelné radiometrické detektory mohou mít různý počet pixelů, obvykle se setkáme s rozlišeními od 120×80 px až po 1 024×768 px (aktuálně nejvyšší standardně dostupné rozlišení radiometrických mikrobolometrických detektorů). Fotonové radiometrické detektory se standardně vyskytují v rozlišení od úrovně 64×512 px až po 1 920×1 536 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 obeznamen se způsobem navýšení rozlišení. U mikroskopických aplikací je jediným korektním způsobem optomechanický rozklad obrazu umožňující navýšit rozlišení termogramu až na 4násobek. Postupy prezentované jako „využití mikrootřesů zeměkoule“ či jiné, jsou pouze matematickou interpolací mezilehlých virtuálních pixelů a nejsou korektně aplikovatelné.

2.5. 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 μm . Důvodem je minimální hloubka ostrosti při mikroskopickém zobrazení a prakticky fixní pracovní vzdálenost. Tyto objektivy jsou obvykle definovány jako „x0,5“, „x1“ nebo až „x8“. Tuto číselnou hodnotu můžeme považovat za jmenovatele ve zlomku, kde čitatelem je „pixel pitch“. Jako příklad můžeme například zvolit detektor s pixel pitch 17 μm a použitý objektiv „x0,5“. fyzická velikost zobrazeného pixelu je pak 34 μm . Tyto aspekty budou dále zmíněny v jedné z následujících kapitol

2.6. INTEGRAČNÍ ČAS / ČASOVÁ KONSTANTA DETEKTORU

U tepelných detektorů mluvíme o časové konstantě detektoru, která se pohybuje v rozmezí 6–10 ms (obvyklé hodnoty, mohou se v závislosti na výrobci lišit. U detektorů fotonových hovoříme o integračním čase, který je závislý, kromě parametrů detektoru, i na hustotě radiačního toku emitovaného objektem, použitých teplotních a spektrálních filtrech a dalších parametrech. U fotonových detektorů se pohybuje z hlediska integračních časů obvykle v jednotkách až stovek μs , tedy hodnotách až o několik řádů lepších než u detektorů tepelných. Je zapotřebí si uvědomit, že u fotonových detektorů, na rozdíl od detektorů tepelných, je možno integrační čas řídit. Toto je extrémně důležité u měření dynamických scén, ať již z hlediska teplotního, tak kinematického.

2.7. VZORKOVACÍ FREKVENCE ZÁZNAMU

Vzorkovací frekvenci je potřeba chápat odlišně u tepelných (mikrobolometrických) detektorů, oproti detektorů fotonovým. Zatímco u kamer s tepelnými detektory lze za mezní frekvenci považovat hodnotu 100–120 Hz (nad tuto frekvenci je nejistota kvantifikace teplot vysoká a případné jevy lze považovat za indikaci teplotního trendu, nikoliv spolehlivě vypočtené teploty), tak u kamer s fotonovým detektorem běžně dosahujeme vzorkovací frekvence až 100 kHz, v závislosti na kameře, sledovaném jevu a velikosti sledované oblasti

Parametry uvedené v předchozích kapitolách je nutno znát s ohledem na vypovídací schopnost výsledku měření, neboť jej mohou ovlivňovat a výrazně limitovat.

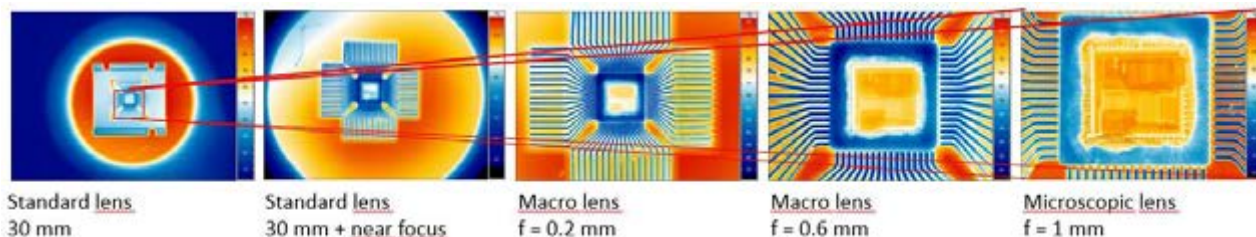
3. OPTICKÝ SYSTÉM

Pokud budeme uvažovat výhradně optické rozlišení (a pomíne nic nepřinášející digitální zoom či matematickou interpolaci termogramu) je nutno využívat dedikované prostředky. Cílem je detailní zobrazení objektu, přičemž fyzická velikost pixelu termogramu je dána aplikací jako takovou. Optický systém tedy volíme s ohledem na naše očekávání.

Zobrazení detailu nám umožňuje nejen zobrazení detailu s dostatečnou vypovídající schopností, ale též korektní výpočet teplot jednotlivých bodů termogramu. Jedná se o identickou problematiku jako v případě standardních objektivů ve vztahu k IFOV.

Z technického hlediska máme k dispozici 3 různá technická řešení, či jejich kombinace (seřazeno dle technické úrovně):

- Rozšiřující kroužky



Obrázek 2 – zobrazení komponentu s různými objektivy

- Makroskopické předsádky
- Mikroskopické objektivy

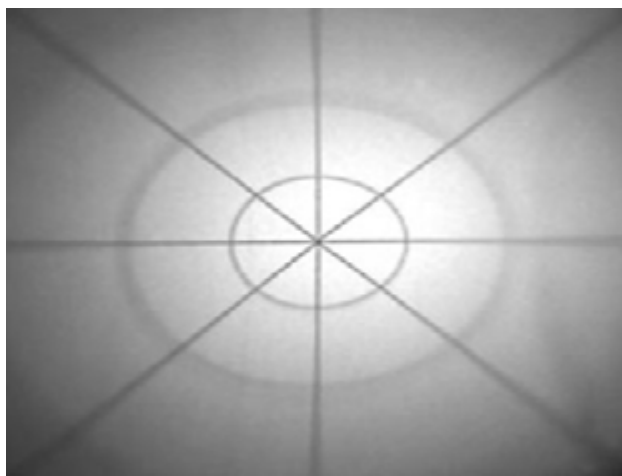
3.1. ROZŠÍŘUJÍCÍ KROUŽKY

Instalují se mezi kameru a objektiv (případně kameru a objektiv s nasazenou makropředsádkou. Jedná se o kroužky o tloušťkách v řádech jednotek mm.



Obrázek 3 – rozšiřující kroužky

Instalace těchto kroužků umožňuje zkrácení minimální ostřicí vzdálenosti a tím i zvětšení zobrazovaného pixelu na objektu. Jedná se o cenově vysoce efektivní řešení a současně flexibilní, neboť kroužky je možno vrstvit. A tím i měnit velikost zobrazovaného pixelu. V potaz je však nutno vzít fenomén tzv. „vinětování“ (vignetting), který se projevuje rozostřením obrazu s narůstající tendencí od středu k okrajům zorného pole, jako je možno vidět na obrázku číslo 4



Obrázek 4 – ukázka tzv. vinětování

Kromě estetického vlivu je potřeba si uvědomit, že tzv. vinětování je ve své podstatě rozostřením obrazu směrem k okrajům a tvarová deformace. V oblasti kvantitativní termografie platí, že nedostatečné zaostření způsobuje nekorektní kvantifikaci teplot a tím i zmenšení použitelného zorného pole (v důsledku zmenšení geometrického rozlišení detektoru. Toto chování je možno kvantifikovat například pomocí tzv. Prewittova operátoru

Obecně lze použití rozšiřujících kroužků hodnotit jako levné řešení, které však není vhodné pro pokročilé nebo RD aplikace. Pouze jako nouzový postup v případě potřeby, který značně limituje výsledné použití termogramu.

3.2. MAKROPŘEDSÁDKY

Nasazují se na standardní objektivy a obvykle dosahují zvětšení až do hodnot $\times 0,5$, tzn. dvojnásobku pixel pitch. Jedná se o poměrně vhodné řešení v případě, že uživatel nemá příliš velké nároky na aplikaci (zvětšení). Kvalita termogramu je obvykle poměrně dobrá, stejně tak přesnost měření a naprosto minimální vinětace. Příklad je na obrázku 5



Obrázek 5 – makro předsádka

Řešení pomocí makropředsádek lze hodnotit jako akceptovatelnou vstupní úroveň do mikroskopických aplikací, samozřejmě po zhodnocení limitů tohoto přístupu.

3.3. MIKROSKOPICKÉ OBJEKTIVY

Mikroskopické objektivy jsou jednoznačně vrcholným řešením v této oblasti. Pokud budeme předpokládat, že se jedná o kvalitní objektivy, tak umožňují v dnešní době zobrazení detailů menších, než $2 \mu\text{m}$. Bývají označovány opět jako poměr vůči pixel pitch, tudíž jejich zobrazovací schopnost je třeba vyhodnocovat právě na základě znalosti obou parametrů, nebo na základě uváděného IFOV. IFOV (a stejně tak FOV) se v této oblasti neuvádí v úhlových jednotkách, ale přímo jako fyzický rozměr pixelu obrazu, nebo celého zorného pole, a to v μm



Obrázek 6 – příklady mikroskopických objektivů

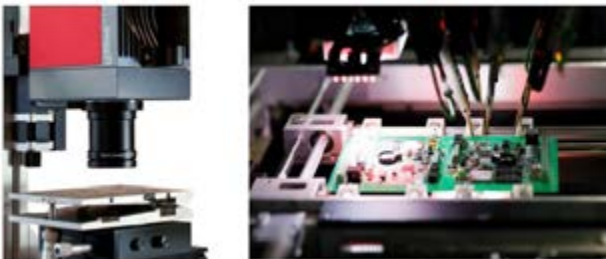
(IFOV) nebo mm (FOV). Toto je možné díky pevné pracovní vzdálenosti mezi objektivem a sledovaným objektem, respektive malou hloubkou ostrosti mikroskopických objektivů. Proto je třeba věnovat pozornost i pracovní vzdálenosti, označované například jako WD. Příklady je možno vidět na obrázku číslo 6

Pokud bychom zohlednili pixel pitch, můžeme vidět typické hodnoty FOV a IFOV. Jako příklad jsou použity kamery s rozdílným geometrickým rozlišením detektoru a různou velikostí pixel pitch (v tomto případě se jedná o kamery s fotonovými detektory). Pro ukázkou jsou v tabulce i hodnoty pro řešení pomocí makropředsádek.

	[640 × 512] IR pixels @ 15 µm pitch		[1,280 × 1,024] IR pixels @ 10 µm pitch	
	FOV	IFOV	FOV	IFOV
Close-up, 300 mm	58 mm × 46 mm	90 µm	77 mm × 61 mm	60 µm
Close-up, 500 mm	48 mm × 38 mm	75 µm	64 mm × 51 mm	50 µm
M = 1.0×, WD40, WD 200, WD 300	9.6 mm × 7.7 mm	15 µm	13 mm × 10 mm	10 µm
M = 3.0×, WD22	3.2 mm × 2.6 mm	5 µm	4.3 mm × 3.3 mm	3.3 µm
M = 8.0×, WD14	1.2 mm × 0.96 mm	2 µm	1.6 mm × 1.28 mm	1.3 µm

Obrázek 7 – velikosti FOV a IFOV při různých kombinacích mikroskopických objektivů a detektorů

Jak je možno vidět, u mikroskopických objektivů s nejlepším zvětšením je potřeba počítat s malými pracovními vzdálenostmi mezi objektem a objektivem a to v řádech malých jednotek centimetrů. Tento aspekt není u mnohých aplikací na překážku, nicméně existují aplikace, kde by byla větší pracovní vzdálenost žádoucí. Jako příklad můžeme uvést elektronické prvky, které je potřeba nakontaktovat, případně vzorky v klimatických komorách či jiné aplikace vyžadující zvětšenou pracovní vzdálenost a současně velmi dobré zobrazení detailu. Příklad je uveden na obrázku 8



Obrázek 8 – příklady pracovních vzdáleností

V takových případech se jako řešení jeví speciální mikroskopické objektivy s prodlouženou pracovní vzdáleností. Příklady

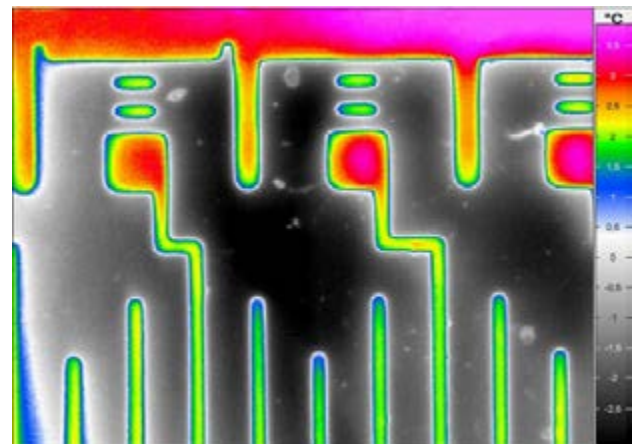
jsou uvedeny na obrázku 7 v části zvýrazněné červenou barvou. Je tedy možno dosáhnout zobrazení jednoho pixelu o velikosti až do 10 µm při pracovní vzdálenosti 200 nebo 300 mm. Příklad je uveden na obrázku 9.

Na obrázku 9 je možno vidět též příklad, kdy členitost objektu neumožňuje korektní zaostření všech prvků v zorném poli vzhledem k malé hloubce ostrosti mikroskopických objektivů. Jak již bylo zmíněno, korektní zaostření je jedním z klíčových parametrů následné kvantifikace zdanlivých teplot. Nejedná se tedy pouze o vizuelní aspekty, ale aspekty vztahující se k přesnosti měření a následné interpretaci. Problematice měření objektů s členitostí přesahující hloubku ostrosti je vyčleněna kapitola 4

Ačkoliv některé parametry, jako například pracovní vzdálenost, mohou vypadat nepodstatně, je zapotřebí je vzít do úvahy právě vzhledem k povaze experimentu či aplikace



Obrázek 9 – příklad použití mikroskopického objektivu s prodlouženou pracovní vzdáleností



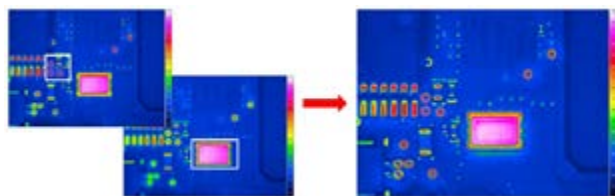
Obrázek 10 – SMD rezistor, objektiv Mx8, detektor 1280x1024 px, velikost jednoho pixelu cca 1,3 µm, pasivní termografie

Pokud je tedy vybavení zvoleno vhodně, můžeme pracovat s termogramy s vysokým rozlišením a korektně je analyzovat. Jako příklad můžeme uvést termogram na obrázku 10. Jedná se o pasivně nasnímaný SMD rezistor kamerou s detektorem 1 280×1 024 px s velikostí jednoho pixelu cca 1,3 μm. Stupnice zdánlivých teplot zobrazuje odchylky od vztažné teploty.

4. MĚŘENÍ ČLENITÝCH OBJEKTŮ

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, jednou z vlastností mikroskopických optických systémů je snížená hloubka ostrosti. Jedná se o parametr ovlivněný poměry mezi velikostí detektoru, světelností optiky a dalších parametrů termografické sestavy. Pro správnou kvantifikaci je zapotřebí mít k dispozici správně zaostřený termogram, což však členitost snímaného objektu nemusí umožňovat v případě jednoho termogramu.

Řešením se jeví postup složení jednotlivých korektně zaostřených termogramů do termogramu finálního. Toto je prováděno automatizovaným algoritmem, který vybere z jednotlivých termogramů korektně zaostřené části a složí je do jednoho. Podmínkou je buď automatizované ostření kamerou (pro kombinaci objektivu s makropředsádkou či řízená změna vzdálenosti mezi snímaným objektem a kamerou pomocí motorizovaného stativu řízeného vyhodnocovacím software. Příklad složení termogramu je na obrázku 11.



Obrázek 11 – příklad složení termogramu z jednotlivých korektně zaostřených termogramů

Vzhledem k faktu, že se jedná o termogramy pořízené s určitým časovým postupem je potřeba vzít do úvahy případnou teplotní dynamiku scény, stejně tak je zapotřebí vzít tento fakt do úvahy při použití Fourierovy transformace.

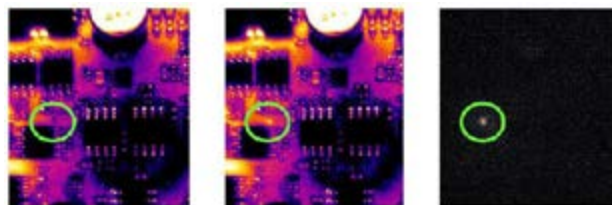
5. APLIKACE

Mikroskopické aplikace termografie zahrnují velké spektrum oblastí, ať se již jedná o elektroniku, biologii, medicínu, materiálový výzkum či další oblasti. V následujících podkapitolách jsou uvedeny příklady, nikoliv kompletní výčet aplikací.

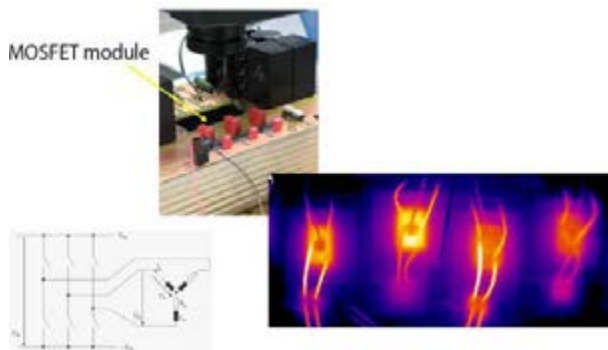
5.1. MIKROELEKTRONIKA MOSFET A NiCr ODPORY [1]

Při tomto experimentu jsou elektrické "zkratové proudy" selektivně injektovány do zkoušených sestav. To může vést ke zvýšeným tokům proudu ve vadných oblastech, což v některých případech vyvolává změny teploty, které lze zjistit pomocí termografie. Vzhledem k možnosti vyhodnocení diferenciálního obrazu v lze podezřelý bod přesně lokalizovat v reálném čase.

Například při aplikaci výkonových MOSFETů ve 3fázovém invertorovém provozu lze také velmi dobře zobrazit a monitorovat.



Obrázek 12 – zkrat na PCB, využití rozdílového termogramu, proudový pulz 300 mA



Obrázek 13 – MOSFET modul

S pomocí mikroskopických čoček s vysokým rozlišením $M=3\times$, je možné charakterizovat integrované pasivní komponenty na úrovni waferů. V následující aplikaci byly analyzovány nikl-chromové rezistory jako funkce jejich ztrátového výkonu.

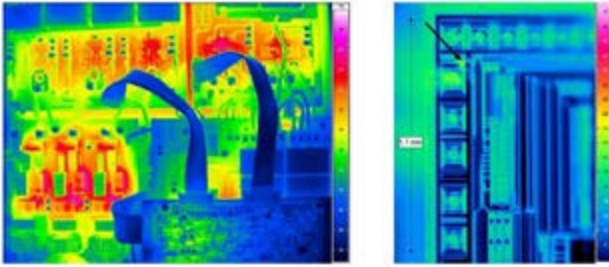


Obrázek 14 – NiCr rezistory na wafer, objektiv Mx3, detector 640×515 px, zorné pole zúženo

5.2. STŘÍDAČE [2]

Analýza elektronických součástek, je jednou z aktivit ISIT. Mimo jiné pro tyto aplikace využívá termokameru s NETD 20 mK která umožňuje bezpečnou identifikaci jakékoliv, i jen pouhého vznikajícího tepelného problému. Tak se lze v rané fázi vyhnout vývojovým selháním. Používáním detektoru s 640×512 IR pixely s roztečí 15 μm a vysoce výkonným 3× mikroskopickým objektivem lze dosáhnout geometrického rozlišení pouze 5 μm. Zároveň zorné pole zobrazuje plochu 3,2×2,6 mm², což je vhodné pro mnoho mikroelektronických aplikací. Další, snadno vyměnitelné objektivy s řadou ohniskových vzdáleností umožňují ISIT dále využívat flexibilitu jejich infračervené kamery v široké škále aplikací.

Následující příklad zobrazuje detekci závady na střídači.



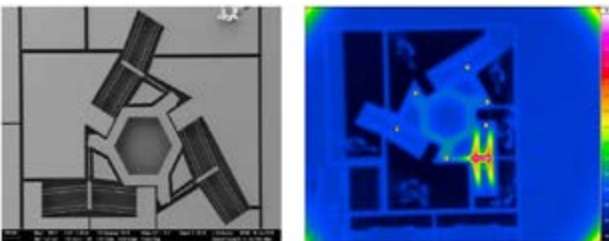
Obrázek 15 – závada AD převodníku na střídači

5.3. MEMS [3]

Mikroelektromechanické systémy (MEMS) nabízejí širokou škálu možných aplikací v oblasti nanotechnologií. Reálnými příklady jsou rozpoznávání polohy mobilních telefonů a použití v airbagezích, digitálních fotoaparátech nebo kardiostimulátorech. Jiné aplikace najdeme především v oblasti miniaturizovaných lékařských diagnostických přístrojích. Rostoucí nároky na miniaturizaci ovlivňují jak systémová řešení potřebná pro tyto, tak i pro senzory a ovládací prvky, které mají být vyvinuty.

Skupina mikrosystémů a biomedicínského inženýrství na Technické univerzitě Chemnitz pracuje na aktuátorech na bázi MEMS, které mají sloužit jako řídicí platforma pro nanokomponenty o velikosti pouze několik mikrometrů. Podobně jako u běžných elektromechanických polohovacích systémů se třemi stupni volnosti, je cílem umožnit vysokou přesnost horizontálního nebo vertikálního pohybu nanokomponent.

Prototypy akčních členů již byly vyvinuty v Chemnitz University of Technology a umožňují ovládání pohybu s přesností až $2 \mu\text{m}$ a $0,3^\circ$. Dosažení takové přesnosti vyžaduje přesnou analýzu parametrů materiálu na použitých pohonech. U termopohonů je nejdůležitější faktor co nejpřesnější měření teploty. Vzhledem k velmi malému rozměru a mechanickým vlastnostem objektů, je nutné využití těch nejsostiotovanějších termokamer a objektivů. Pro měření je využívána termokamera s rozlišením detektoru 1280×1024 IR pixelů a mikroskopický objektiv Mx8 pro dosažení rozlišení v μm rozsah (cca $1,3 \mu\text{m}$ / pixel) sočasně s širokým zorným polem pro zachycení periferních komponent pohonů.



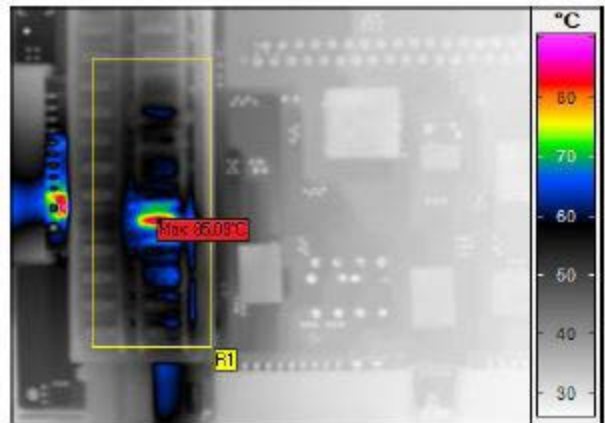
Obrázek 16 – MEMS, Mx8

5.4. PCB [4]

Jako jeden z největších dodavatelů automobilových komponentů na světě přikládá Delphi zásadní význam kvalitě svých produktů. Ve Wiehlu, kde se nachází laboratorní závod společnosti Delphi „Test & Validation Services“, se termografie

používá pro design a validaci produktu jako součást zajištění kvality. Tím je vytvořen stabilní hardwarový základ pro integraci nových technologií do motorových vozidel, které opět představují významný příspěvek k bezpečnosti provozu. Aby byly splněny vysoké nároky na hardware, např. pojistky, konektory a desky plošných spojů, Delphi pracuje s účinnými a přesnými termografickými testovacími postupy.

Na obrázku je vidět skrytý hotspot, který byl detekován pomocí termografie. Pro zvýšení spolehlivosti v provozu obvodová část byla revidována. Obrázek č. 2 ukazuje rozložení teploty pojistkové skříňky. Na základě výsledků tepelných testů nyní Delphi těží ze snížení doby vývoje, protože hardware je optimálně navržen již v prvním procesu návrhu. To opět vede k vysokým standardům kvality a zároveň optimalizaci nákladů.



Obrázek 17 – Fuse blok PCB, Mx5

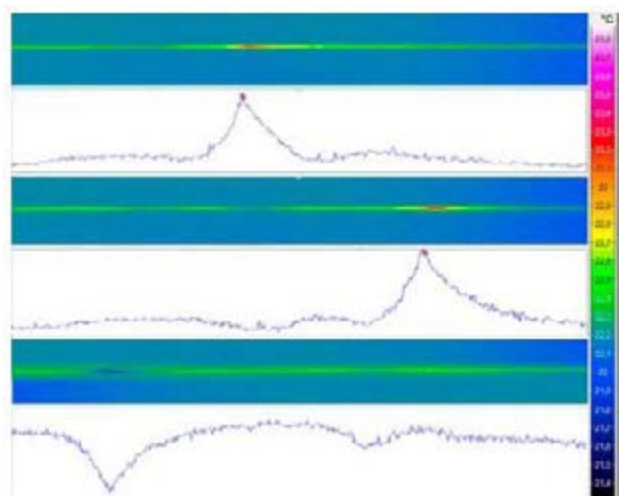
5.5. ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY MATERIÁLŮ [5]

V posledních několika desetiletích výzkumníci stále více pracovali na alternativních chladicích technologiích, které nepoužívají chladiva obsahující fluorované uhlovodíky. Technologie jako ferroelastické chlazení slibují vysokou účinnost, efektivnější využití zdrojů a snížení emisí skleníkových plynů. Tato forma chlazení využívá dráty z pseudoelastické slitiny s tvarovou pamětí na bázi nikl/titan (NiTi). Mechanické zatížení NiTi drátů způsobuje velké, reverzibilní deformace v důsledku namáháním indukované martenzitické transformace. Vzniká martenzitická struktura a tepelná energie je přenášena do okolí. Po odstranění zátěže se stresem indukovaná martenzitická struktura mění zpět na původní austenit. K tomu je třeba využít tepelnou energii z okolí.

Pro dosažení maximálního potenciálu úspor ferroelastického chlazení je nutné celý proces deformace optimálně regulovat. Výzkumníci chtějí nezávisle ovládat parametry, jako je frekvence nebo fázový posun mezi mechanickým namáháním a přenosem tepla. Navíc chtějí měřit výsledný chladicí výkon pro konkrétní materiál a konkrétní geometrii zařízení. Za tímto účelem vyvinuli pánové Seelecke a Schmidt platformu pro analýzu dat.

Termografická kamera je vybavena mikroskopickým objektivem Mx1 a detekuje drát, jehož průměr je pouze přibližně $150 \mu\text{m}$. Přesné termografické měření teploty geometrickým

rozlišením 15 μm . Tímto způsobem mohou vědci zpětně sledovat ferroelastické chlazení velmi přesně. Díky detektoru kamery (1 280×1 024) mohou vědci ze Saarbrückenu sledovat dlouhé části drobného drátu a zaznamenávat strukturální změny. Vysoká frekvence záznamu jim také umožňuje sledovat i krátkodobé změny teploty.



Obrázek 18 – NiTi 150 μm – Mx1

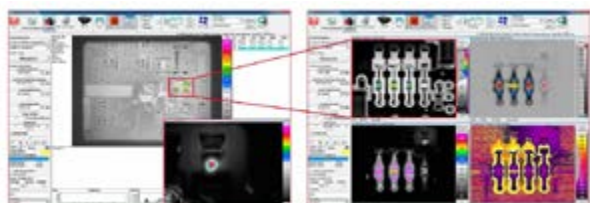
6. METODY AKTIVNÍ TERMOGRAFIE V S MIKROSKOPICKÝM ZOBRAZENÍM

Za metody aktivní termografie jsou považovány postupy, kdy je energie různých forem dodávána testovanému objektu ať již ve formě pulzu (PPT – pulse phase thermography) nebo ve formě periodicky se opakujícího signálu nebo energie, přičemž snímání je synchronizováno s tímto excitačním signálem (lock-in). detailnímu popisu metod se autoři věnovali I v jiných materiálech, případně moho připravit dedikovanou přednášku na toto téma.

Aktivní termografie jako taková se nezabývá primárně měřením absolutních teplot, ale zbrzování teplotních gradientů jako funkce extence externím zdrojem energie. Díky SW zpracování, ne možno zobrazit teplotní detaily v řádech jednotek mK až stovek μK (0,001–0,00010 $^{\circ}\text{C}$).

Tyto postupy jsou aplikovatelné i v oblasti mikroskopické termografie. Jeden z příkladů byl uveden již v kapitole 5.5.

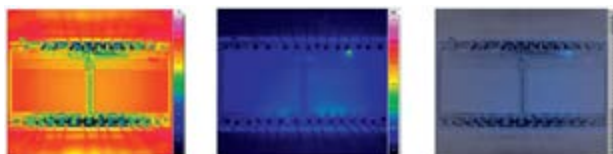
V případě Lock-In termografie je výsledek prezentován ve formě tzv. amplitudového, fázového a komplexního obrazu. Tato zobrazení detekují případné defekty či nehomogenity výrazně



Obrázek 19 – Lock-In – příklady zobrazení výsledku

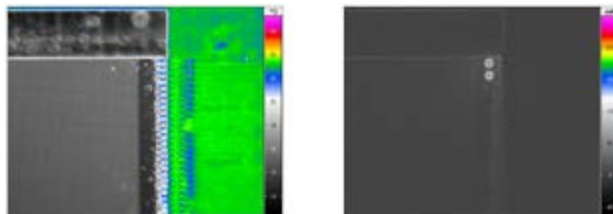
citlivěji, než klasické „pasivní“ termografické postupy. Příklad je možno vidět na obrázku 19.

Dalším příkladem může být následná ukázka na obrázku 20. Jedná se o mikročip, kde se defekt projevuje teplotním rozdílem cca 1 mK. Pro porovnání je jako výchozí ukázán klasický termogram bez excitace.



Obrázek 20 – mikročip, klasický termogram, amplitudový obraz a komplexní obraz

Obdobný příklad je uveden i na obrázku 21. Při klasickém zobrazení není defekt viditelný, nicméně metodami aktivní termografie je snadno lokalizovatelný.



Obrázek 21 – Lock in mikročip, detector 640×512 px, Mx1, velikost pixelu 15 μm

7. ZÁVĚR

Mikroskopické aplikace termografie nabízejí velmi široké pole využití, jak v oblasti výzkumu tak případných automatizovaných aplikací při výrobě. Jsou využitelné jak v režimu „pasivní termografie“ tak v oblasti termografie „aktivní“. Tento materiál neměl ambici být detailním a komplexním přehledem mikroskopických aplikací, ale náznakem možností této oblasti s popisem některých limitujících faktorů.

K této oblasti je zapotřebí přistupovat se znalostí problematiky konstrukce a vlastní jak termografických kamer, tak jejich optických systémů.

Autoři vycházeli při psaní tohoto materiálu jak ze svých vlastních praktických zkušeností, tak využili externí materiály o některých aplikacích. Nejlepším postupem je však vždy konzultace záměru a předpokládaných experimentů, případně praktické předvedení schopnosti uvažovaných systémů. Zkušenost autorů ukazuje, že někdy jsou deklarované vlastnosti, které nejsou reálné a vedou ke zklamání konečného uživatele či nemožnosti provádět určité experiment s dostatečnou vypočítací schopností.

ZDROJE:

- [1] Thermography on the Trail of the Fault, Brandenburg University of Technology Cottbus- Senftenberg (BTU); Institute for Electrical Systems & Energy Logistics, www.b-tu.de/fg-schaltungstechnik, prof. Dr. -Ing. Ralph Schacht

- [2] Fraunhofer Institute for Silicium Technology (ISIT), 25524 Itzehoe, www.isit.fraunhofer.de/, Mr. Sebastian Puls
- [3] Thermal Micro Actuators for Nanotechnologies, Chemnitz University of Technology, Professorship of Microsystems and Biomedical Engineering www.tu-chemnitz.de/etit/microsys/index.php, Dr. Sebastian Voigt

- [4] Thermography in Electronics Development, Delphi Deutschland GmbH Test & Validation Services, www.delphi.com
- [5] Nickel-titanium Wires in Tension Test, Saarland University, Zentrum für Mechatronik u. Automatisierungstechnik, www.zema.de
- [6] Interní materiály InfraTec, www.infratec.de
- [7] Interní materiály TMV SS, www.tmvss.cz

Článek prošel recenzním řízením.

Jak snadno zapříčinit poruchu strojního zařízení

How easy to cause machinery failure

ONDŘEJ ŠVEC DIS., CTD
TRIFOSERVIS S.R.O.

Příčin poruch strojních zařízení může být opravdu hodně. Tento článek má za cíl podrobněji rozebrat příčiny a následky poruch z tribologického hlediska. Bohužel tribologie je v řadě provozů stále opomíjenou disciplínou, a jak je známo ekonomické dopady mohou být v řadě případů fatální.

CO TRIBOLOGIE PŘINÁŠÍ?

Jak již bylo řečeno, tribologie přináší značný ekonomický význam pro všechny obory a aspekty průmyslových provozů. Z výzkumu a praxe se uvádí, že jeden vložený dolar do aplikace a vývoje tribologie přináší prospěch až 50 dolarů. Podle odborníků přináší nedodržení či úplná ignorace tribologie ztráty cca 5% ceny základních prostředků. Ve výsledku mohou jít ve velkých podnicích ztráty i do miliard.

SOUČASNÝ STAV V ČR

V České republice je informovanost o tribologii stále v plenkách. Co se týká laické veřejnosti, tak ta tomuto pojmu téměř v absolutní většině vůbec nerozumí. Bohužel trendy výuky na středních a vysokých školách technického zaměření až na výjimky tuto problematiku víceméně ignorují, či řeší pouze velmi okrajově. Také v řadě závodů byla funkce tribotechnika zcela zrušena a nákupy maziv zajišťují nekvalifikovaní zaměstnanci zásobování. Velkým problémem je také fakt, že velká část vedoucích pracovníků v údržbě o tribotechnice nemá dostatek informací. Některé podniky se alespoň snaží do vzdělávat své pracovníky na pozicích údržby a kontroly pomocí jednorázových specializovaných seminářů, což je určitě cesta, která by měla být pro všechny společnosti téměř povinností. Další pomocnou berličkou k celkové zlepšenému stavu této problematiky by měly být certifikace odborníků v oblasti tribodiagnostika. Zde platí přímá úměra, čím více certifikovaných tribodiagnostiků, tím větší zájem o rozvoj tohoto oboru i v naší republice.

CO NEJVÍCE ŠKODÍ PROVOZU?

Většina provozů začíná řešit tribologii až v momentě, když se něco přihodí. Bohužel v těchto případech bývá už pozdě a je zapotřebí zabezpečit tribologický management už při samotném výběru maziva a dodržovat ho až po výměnu maziva. Jaké jsou

největší nešvary mazivového hospodářství?

- **Neprovádíme vstupní kontrolu maziv!**
- **Neprovádíme provozní kontrolu maziv!**
- **Nakupujeme laciná a neověřená maziva!**
- **Neodborné zásahy do provozu a údržby!**
- **Nevhodné skladování maziv!**

CO ŠKODÍ NEJVÍCE?

Když už je mazivo v provozu, nejvíce škodí jednoznačně přítomnost vody a nečistot. Je zde ale i řada dalších aspektů, které je nutné sledovat. V případě, že budeme diagnostiku ignorovat, může dojít k haváriím za velmi nepříjemných ekonomických dopadů. Na obrázku níže je znázorněno celé spektrum negativních vlivů na mazivo.

Příklady z praxe

- V závodech se neprovádí vstupní kontrola. Pro mazání kulové dráhy se používá mazivo konzistence 1 nebo 2. Pod tímto označením bylo omylem dodáno mazivo konzistence 00. Ihned po aplikaci vytéká z ložiska a hrozí zde zadření a narušení tohoto zařízení. Vzniklá škoda pak jde do milionů korun.
- Nedokonalé skladování PM, hoboky jsou otevřené, ložiska elektromotoru se pak mažou mazivem plným abrazivních částic. Výsledkem je pak častá porucha ložisek až jejich celkový rozpad.
- Nečistoty v pohonných hmotách. Palivové nádrže nejsou čištěny, šetříme na palivových i vzduchových filtrech. ochází pak ke značnému opotřebení hlavně vstřikovacích elementů. U moderních vozidel vstřikování stojí okolo 100 000 Kč. Kromě nečistot používáme nekvalitní palivo od různých překupníků, dochází pak k rychlému opotřebení a zanesení celého motoru.
- Použití neproověřených a méně kvalitních motorových olejů. Dochází k rychlému stárnutí olejů za vzniku polymerních silně polárních produktů, které nám zalepují celý motor. Odstranění je velmi složité. Výplach a odstranění nás stojí mnoho peněz. Ušetří se na oleji několik tisíc korun, škody jdou do milionů.
- Mazání převodů ve vodní elektrárně Dlouhodobě se používal olej viskozitní třídy ISO VG 46. Pro tento olej bylo uzpůsobeno čerpadlo, filtr i potrubí. Po rekonstrukci převodovky konstruktér doporučil změnu oleje na vis-



Motorový olej:

- Do velkých motorů byl bez ověření zakoupený levný motorový olej
- Po krátkém provozu došlo ke tvorbě pryskyřičnatých měkkých kalů
- Olej byl poté vyměněn za kvalitní olej a docházelo k rozpouštění úsad
- Výsledek – Co nákup ušetřil, provoz několikanásobně zaplatil



Nevhodná péče o turbokompresor:

- Stala se porucha turbokompresoru
- Na vině byl olej a nedodržování tribotechnického managementu
- V oleji nalezeno velké množství nečistot, kalů a vody
- Zařízení bylo celkově zdevastováno
- Velmi významný ekonomický dopad neměla pouze škoda způsobená na zřízení, ale samotná odstávka

kozitu ISO VG 220. Opomněl, že zařízení pracuje při teplotách 300 °C ale také 100 °C. Při teplotě 100 °C olej ISO VG 220 má však viskozitu cca 2 200 mm².s⁻¹ a jak filtrem, tak potrubím již olej neproteče a převodovka se bez oleje velmi rychle zničí. Vznikne ztráta na zařízení a předně zařízení není v provozu a vzniká podniku denně ztráta cca 50 000 Kč. Než došlo k opravě zařízení, uběhlo 60 dní (3 mil.).

- Při uvádění turbogenerátoru do provozu nebylo provedeno odstranění konzervačního prostředku. Při zavedení nového turbínového oleje do provozu vznikne v ložisku vysoká teplota, olej se vyhřeje až na teplotu 1200 °C a celé zařízení se zalepí pryskyřicemi. Odstranění je velmi složité.
- U důlního kombajnu se používají hydraulické oleje viskozity 100 mm².s⁻¹ a 320 mm².s⁻¹. Oleje jsou v podobných sudech a není zde ani přesné označení plnicích beden. V průběhu provozu

dochází k doplňování oleji, které obsluha považuje za vhodné. Častá porucha je pak způsobena záměnou olejů, a tím značných poruch na zařízení. Jednoduché barevné označení sudů a dodržené doplnění předepsaným olejem vše jednoduše řeší. Předtím opravy stály několik tisíc korun.

ZÁVĚREM

Příklady z poslední kapitoly by bylo možné uvést stovky. Pro odstranění těchto nedostatků je opravdu nutné věnovat větší pozornost tribotechnice. Je potřeba pravidelně hodnotit jakost maziva v provozu. Následně když už víme v jakém stavu mazivo je, je potřeba včas aplikovat řešení navržená diagnostikem, jako je filtrace, doplnění oleje novým či včasná výměna.

Článek prošel recenzním řízením.



ŘÍZENÍ & ÚDRŽBA
průmyslového podniku

Přední technický časopis věnovaný otázkám
řízení a údržby průmyslových závodů.

on-line
i tištěná verze
ZDARMA

PRŮMYSLOVÁ ELEKTRONIKA AUTOMATIZAČNÍ PRVKY



Tisíce položek skladem



Rychlé doručení



Technická podpora



Nabídka do 1 minuty



Zakázková řešení



e-shop

papouch.com



TDS 101/57 ETH/RS

- Průmyslový displej
- Ethernet nebo RS485
- Elegantní provedení
- 4 nebo 6 znaků
- Mnoho funkcí
- IP68

PAPAGO

- Měřicí moduly
- Pt100, T, H, CO₂
- Digitální vstupy
- Ethernet, WiFi
- Napájení PoE



VARIO X

CONNECTED
FUTURE.



VARIO-X je vaším správným krokem do budoucnosti!

Agilní výroba, udržitelnost nebo Průmysl 4.0 – nic není problém díky 100% automatizaci bez řídicí skříně.

Představujeme vám náš flexibilní a modulární systém, který posouvá decentralizaci tím správným směrem a na zcela jinou úroveň.

Navštivte nás na veletrhu **Amper 2023** a seznámte se s naším jedinečným systémem VARIO-X.



21. - 23. 3. 2023

Výstaviště Brno

Hala P, stánek číslo 2.46

MURR
ELEKTRONIK

stay connected

www.murrelektronik.cz

