

MK ČR: 5 979

TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

2

ROČNÍK XXVIII

2019

ASOCIACE TECHNICKÝCH DIAGNOSTIKŮ ČESKÉ REPUBLIKY, z. s.

TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA V ČESKÉ PRAXI

Očekávaná skladba motorových paliv v roce 2030

Expected Composition of Motor Fuels in 2030

TD4

Způsoby a prostředky navýšení technických parametrů termografických radiometrických kamer s mikrobolometrickými detektory

Methods and Specifications to Increase the Technical Parameters of Thermographic Radiometric Cameras with Microbolometer Detectors

TD7

Diagnostika provozu parních turbín z vibračních signálů rotorových vibrací

Steam Turbine Operation Diagnostics from Rotor Vibration Signals

TD14

Amplifikační systém IRIS-M

Amplification System IRIS-M

TD18

Základy geodetických měření ve strojírenství

Basic of the Industrial Surveying

TD20

Asociace technických diagnostiků ČR, z.s.
Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

39. mezinárodní vědecká konference
39st International Scientific Conference



DIAGO® 2020



TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA STROJŮ A VÝROBNÍCH ZAŘÍZENÍ
Technical Diagnostics of Machines and Manufacturing Equipment

konference se koná pod záštitou
Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky

a pod patronací
prof. RNDr. Václava Snášela, CSc., rektora VŠB-TU Ostrava
prof. Ing. Ivo Hlavatého, Ph.D., děkana Fakulty strojní

28. - 29. ledna 2020
28. - 29. January 2020

Orea Resort Devět Skal *, Sněžné - Milovy**
Podrobnější informace a registrace na www.atdcr.cz



Zaměření konference :

Konference je zaměřena na měřicí metody, přístroje a systémy používané v údržbě k objektivnímu zajišťování technického stavu, na řešení systémů údržby, na provozní zkušenosti z údržby strojů a zařízení, na řešení problematiky provozní údržby.

Tématické okruhy :

- * technická diagnostika a provozní spolehlivost, monitorovací systémy technického stavu
- * teorie systémů údržby, informační a řídicí systémy údržby
- * tribotechnická diagnostika objektu a maziv
- * vibrační diagnostika a monitorování technického stavu, modální a strukturální analýza objektu
- * termodiagnostika, diagnostika elektrických točivých strojů
- * ustavování strojních systémů
- * nasazení a využití technické diagnostiky k zajištění jakosti chodu a jakosti nových výrobků, resp. oprav
- * praktické zkušenosti z nasazení technické diagnostiky, řešení problematiky údržby
- * vzdělávání v technické diagnostice a údržbě, certifikace způsobilosti osob

Hlavní partner :

Centrum **ENET** VŠB-TU Ostrava

prof. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D. - ředitel

Odborní garanti :

p. Ondřej Švec, DiS.
prof. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.
Ing. Vít Pavlík
Ing. Jiří Svoboda
Mgr. Marek Šeremeta

Vladislav Marek, TRIFOSERVIS, Čelákovice
FEI, VŠB-TU Ostrava
ČEZ, a.s., Elektrárna Pruněřov, Kadaň
„TMV SS“, spol. s r.o., Praha
LAMI KAPPA, spol. s r.o., Teplice

Mezinárodní programový výbor :

Dr.h.c. mult. prof. Ing. Juraj Sinay, DrSc.
prof. dr hab. inž. Zbigniew Matuszak
prof. Dr. Ing. Pavel Němeček
doc. Ing. Jozef Žarnovský, PhD.
doc. Ing. Juraj Grenčík, PhD.
prof. Ing. Hana Pačaiová, PhD.
Ing. Jan Hroch
Ing. František Vdoleček, CSc.
Ing. Ladislav Hrabec, Ph.D.
doc. Ing. František Helebrant, CSc.

SF, Technická univerzita v Košiciach, Košice, SR
děkan FM, Akademia Morska w Szczecinie, Polsko
proděkan FS, TU v Liberci, viceprezident ATD ČR, z.s.
proděkan TF, SPU v Nitre, SR
SJF, Žilinská univerzita v Žilíně, předseda SSÚ, SR
SF, TU v Košiciach, viceprezidentka ATD SR, Košice, SR
výkonný ředitel, Česká společnost pro údržbu, z.s., Praha
prezident ATD ČR, z.s., FSI, Vysoké učení technické v Brně
tajemník ATD ČR, z.s., FS, VŠB-TU Ostrava
FS, VŠB-TU Ostrava

Mediální partneři :

ŘÍZENÍ ÚDRŽBA
průmyslového podniku

tribotechnika

AUTOMA
časopis pro automatizační techniku



ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

ATD ČR

Vážení čtenáři, ti pravidelní i občasní,

opět máte před sebou s půlroční pravidelností další číslo našeho časopisu Technická diagnostika. Vlastně se již stává jistým pravidlem, že jedno číslo v kalendářním roce je monotematické, zatímco to druhé je jakýmsi průřezem několika disciplínami technické diagnostiky. Někteří z Vás si možná pamatují, že minulé vydání bylo věnováno tribodiagnostice, v tomto naleznete články hned z několika oborů technické diagnostiky.

Dnes, kdy listujete našim časopisem a čtete tyto řádky, pomalu končí rok 2019. V jeho průběhu se uskutečnila celá řada akcí, konferencí, seminářů a setkání, které se konaly pod hlavičkou ATD ČR, z. s., nebo některé z jejích odborných skupin. Pokud jste členy našeho spolku či alespoň jeho dlouholetými příznivci, pravděpodobně jste se alespoň některé z akcí osobně zúčastnili. Většinou se jedná o tradiční setkání, která mají za ta léta své pevné místo v kalendáři.

Z toho, co se podařilo a čím se již pochlubili kolegové z oboru tribo v minulém čísle časopisu, si ale dovolím znovu připomenout proškolení a certifikaci skupiny odborníků na tribodiagnostiku ze Srbska. Tím se významná položka naší činnosti – certifikace osob v oboru „technik diagnostik“, kterou realizujeme v úzké spolupráci s ACM DTO Ostrava – rozšiřuje v rámci zahraničních aktivit i směrem na jih; severně, konkrétně v Pobaltí, působí již řadu let aktivity skupiny Vibro. Mimo jiné je to další z důkazů o tom, co i zde zaznívá opakovaně, a sice že těžiště činnosti našeho spolku je v jeho pěti odborných skupinách.

Když už jsem vzpomněl blížíci se přelom kalendářních roků, dovoluji si všechny příznivce technické diagnostiky a údržby i další zájemce pozvat na 39. mezinárodní konferenci Diago® 2020, která se koná 28. a 29. ledna 2020 v hotelu Orea Resort Devět Skal*** Sněžné-Milovy. Po delších diskusích jsme se nakonec rozhodli i pro tento ročník místo konání zachovat. V předvečer této tradiční akce se také uskuteční společné profesní setkání oboru „specialista vibrační diagnostiky“ a oboru „technik diagnostik montážních a optických měření“. Bližší informace, předběžný program a přihlášky naleznete samozřejmě na našich internetových stránkách. Všechny členy ATD ČR, z. s., si pak dovolím v této souvislosti upozornit, že členská schůze, která se v rámci konference koná vždy, bude tentokrát výroční a volební. Budeme volit vedení spolku na další tři roky, takže Vaše hojná účast je velmi nutná.

A zcela závěrem mi dovoluji popřát Vám všem do nadcházejícího roku 2020 hodně zdraví, štěstí, pohody a úspěchů v osobním i pracovním životě.

S pozdravem

*Ing. František Vdoleček, CSc.
prezident ATD ČR, z. s.*

ŠÉFREDAKTOR:
ZÁSTUPCE ŠÉFREDAKTORA:
GRAFICKÁ ÚPRAVA:
REDAKČNÍ RADA:

ING. DANIEL ZUTH, PH.D.
ING. LADISLAV HRABEC, PH.D.
JIRÍ RATAJ
DR HAB. INŽ. WITOLD BIALY
ING. MARTIN HOLEK, PH.D.
PROF. ING. VÁCLAV LEGÁT, DRSC.
DOC. ING. VIERA PEŤKOVÁ, PHD.
ING. FRANTIŠEK VDOLÉČEK, CSC.

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

ING. DANIEL ZUTH, PH.D.
ING. LADISLAV HRABEC, PH.D.
JIRÍ RATAJ
DR HAB. INŽ. WITOLD BIALY
ING. MARTIN HOLEK, PH.D.
PROF. ING. VÁCLAV LEGÁT, DRSC.
DOC. ING. VIERA PEŤKOVÁ, PHD.
ING. FRANTIŠEK VDOLÉČEK, CSC.

VYDAVATEL:

ASOCIACE TECHNICKÝCH
DIAGNOSTIKŮ ČR, Z. S.
VŠB-TU OSTRAVA
17. LISTOPADU 15 / 2172
708 33 OSTRAVA - PORUBA

PUBLISHER:

ASOCIACE TECHNICKÝCH
DIAGNOSTIKŮ ČR, Z. S.
VŠB-TU OSTRAVA
17. LISTOPADU 15 / 2172
708 33 OSTRAVA - PORUBA

VYCHÁZÍ:

MK ČR:

ISSN:

2× ROČNĚ

5 979

1210-311X

VYCHÁZÍ:

MK ČR:

ISSN:

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.

Očekávaná skladba motorových paliv v roce 2030

Expected Composition of Motor Fuels in 2030

MILAN POSPÍŠIL, IVAN SOUČEK
VŠCHT PRAHA

Anotace:

Článek se zabývá předpokladem používání motorových paliv v blízké budoucnosti. Se zohledněním legislativních požadavků se předpokládá omezení produkce škodlivých látek především v osobní silniční dopravě. VŠCHT byl vytvořen v prostředí MS Excel jednoduchý lineární výpočetní model TRANLINEX, který pro jednotlivé roky umožňuje na základě vstupních údajů předvídat pravděpodobnou skladbu používaných paliv.

Annotation

The article deals with the assumption of the use of motor fuels in the near future. Taking into account legislative requirements, it is envisaged to limit the production of harmful substances mainly in passenger road transport. VŠCHT created in the MS Excel environment Simple linear computational model TRANLINEX, which allows for individual years based on input data to predict the probable composition of fuels in use.

Skladba motorových paliv v zemích EU musí reagovat na následující hlavní podněty:

- splnění ukazatele úspory emisí (již v roce 2020 6 % a očekávání vyplývající z pařížské konference v roce 2030);
- zajištění podílu obnovitelných složek v motorových palivech dle RED II (v roce 2020 10 % e. o., v roce 2030 14 % e. o.);
- vývoj poptávky po jednotlivých druzích motorových paliv (mj. očekávaná elektrifikace) a skladba vozového parku.

Odhadu vývoje se věnuje řada globálních firem, např. společnost Shell připravila v posledním období několik scénářů „Mountains“, „Seas“ a „Sky“. Scénáře vycházejí ze 3 základních východisek: poptávka po energiích prudce stoupá, dodávka energií se bude snažit držet krok, klimatické změny jsou naléhavou realitou. Scénář „Sky“ se zabývá vývojem spotřeby jednotlivých druhů paliv v souvislosti s vývojem vozového parku ve světě. Vychází rovněž z předchozích scénářů a dalších analýz plynoucích z cesty k dosažení cílů dle pařížské dohody, což se týká zejména vývoje požadavku na snížení emisí v EU a spotřeby energie do roku 2070. Konstatuje, že jednoduché pokračování současného vývoje je nedostatečné.

Hlavní výzvy, na které reaguje scénář „Sky“:

- K růstu poptávky po energii přispěje růst populace, rozvoj, nové energetické služby a rozšířené využívání těch stávajících. Růst energetické poptávky může být potenciálně zpomalen rychlým zvýšením efektivity, ale efektivita má tendenci snižovat náklady na energetické služby, což vede ke zvyšování spotřeby u jednotlivých spotřebitelů.
- Skutečnou realitou počátku 21. století je nejasná cesta vzestupu rozvíjející se ekonomiky, která nezahrnuje spotřebu uhlí. Uhlí je relativně snadným zdrojem, který lze využít,

a nabízí mnoho, včetně elektřiny, topení, zdroje pro výrobu chemikálií, a co je nejdůležitější, umožňuje i výrobu železa. Zůstává významným energetickým zdrojem.

- Některé progresivní regiony možná budou muset považovat čisté nulové emise za cíl pro 50. léta 21. století; částečně je to proto, aby vyvážily země, které se dostanou do tohoto bodu mnohem později. Čisté nulové emise jsou však téměř v každé průmyslové ekonomice obtížně dosažitelné z důvodu současného nedostatku nízkouhlíkových náhražek např. pro leteckou, lodní, silniční či nákladní dopravu, pro výrobu cementu, některé chemické procesy nebo výrobu skla. Paliva s vysokým energetickým účinkem budou stále nezbytná.
- Větrná a solární energie může rychle růst, ale vyrábí elektřinu, která dnes představuje méně než 20 % konečné spotřeby energie. Významný krok k dekarbonizaci a vyšší efektivity vyžaduje hlubokou elektrifikaci ekonomiky, ale elektrifikace byla pomalá a její podíl na trhu v současné době roste pouze o dva procentní body za desetiletí; tyto body by ale bylo nutné ztrojnásobit.

- Některé slibné nízkouhlíkové technologie jsou v současné době zmrzeny, přičemž nejvýznamnějším příkladem je vodík. Pokrok v technologii biopaliv či zachycování a ukládání uhlíku (CCS) byl také pomalejší, než se původně předpokládalo.

Scénář „Sky“ předpokládá, že cesta k čistým emisím bude do roku 2070 zahrnovat změnu na všech úrovních ekonomiky a energetického systému. Jedním z nejdůležitějších trendů je elektrifikace – rostoucí náhrada za přímé využívání fosilních paliv (např. benzín pro mobilitu) elektřinou.

Scénář „Sky“ k roku 2070 předpokládá, že:

- elektřina bude přesahovat 50 % konečné spotřeby při pětinásobném zvýšení v porovnání s rokem 2017;
- fosilní paliva budou omezena pro výrobu elektřiny a bude dominovat solární energie;
- výroba biomasy se bude více prosazovat společně s technologiemi CCS k využití CO₂.

Scénář „Sky“ kvantifikuje bilanci jednotlivých druhů energie následovně:

- globální spotřeba energie stoupne z 220 EJ/rok v roce 1980 na 400 EJ/rok v roce 2020, aby se stabilizovala v letech 2070–2100 na úrovni 520–650 EJ/rok;
- podíl elektřiny stoupne na více než 50 % v období 2070–2100;
- podíl kapalných paliv postupně klesne ze 100 EJ/rok v roce 1980 při nárůstu na cca 180 EJ/rok v roce 2020 s poklesem na 50 EJ/rok od roku 2070 s dalším postupným poklesem na celkovém podílu spotřeby energie;
- podíl zemního plynu bude postupně klesat na 50 EJ/rok od roku 2070;
- podíl biopaliv bude nadále růst s celkovou spotřebou cca 50 EJ/rok po roce 2070;

Tabulka 1: Spotřeba energií v EU v jednotlivých sektorech a dle druhů paliva v osobní a nákladní dopravě

Celková spotřeba energií v jednotlivých sektorech (v EJ)	1980	1990	2000	2010	2015	2020	2030	2040	2050	2060	2070
těžký průmysl	9,64	9,17	8,52	7,48	6,97	6,76	6,18	5,62	4,99	4,50	4,04
zemědělství a ostatní průmysl	11,75	8,80	6,93	6,05	5,49	5,38	5,26	5,10	4,84	4,57	4,34
služby	4,69	4,84	5,36	6,96	6,49	6,63	6,89	7,32	7,69	7,55	7,29
osobní doprava - lodní	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05
osobní doprava - železniční	0,24	0,26	0,29	0,25	0,23	0,22	0,19	0,18	0,18	0,17	0,16
osobní doprava - silniční	5,58	6,86	7,76	8,05	7,74	7,76	5,71	4,43	3,56	3,48	3,37
osobní doprava - letecká	0,83	1,10	1,60	1,77	1,86	1,90	2,06	2,50	2,84	3,22	3,44
nákladní doprava - lodní	0,33	0,29	0,30	0,28	0,22	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
nákladní doprava - železniční	0,29	0,16	0,13	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10
nákladní doprava - silniční	2,31	3,66	4,53	5,14	5,28	5,54	5,69	5,84	6,00	6,22	6,29
nákladní doprava - letecká	0,17	0,24	0,39	0,39	0,41	0,45	0,44	0,48	0,52	0,56	0,60
osobní spotřeba: teplo, vaření	9,95	10,94	11,20	12,08	10,34	10,29	9,17	8,36	7,56	6,92	6,34
osobní spotřeba: světlo, zařízení	0,97	1,30	1,68	2,08	2,08	2,14	2,60	2,80	2,70	2,53	2,22
neenergetické využití	3,95	4,35	4,87	4,67	4,24	4,40	4,44	4,61	4,72	4,83	4,90
celkem	50,78	52,04	53,62	55,38	51,51	51,84	49,00	47,58	45,92	44,88	43,30
Spotřeba energií v osobní dopravě (v EJ)											
Kapalná uhlovodíková paliva	1,81	2,35	2,76	3,10	3,07	3,07	2,47	1,53	0,46	0,32	0,24
Plynná uhlovodíková paliva	0,03	0,05	0,06	0,11	0,13	0,11	0,13	0,21	0,04	0,02	0,02
Elektrina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07	0,84	2,18	3,88	4,15	4,14
Vodík	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,13	0,21	0,30
Spotřeba energií v nákladní dopravě (v EJ)											
Kapalná uhlovodíková paliva	0,57	0,99	1,35	1,65	1,75	1,90	1,97	1,95	1,63	1,13	0,80
Plynná uhlovodíková paliva	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02
Elektrina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,29	0,71	1,30	1,64
Vodík	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,07	0,17	0,28	0,38

- podobně naroste podíl vodíku s širším uplatněním po roce 2050;
- uplatnění uhlí a biomasy zůstane neměnné, ale při významném nárůstu spotřeby energie bude jejich podíl postupně klesat. Scénář následně implikuje vývoj veškeré energetické spotřeby se zaměřením na sektor dopravy a na postupnou změnu vozového parku v jednotlivých regionech světa. Pro názornost uvádíme v tab. 1 předpokládaný vývoj v Evropě.

Podobně jako v globálním měřítku jsou i v některých zemích EU vyvíjeny aktivity na zajištění národních závazků a vytvoření odpovídajícího podnikatelského prostředí, resp. podmínek pro jeho fungování, aby byly tyto cíle naplněny. V ČR je v současné době v řešení projekt, jehož výstupem je zpracování modelu předpokládané skladby motorových paliv v ČR v roce 2030. Projektu se účastní řada významných institucí (v čele s VŠCHT) a dílčími výstupy jsou zejména:

- databáze obnovitelných surovin v ČR;
 - databáze technologií pro výrobu obnovitelných paliv;
 - databáze produktů / obnovitelných paliv;
 - databáze pohonů.
- Pro účely výpočtu náhrady obnovitelných zdrojů energie (OZE) a úspory emisí skleníkových plynů (GHG) v sektoru dopravy v ČR jsou respektovány následující požadavky:
- zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší;
 - nařízení vlády č. 351/2012 Sb., o kritériích udržitelnosti biopaliv;
 - směrnice Evropského parlamentu a Rady Evropy 2018/2001/ES o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů (RED II);

- metodický pokyn OOO MŽP pro osoby autorizované k certifikaci procesu výrobního řetězce udržitelných biopaliv a ověřování zprávy o emisích u dodavatelů pohonných hmot podle § 32 odst. 1 písm. g) zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší.

VŠCHT byl vytvořen v prostředí MS Excel jednoduchý lineární výpočetní model TRANLINEX, který umožňuje pro jednotlivé roky výpočet na základě následujících vstupních údajů:

1. celkové přepravní výkony v osobní (mil. osobokilometrů) a v nákladní dopravě (mil. tunokilometrů) na území ČR se zastoupením silniční, železniční, MHD, lodní a letecké dopravy;
2. relativní podíl jednotlivých druhů motorových paliv (%) potřebných na pokrytí předpokládaných přepravních výkonů (viz 1) – benzín, motorová nafta, letecký petrolej (JET), LPG, zemní plyn / metan (NG), vodík a el. energie;
3. různé druhy benzínu a motorové nafty v distribuci ČR (např. E5, E10, E85, B7, B30, B100);
4. složení, resp. zastoupení fosilní části a složek na bázi OZE (% obj.) v pohonných hmotách distribuovaných na trh v ČR;
5. výhřevnost (MJ/kg, MJ/l, MJ/m³) a hustota (kg/m³) motorových paliv a jejich složek;
6. GHG emisních faktorů (g CO₂/MJ) pro složky OZE, fosilní paliva a elektrickou energii a multiplikátorů pro výpočet OZE dle směrnice RED II;
7. množství suroviny OZE potřebné pro výrobu finálního produktu – pohonné hmoty nebo jejich složky ($t_{\text{suroviny}} / t_{\text{produktu}}$);
8. velkoobchodní ceny pohonných hmot nebo jejich složek (CZK/MJ) a sazby spotřební daně (CZK/l).

TRANLINEX pro jednotlivé roky umožňuje vypočítat a v přehledných tabulkách sumarizovat:

1. celkovou spotřebu energie (TJ) v dopravě se zahrnutím i bez zahrnutí bonifikací pro pokročilá biopaliva a elektrickou energii v silniční a železniční dopravě (dle legislativy EU – RED II);
2. předpokládanou spotřebu (TJ, kt, mil. l, mil. m³, GWh) jednotlivých druhů kapalných (E0, E5, E10, E20, E85, BA98/100, B0, B7, B10, B20, E85, B30, B100) a plyných paliv a el. energie pro železniční a silniční dopravu s různým podílem složek OZE 1. generace a pokročilých biopaliv;
3. výpočet celkové náhrady OZE, včetně příspěvků pro jednotlivé druhy pohonných hmot a elektřiny, výpočet náhrady OZE 1. generace a náhrady OZE připadající na tzv. vyspělá paliva (tab. IXa a IXb směrnice RED II);
4. výpočet průměrného GHG emisního faktoru (g CO₂/MJ) pro jednotlivé druhy pohonných hmot na základě obsahu konkrétní komponenty OZE;
5. výpočet celkové úspory GHG plynů, včetně dílčích příspěvků připadajících na jednotlivé druhy kapalných a plyných pohonných hmot a na elektřinu;
6. spotřebu (TJ, kt, mil. l, mil. m³) jednotlivých kapalných a plyných složek OZE;
7. spotřebu surovin (kt) potřebných pro výrobu jednotlivých kapalných a plyných složek OZE;
8. odhad počtu vozidel (kontrolní počet vozidel) potřebných pro zajištění přepravních výkonů v kategoriích OA, NA + LUV, BUS s rozlišením na spalující kapalná a plyná paliva nebo poháněná el. energií (BEV, HYBRID);
9. odhad prodejní ceny pohonných hmot a daňových výnosů z jejich prodeje a spotřeby (SD, DPH).

Vstup a výstup dat do/z lineárního modelu je realizován formou unifikovaného datového sloupce, který umožňuje jednoduchý import a export, např. za účelem tvorby časových řad nebo pro porovnání modelových dopadů různých změn ve složení a množství pohonných hmot, případně i ke kontrole korelace výstupů modelu se skutečností, viz příklad výstupů modelu pro rok 2017 v tabulce 2.

Jaká by měla být odezva rafinérského průmyslu na očekávaný vývoj v EU

S využitím očekávaných scénářů by měly být aktualizovány strategie rafinérských společností, které by si měly uvědomit následující aspekty:

- vliv elektrifikace sníží absolutní poptávku po plyných a kapalných palivech;
- vliv požadavku na vyšší obsah obnovitelných zdrojů sníží absolutní spotřebu kapalných a plyných minerálních paliv (tj. paliv vyráběných na bázi ropy);
- struktura změny vozového parku ovlivní strukturu spotřeby jednotlivých druhů motorových paliv: rychlejší nástup elektrifikace osobních vozů významněji sníží poptávku po automobilových benzínech, zatímco pozdější nástup elektrifikace a plynofikace nákladního vozového parku ze střednědobého hlediska zachová významnou poptávku po motorové naftě;
- tlak na snižování emisí způsobí další racionalizaci motorů a ovlivní pokles poptávky po motorových palivech.

Tyto závěry vycházející z předložených scénářů by měly být zohledněny v obchodních a investičních plánech s následujícími výstupy:

- distribuční síť motorových paliv se bude dále rozšiřovat tak, aby se umožnilo poskytování standardních služeb i pro vozidla s elektropohonem či na plyný pohon; bude tak s výhodou nadále využívána vybudovaná infrastruktura sítě čerpacích stanic a posílen obrat „suchého zboží“ v prodejné čerpacích stanic; usnadněním přístupu k alternativnímu „palivu“ však bude rychleji kanibalizována vlastní tradiční spotřeba motorových paliv;
- existující rafinérské provozy se budou dále optimalizovat tak, aby došlo k co nejefektivnější výrobě motorových paliv, která dokážou lépe konkurovat alternativním palivům;
- rozvojové plány by měly být zaměřeny na takové výrobky, které budou perspektivní z dlouhodobějšího hlediska; dojde k posílení možností substitucí motorových paliv na ropné bázi a alternativního využití polotovarů nezbytných pro jejich výrobu, např. pro navazující petrochemické zpracování; dojde k revizi dalšího extenzivního rozvoje výroby

Tabulka 2: Celková spotřeba energie v dopravě obchodovaná v ČR v roce 2017 pro účely výpočtu OZE (TJ)

NM			TJ	192 322
BA			TJ	66 317
JET			TJ	0
LPG			TJ	0
CNG			TJ	2 101
LNG			TJ	0
H2			TJ	0
EL.EN.DRÁŽNÍ			TJ	7 401
EL.EN.SILNIČNÍ			TJ	40
EL.EN.OSTATNÍ			TJ	0
CELKEM SPOTŘEBA ENERGIE (pouze kategorie dopravy zahrnované do výpočtu OZE)			TJ	268 179
CELKEM NÁHRADA OZE			%	5,5%

automobilového benzínu a složek nezbytných pro jeho produkci, příp. formulaci; dojde k posílení akcentu na udržitelný rozvoj výroby motorové nafty (přestože lze očekávat významné snížení její spotřeby pro osobní dopravu);

- rafinérské společnosti se budou propojovat s plynárenskými s možností efektivního zajištění distribuce LNG;
- rafinérské společnosti budou vytvářet aliance s výrobci alternativních paliv s výhodou jejich uplatnění pro výrobu

motorových paliv na existujícím zařízení rafinérií, případně v distribučních skladech.

Recenzent

Švec Ondřej, DiS., Trifoservis Vladislav Marek, Čelákovice; osoba certifikovaná na funkci Technik diagnostik tribodiagnostik – Kategorie II

Způsoby a prostředky navýšení technických parametrů termografických radiometrických kamer s mikrobolometrickými detektory

Methods and Specifications to Increase the Technical Parameters of Thermographic Radiometric Cameras with Microbolometer Detectors

VÁCLAV STRAKA, PAVEL PETRÁŇ

TMV SS

Anotace

Infračervené termografické kamery (termokamery) jsou nejen v oblasti údržby, ve stavebnictví nebo v technologiích průmyslu, ale také ve zdravotnictví, biomedicině, výzkumu a vývoji koncipovány tak, aby splňovaly požadavky a nároky na přesnost měření, tedy i kvalitu obrazu. Tento parametr závisí na mnoha aspektech i na vybavení termokamery. Patří sem nejen celá optická část systému na straně hardwaru, ale rovněž vhodný a výkonný firmware (software kamery), který veškerá data zpracovává a prezentuje uživateli jako výslednou hledanou a očekávanou hodnotu. Rozhodovací proces stanovený na základě získaných hodnot se pak musí opírat o informace, které termokamera poskytne uživateli, jen do té míry, kdy disponuje moderními technologiemi pro zvyšování kvality termogramu.

Annotation

Infrared thermographic cameras (IR cameras) are conceived not only for applications of predictive maintenance, building or industry technologies, but also for healthcare, biomedicine, research and development in accordance to fulfill requests and demands for measurement accuracy, so also for image quality. This parameter depends on many aspects and camera equipment. Here belongs not only the whole optical part of the hardware side of the system, but also suitable and powerful firmware (camera software), which all data analyze and presents to end-user as a final wanted and expected value. Decision process determined by acquired values is must to be based on just to the extend information, which camera has as a modern technology of thermogram quality enhancement.

1. Úvod

Termografické kamery jsou dnes již běžným, uznávaným a velice potřebným nástrojem pro určení stavu měřených objektů a k vytvoření postupů pro správné řízení údržby a predikci potenciálních závad. Pro různé aplikace je nutné vždy zvažovat minimální požadavky na parametry kamery, tak aby byl účel

vlastního měření naplněn a výsledek měl požadovanou vypočítávací hodnotu. V této oblasti nabízejí špičkoví výrobci stále dokonalejší výrobky a některé jejich parametry již dávno překonaly hodnoty, které byly v minulosti považovány za hraniční.

Termokamery jsou obvykle charakterizovány technickou specifikací s parametry, které uživatel srovnává mezi jednotlivými modely či porovnává s požadavky na systém kladenými jeho aplikací. V některých případech je však bez hlubší znalosti problematiky obtížnější jednotlivým parametrům porozumět, případně odvodit, zdali je uváděný parametr relevantní, případně odpovídající jeho aplikaci.

Mezi nečastější porovnávané parametry patří obvykle ty následující:

- velikost detektoru / počet pixelů;
- IFOV a optické vlastnosti objektivu;
- NETD – šum detektoru;
- rychlost záznamu;
- možnosti prolínání termogramu s reálným/viditelným obrazem;
- schopnost zobrazení detailu u mikroskopických aplikací.

Poměrně často se stává, že zájemce z řad laické veřejnosti porovnává pouze číselné parametry bez možnosti domyslet důsledky a dopady těchto parametrů či fyzikálních omezení k nim vztahených. V následujících bodech je popsáno, jak takovým parametrům rozumět a kdy je možno považovat je za reálné.

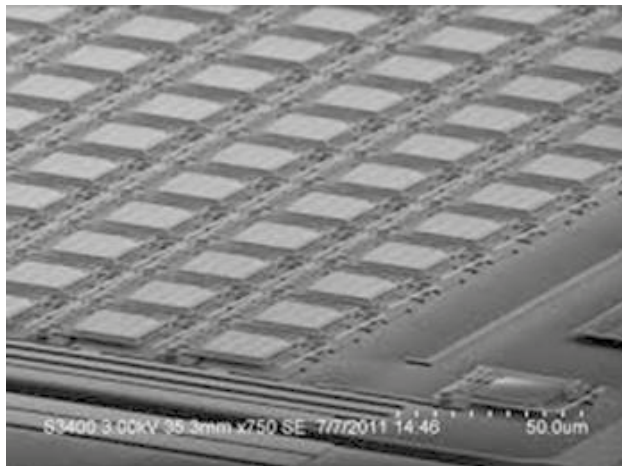
2. Velikost detektoru / počet pixelů

Rozlišení detektoru, případně termogramu, bývá jedním z prvních parametrů kamery, které jsou sledovány. Číslo obvykle udává rozměr detektoru (počet pixelů) ve vodorovné a svislé ose, což je obvykle označováno jako $H \times V$. Zatímco před nedávnou dobou bylo rozlišení detektoru 320×240 pixelů považováno za doménu „high-end“ termokamer, dnes jsou u kvantitativních systémů běžně používány mikrobolometry o rozměrech 1024×768 pixelů, přičemž rozlišení detektoru 640×480 se stalo standardem střední třídy kvantitativních termokamer.

Dalším klíčovým parametrem je tzv. pixel pitch nebo detektor pitch. Obvykle se jedná o hodnotu uváděnou v μm (40, 25,

17, 10 μm atd.) a velká část uživatelů tento údaj mylně považuje za fyzickou velikost hrany jednoho pixelu detektoru. Ve skutečnosti se jedná o vzdálenost středů jednotlivých pixelů. Toto je potřeba rozlišovat, neboť fyzická velikost pixelu (a tím i spotřeba systému, jeho rychlost, ale i citlivost) se z velké části odvíjí právě od fyzické velikosti pixelu.

Jak je možno vidět na následujícím obrázku, vlastní velikost strany pixelu není rovna údaji o rozteči středů pixelů. Ve výsledném termogramu je vykreslen rast, který zobrazuje nasnímané teplotní pole bez mezer, hodnoty pro jednotlivé zobrazené pixely jsou dopočteny (úmyslně se pro zjednodušení nezabýváme metodami dopočtů hodnot mezi jednotlivými pixely, případně překlenutí nefunkčních pixelů předpokládanými hodnotami či eliminací interakcí mezi sousedními pixely). Výsledný termogram tedy zobrazuje údaje dopočtené i pro okrajové části nepokryté vlastním bolometrem tak, aby se termogram tvářil pokud možno bez mezer mezi jednotlivými pixely termogramu.



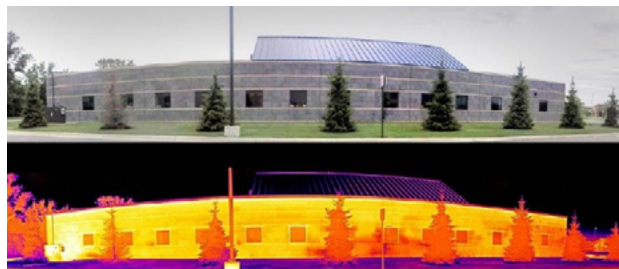
Obrázek 1: Zvětšené zobrazení mikrobolometru, zdroj Ino.ca [7]

Obvykle byl termogram zobrazován v rozlišení, v jakém byl nasnímán, avšak postupem doby začali jednotliví výrobci nabízet způsoby, jak rozlišení výsledného termogramu navýšit. Je potřeba se v tomto případě zaměřit na způsob, jakým bylo navýšení rozlišení výsledného termogramu dosaženo, a na to, zda takovéto navýšení vypovídá o skutečnosti či se jedná pouze o kosmetický zásah:

a) Zvýšení rozlišení na základě spojení různých snímaných scén – „Panorama“

Postup založený na vytvoření panoramatického termogramu, tzn. spojení většího počtu jednotlivě nasnímaných termogramů v jeden celistvý termogram, ať již na základě manuálního spojení více termogramů, či automatizovaným procesem, viz následující příklad.

Obdobný postup je použit například při snímání rovnoměrně pohybujícího se objektu. V tomto případě je třeba vzít v potaz časovou konstantu mikrobolometru a rychlost pohybu snímaného objektu. Typickým příkladem může být pohybující se pás či produkt na něm.

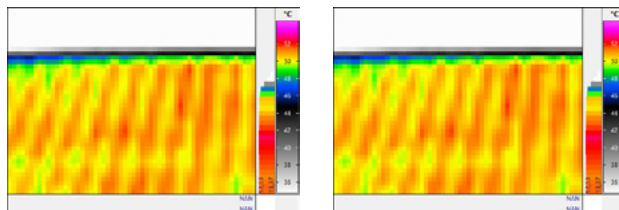
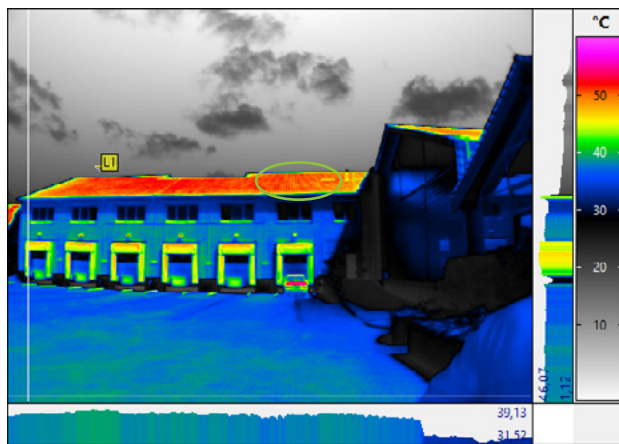


Obrázek 2: Panoramatický termogram složený ze 30 termogramů 320 x 240 pixelů, zdroj North Coast Industrial Imaging [6]

Metodu lze považovat za spolehlivou při dodržení okrajových podmínek (rychlost objektu či detektoru, nepříliš velká časová vzdálenost mezi pořízením jednotlivých termogramů). Umožňuje současné zobrazení rozměrných scén a jejich detailní analýzu, neboť pro pořízení můžeme použít objektivu/systému s příznivější hodnotou IFOV a tím detailnější i přesněji teplotně kvantifikované oblasti.

b) Interpolace naměřených hodnot

Nejjednodušší metodou navýšení rozlišení je interpolace hodnot z okolních pixelů. Jedná se o metodu poměrně nenáročnou na výpočetní výkon a je možno ji snadno implementovat přímo do infračervených kamer (používá se pro skrytí nefunkčních pixelů detektoru a dopočtení údaje pro tento virtuální pixel). Druhou cestou je interpolace ve vyhodnocovacím softwaru, včetně případné aplikace obrazových filtrů. Příkladem může být sekvence obrázků 3 a, b, c.



Obrázek 3: Detail matematické interpolace termogramu; a) výchozí termogram, b) detail bez interpolace, c) detail po aplikaci interpolace, zdroj autor [4]

Obecně je tento postup možno hodnotit pouze jako prostředek optického vylepšení, nikoli však jako prostředek vylepšující vypovídající schopnost termogramu.

c) Metody založené na náhodném třesu kamery

Jedná se o postup, který je založen na skutečnosti, že téměř nikdo, kdo drží termokameru v ruce, není schopen ji udržet ve zcela identické poloze. Termokamera v tomto okamžiku nasnímá menší množství termogramů v krátkém sledu a softwarový algoritmus je následně složí do termogramu, obvykle se 4násobným celkovým rozlišením (například termokamera s detektorem 640×480 pixelů „vyprodukuje“ termogram o rozlišení 1280×960 pixelů). Různí výrobci používají různé mechanismy postprocesingu a kvalita výsledného termogramu (i přesnost kvantifikace) vysoce závisí na tomto procesu.

V dnešní době se jedná o akceptovaný postup, i když je třeba zvážit jeho specifika a nepokládat jej za zcela ideální. Pro dokreslení... svého času byl považován i za kontroverzní; když jej představil první výrobce, někteří další výrobci jej nazývali metodou nevěrohodnou či diskutabilní, aby tento postup po několika letech implementovali do svých produktů.

Vždy je třeba vzít v úvahu, že třes kamery (a tím i posun optické osy je náhodný) a současně počet termogramů použitých pro tvorbu termogramu s navýšeným rozlišením je limitován. Stejně tak je nutno vzít v potaz, že metoda je použitelná pouze v případě měření termokamerou drženou v ruce.

Pro ověření chování navýšení rozlišení termogramu na základě „třesu ruky“ bylo provedeno ověřovací měření za následujících podmínek:

- objekt – vedení vvn s oteplením způsobeným přechodovým odporem na spojce lana, průměr spojky 48 mm, materiál hliník, vizuálně silně oxidovaný, zatížení linky cca 40 % nominální zátěže;
- teplota okolí 22°C , rychlost větru 5 m/s, což způsobuje mírné kývání vodičů, RH 40 %, jasno;
- termografická kamera detektor LWIR 1024×768 , NETD ≤ 20 mK, platná kalibrace kamery;
- vypočtená teplota je uvedena jako aritmetický průměr ze 4 měření;
- vzdálenost – provedeno ze 3 různých vzdáleností vzhledem k IFOV, při měření zohledněny mezní úhly dané směrovou emisivitou (korigovaný průměr):
 - vzdálenost 1 – korigovaný průměr spojky pokryt 1 pixelem,
 - vzdálenost 2 – korigovaný průměr spojky pokryt 3 pixely,
 - vzdálenost 3 – korigovaný průměr spojky pokryt 5 pixely;
- postup měření (navýšení rozlišení) vzhledem k použití metody „třesu ruky“:
 - postup 1 – kamera v ruce, funkce neaktivní,
 - postup 1 – kamera v ruce, funkce aktivní,
 - postup 1 – kamera uchycena na stativu, funkce aktivní.

Postup/ Vzdálenost	Postup 1, t ($^\circ\text{C}$)	Postup 2, t ($^\circ\text{C}$)	Postup 3, t ($^\circ\text{C}$)
Vzd. 1, „1 px“	42,9	47,6	48,4
Vzd. 2, „3 px“	44,6	28,7	53,0
Vzd. 3, „5 px“	60,3	60,7	61,5

Tabulka 1: Výsledky měření při různých vzdálenostech a definovaných postupech

Z výsledků v tabulce 1 je možno vyčíst následující:

- teoretická hranice minimálního pokrytí objektu minimálně 3×3 pixely je hranice teoretická a není postačující pro spolehlivou kvantifikaci skutečných teplot;
- pokud je pokrytí dostatečné, bez ohledu na postup, jsou vypočtené teploty porovnatelné;
- uchycení na stativ snižuje rozptyl mezi vypočtenými hodnotami teplot (v tabulce neuvedeno, tam jsou pouze průměry ze 4 měření);
- výrazně vybočující teplota při postupu 2 a vzdálenosti 2 je dána velkým rozptylem vypočtených zdánlivých teplot ($t_{\min} 11,3^\circ\text{C}$, $t_{\max} 50,6^\circ\text{C}$) a autoři ji přičítají možnému pohybu vodičů způsobenému větrem.

Při použití této metody/postupu je třeba vždy vzít v potaz následující skutečnosti:

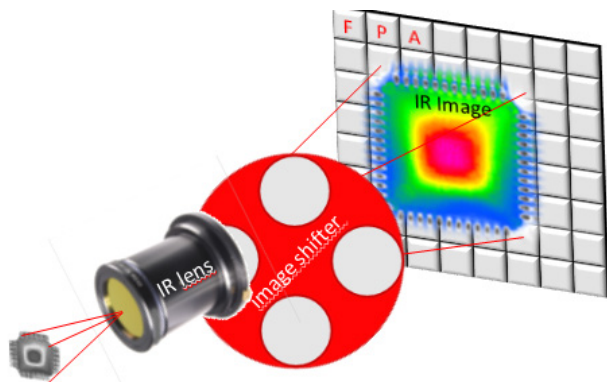
- nelze spolehlivě aplikovat na radiačně homogenní plochy (vyjádření výrobců);
- u pohybujících se objektů poměrně citlivé na rychlost pohybu;
- pokud není první termogram dostatečně kvalitní, složení i následná kvantifikace jsou často náhodné a nevypovídající a jsou zobrazeny teploty zcela odlišné od reality, v některých případech vyšší, v některých nižší;
- ke složení termogramu s vysokým rozlišením často dochází až v PC softwaru, některé kamery ho nejsou schopny;
- limitování záznamové frekvence – objekt by se neměl pohybovat;
- nelze použít v případě pevné instalace:
 - dlouhodobé chování objektů,
 - oteplovací zkoušky,
 - malé objekty;
- nevhodnost metody pevné instalace (např. uchycení na stativ) uvádějí sami výrobci:
 - pokud přesto dojde k vytvoření termogramu s vyšším rozlišením, jedná se pouze o matematickou interpolaci (strana 9) se všemi důsledky,
 - vysvětlení navýšeného rozlišení „všudypřítomnými mikrootřesy“ není výrobcům známo a není reálné,
 - i z těchto důvodů není tato funkce využívána u kamer určených pro pevné instalace,
 - v případě, že se uživatel rozhodne tuto funkci využívat, doporučujeme nejprve vyzkoušet, jak vlastně funguje a jaké jsou limitující podmínky.

d) Zvýšení rozlišení na základě řízeného posunu optické osy

V tomto případě se jedná opětovně o tvorbu termogramu na základě složení z většího počtu termogramů. Zásadním rozdílem je však řízené posunutí optické osy při nasnímání jednotlivých termogramů. Toto posunutí je možno řešit buď řízeným kmitáním detektoru (autorům není známo rozšíření tohoto postupu v praxi), nebo pomocí optických členů s řízeným pohybem v rámci optické osy. Princip je znázorněn na následujícím obrázku.

Postupy založené na řízeném posunu optické osy se vyznačují několika zásadními přednostmi:

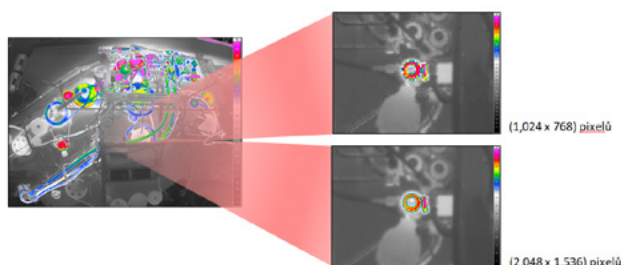
- umožňují fyzicky změřit i oblasti nepokryté mezerami mezi jednotlivými pixely mikrobolometru, které jsou standardně dopočítávány;



Obrázek 4: Znárodnění mechanického posunutí optické osy, zdroj [2]

- zobrazený termogram zobrazuje skutečně změřené oblasti;
- je aplikovatelný i při fixním upevnění kamery např. na stativ, což je podmínka u dlouhodobého sledování dějů či v případě R & D aplikací nebo mikroskopických aplikací;
- fyzické vylepšení IFOV založené na reálném měření;
- eliminace plochy detektoru, kde fyzicky nedochází k měření.

Pokud tedy uživatel potřebuje navýšit rozlišení termogramu u statických aplikací (tam, kde nedochází ani k řízenému posunu sledovaného objektu) či v R & D projektech (mikroskopické aplikace, sledování dlouhých dějů a podobně), je řízený posun optické osy jediným vhodným a akceptovatelným postupem.



Obrázek 5: Navýšení rozlišení řízeným posunem optické osy, zdroj autor [4]

Shrnutí části 2

Zatímco výsledky a termogramy se zvýšeným rozlišením na základě řízeného posunu optické osy či posuvu sledovaného objektu lze považovat za validní, není je možno srovnávat s postupy, kdy je výsledný termogram „pořízen“ postupy z předchozího bodu (c). Pokud je navýšení rozlišení termogramu učiněno pomocí technických prostředků, u nichž není řízený posun optické osy, případně tam, kde se řízení pohybuje sledovaný objekt, pak je možno takový postup považovat pouze za matematický dopočet nezaložený na reálném měření a je jen iluzorní. Uživatel by se měl zaměřit i na získání informací, jakým způsobem je zvýšení rozlišení výsledného termogramu dosaženo, a zvážit, zda mu nejsou předkládány údaje, které mají vyvolat zdání o skutečném a použitelném zvýšení rozlišení.

3. IFOV – okamžité zorné pole

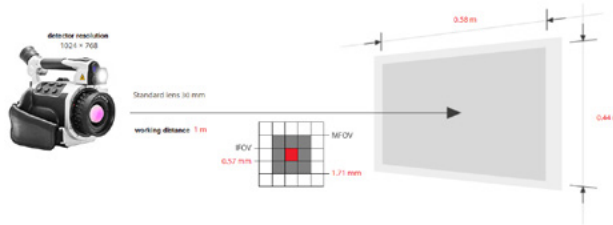
Parametr IFOV, tedy okamžité/skutečné zorné pole kamery, je nutno dát do kontextu s dalšími parametry, jako je FOV, tj. Field of view (zorné pole), a MFOV, tj. Measured field of view (měřené zorné pole). Jedná se o velmi důležité parametry každé termokamery a je potřeba jim nejen porozumět, ale také pochopit důsledky, které při měření termokamerou přinášejí.

Zorné pole termokamery je největší plocha, kterou kamera zobrazí na určitou vzdálenost daným objektivem. Udává se jako horizontální a vertikální úhel pohledu od kamery, např. $32^\circ \times 24^\circ$. Při rostoucí vzdálenosti je tedy zobrazovaná plocha úměrně větší a naopak.

Okamžité/skutečné zorné pole, také často označované jako prostorové rozlišení, je nejmenší zobrazený detail v prostoru zorného pole kamery v určité vzdálenosti od kamery. IFOV bývá vyjadřováno jako úhel projektovaného pixelu do prostorového úhlu a udává se v mrad (1 mrad v tomto případě odpovídá přibližně ploše o velikosti 1 mm^2 při vzdálenosti 1 m) nebo se udává také jako velikost pixelu / ohnisková vzdálenost.

Měřené zorné pole je možné popsat jako nejmenší detail, který můžeme změřit s maximální možnou přesností termokamery. Protože u termokamer s bolometrickými FPA detektory se výsledný vyhodnocený údaj vypočítává z matice 3×3 až 5×5 pixelů, je potom nejmenší měřené zorné pole (nejmenší měřená plocha) 3- až 5násobkem IFOV.

V praxi to znamená, že při měření malých objektů z dané vzdálenosti, pokud je známé IFOV, vynásobíme jeho hodnotu nejlépe $5 \times$ a při známé vzdálenosti si odvodíme/vypočteme, jakou musí mít měřený objekt velikost, aby mohl být správně změřen, aby bylo geometrické přizpůsobení správné. Např. u termokamery s konkrétním počtem pixelů detektoru a s daným objektivem je udáváno IFOV 1,2 mrad. Tento údaj vynásobíme $5 \times$ a vyhodnotíme, že při měření ze vzdálenosti 1 m by měl být měřený objekt velký min. 6 mm (ze 2 m potom 12 mm atd.)



Obrázek 6: Zobrazení FOV, IFOV a MFOV, zdroj [2]

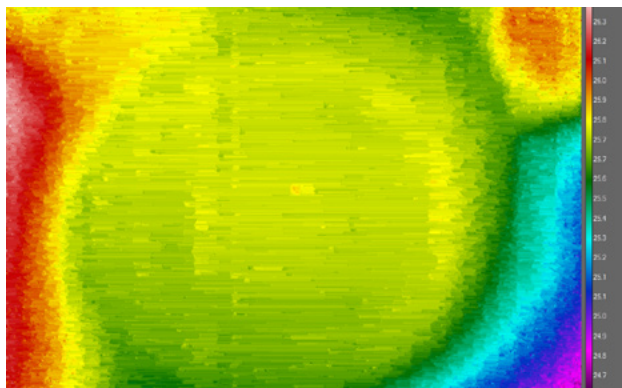
4. NETD – teplotní citlivost

Dalším významným parametrem při bezkontaktním měření teplot je kromě výše zmiňovaných také NETD – Noise Equivalent Temperature Difference, tedy šum ekvivalentní rozdílu teplot. Jde o rozdíl teplot černého tělesa, který odpovídá hodnotě poměru signálu vůči šumu rovnému 1 a který je způsoben proměnným šumem. Šum odpovídající rozdílu teplot se měří v kelvinech (hodnoty specifikací detektorů v milikelvinech – mK) při dané teplotě objektu a v určitém integračním čase.

Mikrobolometrické detektory mají typickou hodnotu NETD, tedy teplotní citlivost, 45 mK až 50 mK. Čím vyšší je šum sestavy, tím vyšší je hodnota NETD.

Dnešní výrobci termografických systémů a termokamer se tedy logicky snaží nabídnout termokamery s mikrobolometrickými detektory, které mají NETD co nejnižší, což je však na straně hardwaru technologicky nemožné. Přesto lze takové termokamery pořídit s NETD na úrovni 30 mK, dokonce i 20 mK. K vlastnímu šumu detektoru je tedy potřeba přičíst šum generovaný ostatními prvky řetězce, tedy elektroniky, případně prvků optické cesty. V případě, že výrobce kamery specifikuje NETD lepší než 50 mK, můžeme oprávněně předpokládat, že signál je dodatečně zpracováván softwarově, a to většinou proprietárním výpočtovým algoritmem. Kvalita detektoru a jeho NETD jsou dány celkovou stabilizací termokamery, především zohledněním konkrétní hodnoty teploty měřeného objektu, zvoleného teplotního rozsahu kamery, teploty okolí detektoru, apertury objektivu atd. Ačkoli se potlačení šumu může zdát na první pohled výhodou, obzvláště v aplikacích týkajících se prediktivní údržby, pak v případě systémů pro R & D aplikace, případně IR NDT, přináší takovéto potlačení šumu (bez znalosti vyhlazovacího algoritmu) dodatečné nejistoty do signálu/informace. Moderní a technologicky vyspělé termokamery dnes již disponují možnostmi volby redukce šumu v IR obraze (termogramu), a to v několika vypínatelných úrovních, takže koncový uživatel může pracovat přímo s úrovní signálu poskytující danou technologii detektoru anebo zdokonalovat kvalitu termogramu softwarovou filtrací. Takové řešení poskytuje uživateli možnost volby, zda chce pracovat s termogramem, na jehož úpravu byly použity neznámé algoritmy, anebo bude pracovat s nedefinovanými hodnotami.

Vyhazení šumu je poměrně náročné na výpočetní výkon a tím i na energetické nároky systému. Z tohoto důvodu se někteří výrobci uchylují k řešení, kdy je vyhlazení šumu aplikováno zejména na centrální část termogramu a zbytek zůstává nevyhlazen, případně na něm není provedena filtrace signálu rovnoměrně. Jako příklad je možno uvést i následující termogram, kde je v centrální části vidět jednoznačné seskupování pixelů do vodorovných skupin i ovlivňování některých z nich lokálními anomáliemi detektoru.



Obrázek 7: Příklad vyhlazování šumu termokamery, teplota objektu 25 oC, zdroj autor [4]

Schopnost detektoru rozeznat malé teplotní rozdíly měřeného objektu je nízká, a tedy naopak šum detektoru je velmi patrný při měření nižších teplot bez výrazných teplotních rozdílů (homogenní teplotní pole). Vyšší přesnosti měření se však softwarovou úpravou signálu detektoru s vysokým šumem nedocílí a spíše dochází k nepřesným naměřeným výsledkům. Jediné, čeho je možné dosáhnout, je vyšší vjemová kvalita termogramu s uhlazenější obrazovou prezentací, nikoli zvýšení vypovídací schopnosti termogramu.

ŠUM detektoru/kamery vyjadřovaný jako NETD by měl být definován pro každou konkrétní sestavu měřicího řetězce kamery (detektor, elektronika, objektiv, filtr atd.), a to ideálně pro každý ze zamýšlených objektivů zvlášť (někteří výrobci uvádějí různé hodnoty NETD při použití konkrétní kamery s různými objektivy). Pro výpočet NETD jsou používány různé postupy, přičemž nejstandardnější je postup v souladu s metodikou OIML R 141 2008, který jednoznačně definuje jednotlivé postupy. Je potřeba uvést, že někteří výrobci používají vlastní metodiky, avšak v datových listech obvykle není uvedeno, jaká metodika byla pro určení hodnoty NETD použita. V některých případech docházejí různé metodiky k různým výsledkům, proto by mělo být uváděno, jakým způsobem byl výpočet proveden, případně ekvivalent nejužívanější metodiky OIML. Příklad porovnání různých kamer a metodik je uveden v následující tabulce.

Kamera/ Metoda	Temporal				Spatial
	Výrobce (A)	Výrobce ost.	Mean	STD	OIML
A (20 mK) 1024 × 768	6,807 mK	6,918 mK	11,429 mK	1,143 mK	23,416 mK
B (20 mK) 640 × 480	44,703 mK	44,178 mK	5,714 mK	2,857 mK	24,176 mK
C (30 mK) 640 × 480	29,542 mK	30,364 mK	5,714 mK	2,857 mK	30,001 mK
D (50 mK) 1024 × 768	62,504 mK	60,601 mK	11,429 mK	5,714 mK	53,778 mK

Tabulka 2: Porovnání různých metodik výpočtu NETD

V tabulce 2 jsou zobrazeny výsledky testování 4 různých kamer s různými rozlišeními detektoru a od různých výrobců. Jako metodiky výpočtu NETD byly použity metodiky 2 různých výrobců (termokamera druhého výrobce nebyla do porovnání zahrnuta) a zařazeni 3 výrobci termokamer. V levém sloupci je deklarovaná hodnota NETD pro danou kameru a následně vypočtené hodnoty dle různých metodik. Je možné si povšimnout několika zajímavých věcí:

- kladně hodnotíme, že hodnota deklarovaná výrobcem byla porovnatelná s hodnotou NETD vypočtenou dle metodiky OIML [3];
- pokud jsme použili postup používaný výrobcem kamery A, pak kamera téhož výrobce dosahovala extrémně příznivých

hodnot NETD, zatímco kamery jiných výrobců vykazovaly výrazně horší parametry, ačkoli dle OIML byly v akceptovatelném pásmu nejistoty okolo deklarované hodnoty;

- existuje oprávněná obava, že někteří výrobci vytvářejí metody, které více vyhovují jejich způsobu odstraňování šumu z obrazu.

Na závěr je vhodné uvést, že pokud u některých výrobců použijeme jimi doporučené postupy mimo středové oblasti detektoru / zorného pole, pak se hodnoty NETD znatelně zhorší, což vede k závěru, že vyhlazování šumu není prováděno rovnoměrně v celé ploše detektoru.

5. Rychlost 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.

Dnešní systémy s bolometrickými detektory mají obvykle udávanou zobrazovací frekvenci v rozmezí 25–60 Hz pro plné rozlišení detektoru. 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.

Současně je zapotřebí upozornit na rozdíl mezi zobrazovací frekvencí a rychlostí ukládání. Pokud nepořizujeme statické termogramy, ale rozhodneme se ukládat sekvenci termogramů, případně radiometrické video, pak 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. windowingem. 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 mikrobolometru.

Mikrobolometr je ve své podstatě analogový detektor, jehož minimální čas pro spolehlivou kvantifikaci je minimálně 5 ms (tzn. 200 Hz). Ve skutečnosti jsou však minimální časy odlišné a pohybují se v rozhraní 7–10 ms. Pokud tedy chceme spolehlivě kvantifikovat rychlé děje, můžeme za maximální rychlost považovat 100–120 Hz, rychlosti vyšší pak pouze za informaci, že došlo k jevu bez jeho spolehlivé kvantifikace.

Stejně tak je třeba vzít v potaz, že mikrobolometr v daném čase/frekvenci integruje hodnotu signálu a není možno aktivně řídit excitační čas, který si můžeme zjednodušeně představit jako dobu závěrky/expozice u fotoaparátu. 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.

6. Možnosti prolínání termogramu s reálným/viditelným obrazem

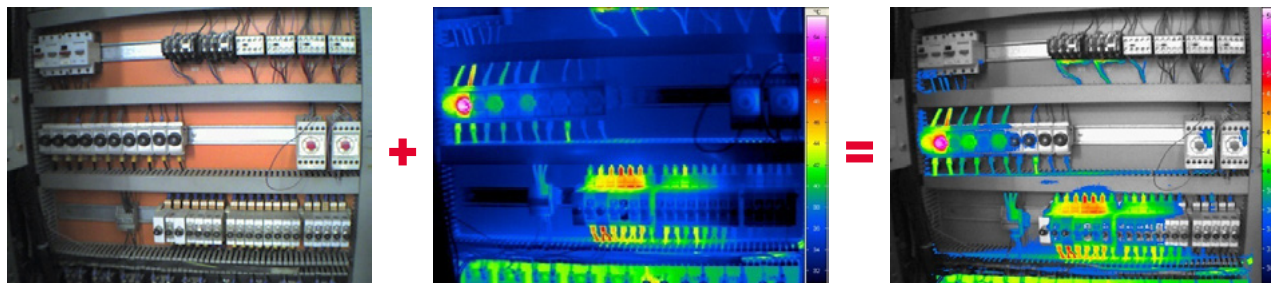
Velká část přenosných termokamer je vybavena i digitální kamerou pro záznam obrazu ve viditelném spektru. Použití digitální fotografie má význam pro dokumentaci místa, případně pro zvýšení orientace ve snímku. Existuje mnoho režimů, jak použít termogram ve spojení s reálnou fotografií; mezi obvyklé způsoby patří:

- PIP – termogram je orámován obrazem ve viditelné oblasti;
- blending – termogram je vložen před viditelný obraz, u termogramu je uživatelem regulována úroveň transparentnosti termogramu;
- prolnutí kontur viditelného obrazu do termogramu – prezentováno jako prostředek pro zvýšení orientace v termogramu; ve skutečnosti prostředek navozující pocit, že termogram je pořízen kamerou s výrazně vyšším rozlišením detektoru;
- překrytí viditelného obrazu pouze částmi termogramu splňujícími určitá kritéria, například teplota je vyšší než stanovená hodnota.

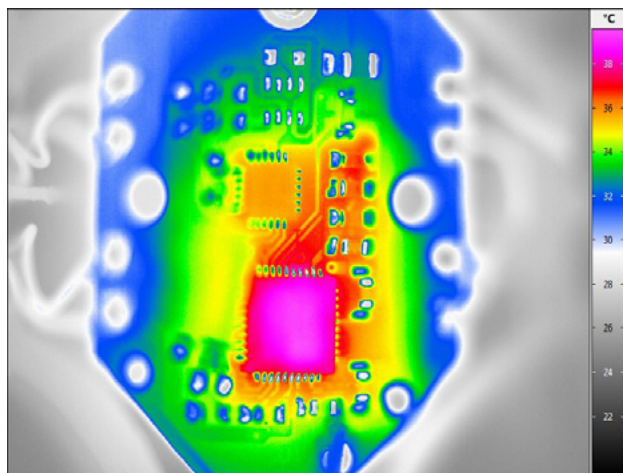
Bez ohledu na to, jaká metoda je použita, je vhodné vzít v potaz, že kvalitu vlastního termogramu, jeho přesnost či další parametry žádná metoda překrytí či prolnutí nevylepší.

7. Schopnost zobrazení detailu u mikroskopických aplikací

U některých aplikací vzniká požadavek na co nejlepší zobrazení malého geometrického detailu. V tom případě je zapotřebí použít makroobjektiv, makropředsádku, případně rozšiřující kroužky vkládané mezi objektiv a kameru. Obvykle bývají tato řešení charakterizována či popisována jako rozměr snímané plochy jedním pixelem, neboť v případě makroobjektivů bývá pevně daná ostřicí vzdálenost, v případě předsádek je možno ostřit pomocí objektivu, na kterém je předsádka nainstalována. Vždy však bývá poměrně limitována hloubka ostrosti dané optické cesty. V praxi se to projevuje nestejným zaostřením mezi středem a okraji snímaného objektu, případ-



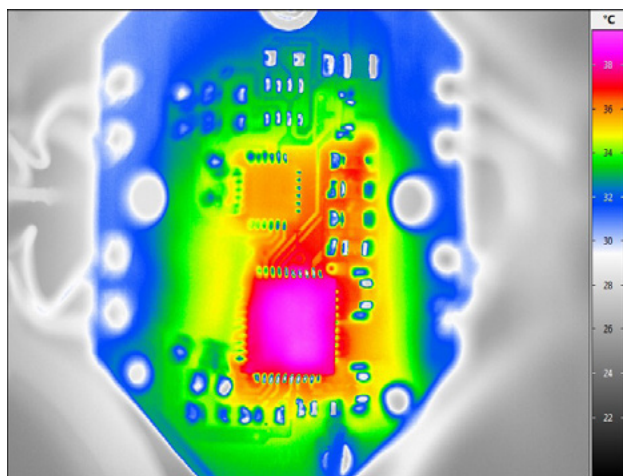
Obrázek 8: Ukázka překrytí reálné fotografie částí termogramu splňující zadané podmínky, zdroj [2]



Obrázek 9: Příklad nedostatečně zaostřeného objektu vlivem malé hloubky ostrosti použité makropředsádky, zdroj autor [4]

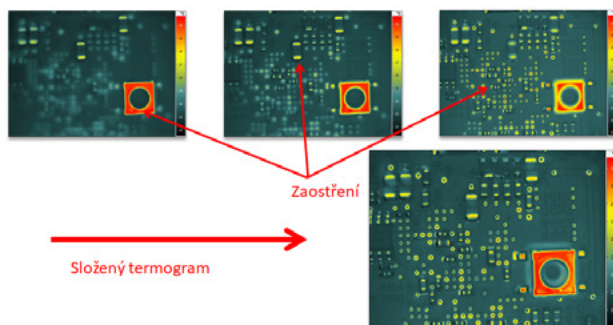
ně mezi protilehlými okraji. Zatímco případné geometrické zkreslení (vigneting, soudkovitost, rybí oko atd.) lze kompenzovat SW prostředky (liší se v závislosti na technické vyspělosti výrobce a jím dodávané optiky), nerovnoměrné zaostření má podstatný vliv nejen na estetickou a vypovídající schopnost termogramu, ale zejména na přesnost měření v nezaostřených částech termogramu. Pokud se tak děje, je uživatel limitován jak z hlediska využitelné plochy detektoru / zorného pole, tak i velikostí měřeného objektu. Typickým příkladem může být termogram uvedený na následujícím obrázku.

Uvedený jev, jenž je způsoben obecnými optickými vlastnostmi, je však možno kompenzovat, pokud termografický systém disponuje funkcí pro skládání termogramů s různou hloubkou ostrosti. Systém umožňující automatické ostření provede záznam série termogramů, u nichž automaticky mění zaostřovací vzdálenost, a výsledný termogram následně sestaví pouze z částí, které jsou dostatečně kvalitně zaostřeny.



Obrázek 10: Výsledný termogram složený z jednotlivých termogramů s různou ostřicí vzdáleností, zdroj autor [4]

Postup tvorby složeného termogramu je možno vidět na následující sekvenci obrázků.



Obrázek 11: Postup tvorby termogramu složeného z různých termogramů s rozdílným zaostřením, zdroj [2]

Takto vytvořený termogram má nejen dostatečnou vypovídající schopnost, ale hlavně je možno jej spolehlivě kvantifikovat ve všech jeho částech. Aplikovatelný je nejen u větších celků (například celé desky plošných spojů), ale třeba i v případech, že komponenty jsou geometricky členité, například kondenzátory či odpory, a rozdíl mezi horní stranou prvku a vlastní deskou je větší než hloubka ostrosti dané makropředsádky.

8. Zobrazení termogramu

Vytvořený termogram je v rámci následné analýzy prezentován i graficky. Lze pouze doporučit, aby rozlišení zobrazovacího rozhraní (displej) mělo vždy alespoň takové rozlišení, jež umožní zobrazení termogramu v rozlišení identickém, jako je rozlišení detektoru. Tento požadavek je obvykle snadno splnitelný u externích displejů či monitorů. Obdobný požadavek však nastává v případě, kdy je termokamera jako taková vybavena displejem. Pokud zmíněný displej (respektive oblast displeje určená pro zobrazení termogramu) nemá rozlišení odpovídající nebo překračující rozlišení detektoru, dochází k dodatečnému přepočtu nebo k interpolaci termogramu na úroveň rozlišení displeje a tím i k degradaci zobrazování termogramu jako takového.

9. Závěr

Při výběru termokamery je potřeba znát aplikaci, na kterou má být dané zařízení využito, ale při volbě parametrů i rozumět, co jaký parametr znamená, co přináší, případně jakými prostředky je ho dosaženo či zda je možno mu bezvýhradně věřit nebo zda „vylepšením“ zavádí do daného měření dodatečnou nejistotu.

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] Infracam GmbH, Infrarotsensorik und Messtechnik, Dresden: Manual of infraredcamera VarioCAM® HD

[3] OIML R 141, Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments, Edition 2008.

[4] Interní materiály „TMV SS“, s. r. o.

[5] TMV SS. TMV SS [on-line]. Copyright © [cit. 12. 11. 2019]. Dostupné z: <https://www.tmvss.cz/>

[6] Nort Coast Industrial Imaging, www.slideshare.net, 2018

[7] www.lno.ca, 2018

Recenzent

doc. Ing. Herman Aleš, Ph.D., České vysoké učení technické v Praze, FS; osoba certifikovaná na funkci Technik diagnostik termografie – Kategorie I

Diagnostika provozu parních turbín z vibračních signálů rotorových vibrací

Steam Turbine Operation Diagnostics from Rotor Vibration Signals

JINDŘICH LIŠKA, JAN JAKL, VOJTĚCH VAŠIČEK
ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, NTIS -
VÝZKUMNÉ CENTRUM

Anotace

Diagnostika, vyhodnocení a predikce poruch turbogenerátoru je klíčovým faktorem jeho úspěšného dlouhodobého provozu. Ze standardně měřených signálů relativních rotorových vibrací lze kromě aktuální výchylky rotoru či polohy jeho středu vyhodnotit i řadu dalších diagnostických veličin důležitých pro posouzení provozu, případně pro odhalení symptomů blížící se poruchy. Mezi tyto ukazatele patří mimo jiné výskyt zadírávání rotoru a statoru, kontakt bandáží lopatek s ucpávkami nebo zvýšené kmitání oběžných lopatek. Tento příspěvek popisuje případové studie, na kterých jsou ilustrovány možnosti pokročilejšího zpracování vibračních signálů pro odhalení a popis výše zmíněných fenoménů v rámci diagnostiky turbogenerátorů.

Annotation

Diagnosics, evaluation and prediction of turbo-generator failures is a key factor for its successful long-term operation. In addition to the rotor deflection or position of the rotor, the standardly measured relative rotor vibration signals also offer the possibility to evaluate a number of other diagnostic variables important for the assessment of the operation or for detecting the symptoms of the approaching failure. These include, among other things, the occurrence of rotor and stator rub, contact of rotor blade bandage with seals or increased oscillation of the rotor blades. This paper describes case studies illustrating the possibilities of advanced processing of vibration signals for detecting and describing the aforementioned phenomena within the turbo-generator diagnostics.

1. Úvod

Monitorování úrovně rotorových vibrací je již v současné době standardem na většině parních turbín. Hodnocení úrovně vibrací bylo zpracováno v normě ČSN ISO 7919-2 a nyní je nově součástí normy ČSN ISO 20816-2, kde jsou rotorové vibrace posuzovány společně s vibracemi měřenými

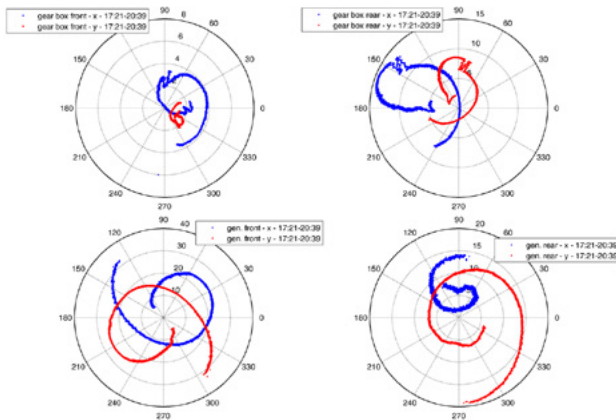
na nerotujících částech stroje. Kromě základního pohledu na vyhodnocení rotorových vibrací ve formě pásem doporučených hodnot maximálních rotorových vibrací hřídele lze informaci obsaženou v signálech rotorových vibrací posuzovat i z dalších hledisek. Nejčastější motivací pro analýzu signálů rotorových vibrací je detekce poruchy hřídele a dalších rotorových komponent. Nevývaha, nesouosost, případně ohnutí rotoru jsou časté poruchy, které jsou přímo detekovatelné v signálech rotorových vibrací.

V současné době se pro on-line monitorování vibrací používají diagnostické systémy, které umožňují výpočet základních charakteristik vibračních signálů. Jmenujme například Smax, 0-peak, peak-peak a RMS hodnoty, frekvenční spektra (amplitudová spektra) či Bodeho a Nyquistovy charakteristiky. Poslední dvě zmiňované charakteristiky jsou pak obvykle vyhodnocovány pro základní harmonickou složku signálu, což je v případě rotačních strojů, buzených zejména odstředivou silou, harmonická složka s frekvencí rovnou otáčkové frekvenci stroje.

2. Diagnostika kontaktu rotor-stator

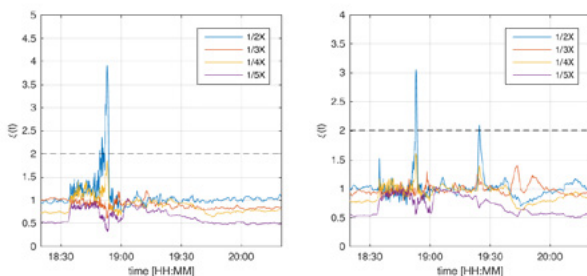
Hlubší analýzou signálů rotorových vibrací lze získat i další informace o stavu a provozu rotoru. Kontakt mezi rotorem a státorem je jednou z poruch, ke kterým dochází v poslední době v parních turbínách častěji. Vývoj parních turbín je orientován na zvyšování jejich účinnosti a bezpečnosti. Z dlouhodobého hlediska je vyšší účinnosti dosaženo především snížením vůle mezi rotorem a státorem a parametry ucpávek jsou navrhovány s ohledem na minimální ztráty energie páry. Kontakt mezi rotorem a státorem zahrnuje několik fyzikálních jevů, jako je tření, nárazy, změny tuhosti systému v důsledku fyzického spojení obou částí apod. V praxi se často používá anglický termín „rubbing“, který zahrnuje všechny tyto jevy. Zvláště po instalaci rotoru existuje vysoká pravděpodobnost výskytu rubbingu právě vlivem malých ucpávkových vůlí. V některých případech dojde k obroušení ucpávek a kontakt zpravidla následně vymizí. Intenzivnější kontakt ovšem způsobuje ohřev rotoru v místě kontaktu a je doprovázen mechanickou deformací rotoru. V některých případech se stav může rychle

zhoršovat a způsobit katastrofální poškození stroje. Metody pro off-line diagnostiku rubbingu popsané v literatuře jsou založeny na zpracování a reprezentaci signálů relativních rotorových vibračních hodnocením vývoje fázorů 1X v čase (viz obr. 1).



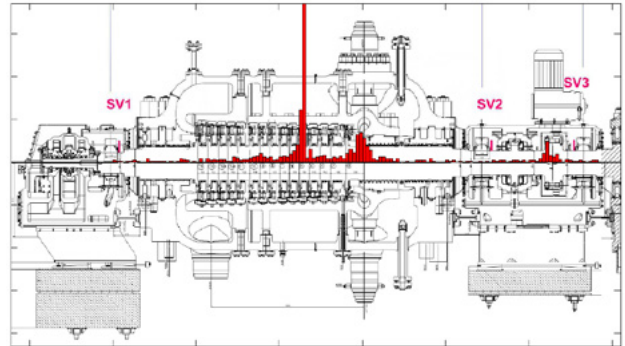
Obrázek 1: Vývoj fázorů 1X při kontaktu – měřící roviny na převodovce a generátoru

Muszynská v [1] a [2] dále popisuje metodu výpočtu úplného spektra, která umožňuje vyhodnocení precese rotoru. V okamžiku změny precese 1X (z dopředné na zpětnou) se jedná o významný indikátor přítomnosti kontaktu. V souvislosti s časově-frekvenčními metodami byly testovány nejen metody DFT, ale i krátkodobé Fourierovy transformace (STFT). Otázkou on-line detekce a včasného odhalení rubbingu se podařilo vyřešit automatizací zpracování úplných spekter (resp. metodou úplného kumulativního spektra, viz [3]) a následným normováním subharmonických frekvenčních složek spektra. Prahování výsledných charakteristických veličin je používáno pro automatickou detekci částečného rubbingu. Výsledný algoritmus (viz [4] a [5]) byl implementován do systému RAMS (Rub Advanced Monitoring System), který kromě detekce umožňuje při znalosti vzdáleností mezi měřícími rovinami provádět i lokalizaci místa, ve kterém ke kontaktu dochází.



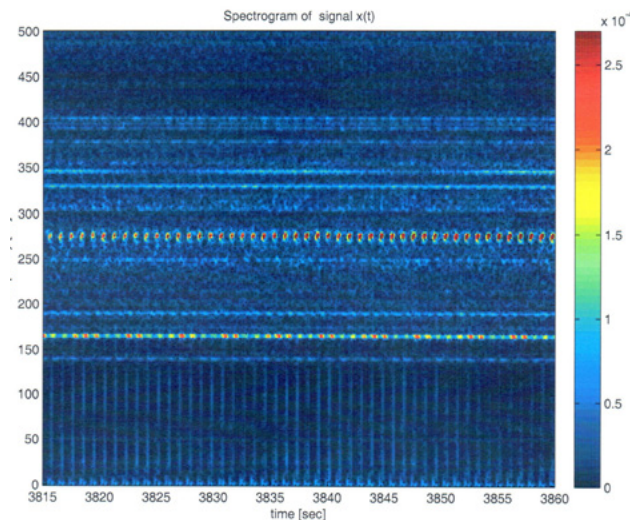
Obrázek 2: Průběh charakteristických (normovaných) veličin – přední část VT a NT TG 200 MW

Kromě kontaktu na hřídeli lze detekovat a lokalizovat i kontakt mezi špičkami lopatek (bandáží) a statorovou ucpávkou. Jak je ukázáno na obrázku 4, je tento kontakt doprovázen peri-



Obrázek 3: Příklad lokalizace místa kontaktu formou histogramu rázů – VT díl TG 200 MW

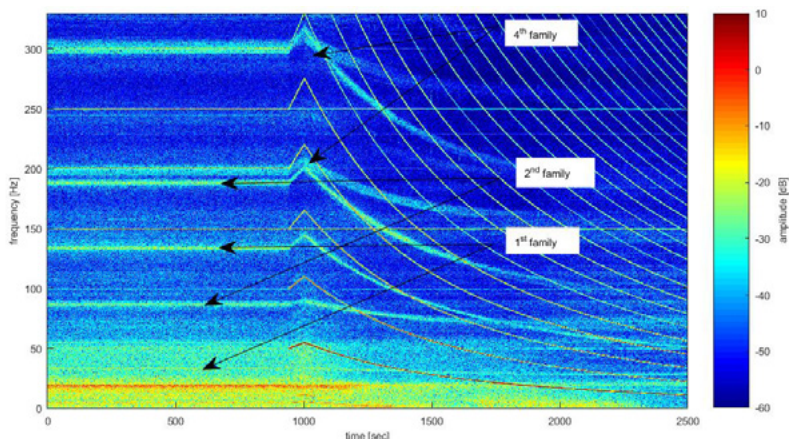
odickými rázy, jejichž frekvence odpovídá součinu počtu brzd nad bandáží lopatek (tzv. swirl brakes) a otáčkové frekvence. S touto informací tak lze z rotorových vibrací detailněji diagnostikovat stav rotoru, případně přizpůsobit režim provozu turbíny aktuální situaci.



Obrázek 4: Projevy periodického kontaktu mezi bandáží lopatek a ucpávek v rotorových vibracích

3. Diagnostika chvění lopatek

Nejen kontakt mezi lopatkami a statorem je možné diagnostikovat z rotorových vibrací. Další možností, jak využít informaci obsaženou v signálech rotorových vibrací, je monitoring chvění oběžných lopatek (nejčastěji posledních kol NT dílu). Měření signálů relativních rotorových vibrací a jejich následná analýza za účelem identifikace chvění lopatek byly provedeny na řadě turbín (viz např. [6]). Na obrázku 5 je ilustrován spektrogram signálu relativních rotorových vibrací, který byl naměřen při doběhu na TG 660 MW. Kromě jasně zřetelné harmonické frekvence, která odpovídá otáčkové frekvenci s nominální hodnotou 3 000 RPM, jsou patrné také její celočíselné násobky, tj. vyšší harmonické. Kromě výše zmíně-



Obrázek 5: Spektrogram doběhu TG 660 MW – ukázka lopatkových frekvencí

ných dominantních frekvencí jsou ve spektrogramu patrné také frekvence, které přísluší vlastním lopatkovým frekvencím.

Lopatková frekvence je ve spektru pozorována vždy ve formě dvou komponent, které odpovídají skutečné vlastní lopatkové frekvenci \pm otáčkové frekvenci – tzv. upper sideband a lower sideband. Tento fakt je způsoben amplitudovou modulací s potlačenou nosnou složkou. Předchozí příklad byl případem kmitání volných lopatek. Spektrogram rotorových vibrací stroje, na kterém byly instalovány vázané lopatky, je uveden na obrázku 6 a 7, kde jsou velmi dobře vidět oddělené jednotlivé módy chvění lopatkového kola – tvary kmitu charakteristické harmonickým kmitem obvodu lopatkového kola, tzv. uzlové průměry (ND – nodal diameter).

Z amplitudového spektrogramu na obrázku 6 jsou patrné viditelné vyšší uzlové průměry, které jsou pro případ váza-

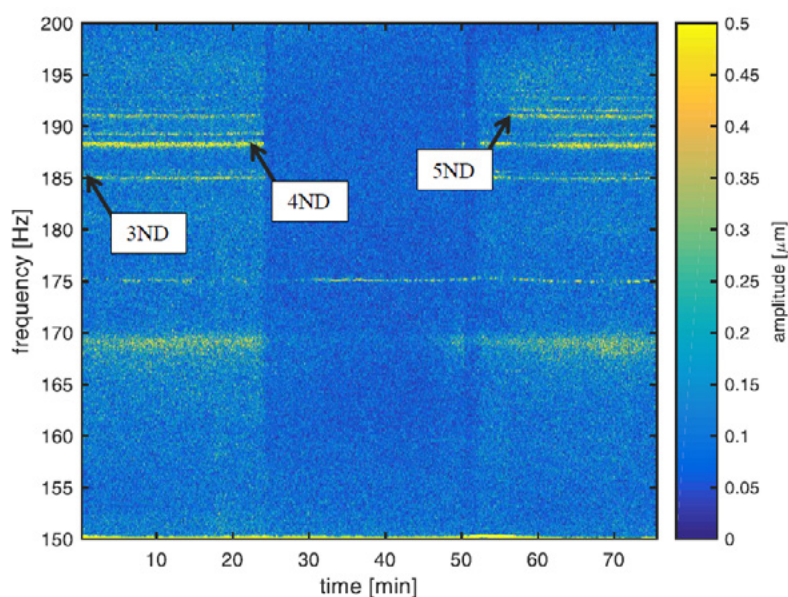
ných lopatek dobře oddělitelné. Konkrétně se jedná o 80minutový signál rotorových vibrací naměřený při provozu na 3000 RPM. Amplitudový spektrogram na obrázku 7 pak ilustruje, jakým způsobem dochází k odemykání kontaktních členů jednotlivých lopatek vlivem klesající otáčkové rychlosti. Zkoumané spektrogramy rotorových vibrací, a to především případ vázaných lopatek, ukazují, že v rotorových vibracích je možné identifikovat i složitější tvary kmitu než jen 1ND. Ačkoli by měly být kmity vyšších ND symetrické, zřejmě existuje určitá míra provozní nesymetrie způsobující vznik ohybového momentu, který působí na hřídel. Díky tomuto principu lze pozorovat konkrétní frekvence kmitání lopatkového kola i v signálech rotorových vibrací. Aby bylo možné projevy kmitání lopatek v rotorových vibracích použít pro monitorování vibrací lopatek, je nutné stanovit míru korelace a přepočítání mezi přímým měřením chvění lopatek (BTT – blade tip timing) a rotorovými vibracemi. Z několika paralelních instalací systému BTT a současného měření rotorových vibrací se ukázalo, že oba signály jsou vzájemně dobře korelované.

4. Závěr

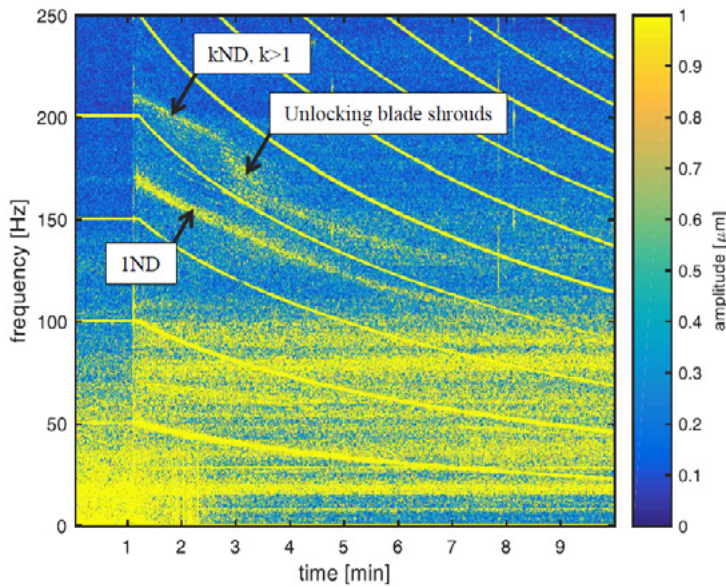
Nové metody a algoritmy analýzy signálů rotorových vibrací v posledních několika letech umožnily rozvoj znalostí v oblasti monitorování a diagnostiky provozu parních turbín. Kontakt rotor–stator se stal v posledních několika letech častěji se vyskytujícím jevem z hlediska provozu parních turbín a díky automatickému způsobu zpracování a analýzy signálů lze za provozu turbíny identifikovat kontakt a provést následnou lokalizaci. Oproti tomu se v řadě případů stejným postupem podařilo vyvrátit přítomnost kontaktu v turbíně, který byl primárně označen za příčinu zvýšeného chvění rotoru. Skutečná příčina zvýšených vibrací byla odhalena následnou podrobnou analýzou měřených dat. Vlastnosti analýzy lopatkového chvění z rotorových vibrací umožnily například identifikaci vlastních frekvencí lopatek při provozu turbíny a následnou korekci těchto hodnot ve výpočetních modelech. Na blocích, kde z nějakého důvodu není možné instalovat systém pro měření kmitání lopatek BTT, skýtá analýza signálů rotorových vibrací alespoň základní informaci o stavu a celkovém chvění posledních oběžných lopatek NT dílů.

Poděkování

Tato práce vznikla díky finanční podpoře z ERDF v projektu Výzkumná spolupráce pro dosažení vyšší účinnosti a spolehlivosti lopatkových strojů (LoStr) - CZ.02. 1. 01/0. 0/0.0/16_026/0008389.



Obrázek 6: Spektrogram signálu rotorových vibrací s frekvencemi uzlových průměrů



Obrázek 7: Spektrogram signálu rotorových vibrací během doběhu – odemykání lopatek

Literatura:

[1] Muszynska, A.: Rotordynamics. Taylor & Francis Group: CRC Press, 2005.

Recenzent

Ing. Balek Luboš, NET4GAS, s. r. o., Praha; osoba certifikovaná na funkci Specialista vibrační diagnostiky – Kategorie III

[2] Goldman, P., Muszynska, A.: Application of full spectrum to rotating machinery diagnostics, Orbit, Vol.20, No.1, 1999.

[3] Jakl, J., Liška, J., Černý, V. The use of time-frequency methods in rotor/stator impact-rubbing detection. In Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2011. Washington: ASME, 2011.

[4] Liška, J., Černý, V. Způsob detekce a lokalizace částečného kontaktu rotor–stator při provozu turbíny, Patent – CZ 306833.

[5] Liška, J., Černý, V. A method of detecting and localizing partial rotor-stator rubbing during the operation of a turbine, Evropský patent EP2746541.

[6] Liška, J., Vašíček, V., Jakl, J. On possibilities of using relative shaft vibration signals for rotating blades monitoring. In 2018 Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (GT2018). 2018.

Hledáte?
Pátráte?
Sháníte?
Nenacházíte?

Vyhledávejte na správném místě!
ru.almanachprodukce.cz

Almanach
PRODUKCE V ČR A SR

ŘÍZENÍ & ÚDRŽBA
průmyslového podniku

TRADEMEDIA
INTERNATIONAL

Amplifikační systém IRIS-M

Amplification System IRIS-M

MIROSLAV ČECH

BILFINGER INDUSTRIAL SERVICES CZECH S. R. O.

Anotace

Využití možností vysokorychlostního snímání při diagnostice rotačních strojů, statických částí, potrubí apod.

Annotation

Utilization of high-speed camera possibilities in diagnostics of rotating machines, static parts, pipelines etc.

1. Úvod

Co je to amplifikační systém IRIS-M a k čemu slouží? Amplifikace (z anglického amplification) znamená zesílení, zmožnění. Systém je založen na principu vysokorychlostního snímání změny polohy různých objektů, např. rotačních strojů, statických konstrukcí, potrubních tras, základů strojů apod., a jejího zobrazení pro potřeby vnímání lidského oka. Tato technologie byla původně vyvinuta pro armádní účely. Výrobce systému IRIS-M je americká společnost RDI Technologies.



Obrázek 1: Systém IRIS-M

2. Vidět znamená uvěřit

To, co vidíme, není vždy to, co se skutečně děje. Senzorické vnímání pohybu lidským okem je značně omezeno. To znamená, že vysokofrekvenční kmitání (vibrace) částí strojů není lidské oko schopno zaznamenat. Toto omezení je možné eliminovat použitím záznamu pomocí vysokorychlostní kamery. U systému IRIS-M je možné rychlost snímání nastavit v rozmezí 100–1300 snímků za sekundu. Kamera je schopna zachytit kmitání o velikosti 2,5 μm na vzdálenost 1 m při ohniskové vzdálenosti objektivu 50 mm. Nasnímaný záznam je možné dále amplifikovat/zesílit tak, aby toto vysokofrekvenční kmitání bylo pro lidské oko viditelné.

3. Konfigurace systému

Celý systém se skládá z těchto částí:

- vysokorychlostní kamera;
- vyměnitelné objektivy s ohniskovou vzdáleností 6 / 12,5 / 25 / 50 / 100 mm;

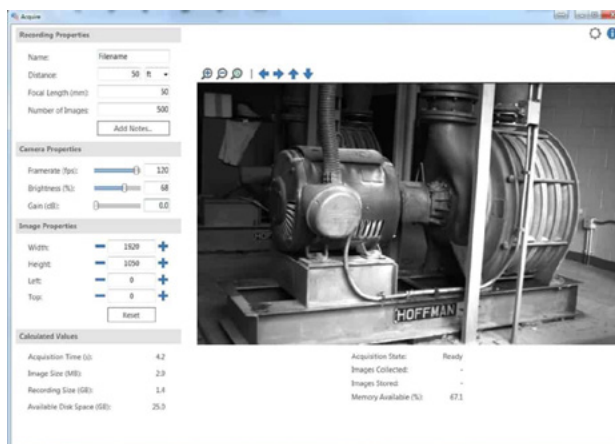
- stativ pro upevnění kamery doplněný antivibračními podložkami;
- technologický notebook se softwarem pro záznam a vyhodnocení dat;
- akumulátorové lampy pro doplňkové přisvětlení snímaného objektu.

4. Sběr a analýza dat

Nyní si v krátkosti popíšeme postup při získání a vyhodnocení dat.

Po instalaci zařízení na místě měření provedeme nastavení parametrů v programu pro sběr dat (RDI Motion Acquisition).

Zde nastavujeme parametry, jako je název souboru se záznamem dat, vzdálenost kamery od snímaného objektu, ohnisková vzdálenost objektivu, délka záznamu, počet snímků za sekundu,



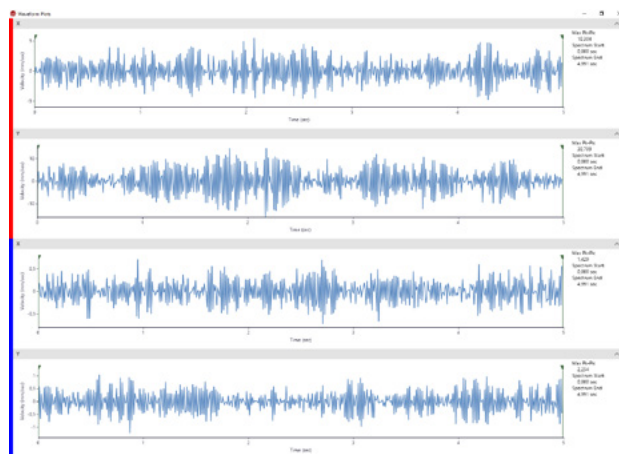
Obrázek 2: Obrazovka programu RDI Motion Acquisition



Obrázek 3: Obrazovka programu RDI Motion Amplification

jas, rozlišení obrazu. Na obrazovce kontrolujeme zaostření scény a její nasvětlení. Pro kvalitní záznam je nutno zajistit dostatečné osvětlení snímaného objektu pomocí doplňkových lamp. Pokud je vše v pořádku, tlačítkem rekord provedeme záznam.

Úpravy a vyhodnocení nasnímaného záznamu se pak provádějí v programu RDI Motion Amplification.



Obrázek 4: Časový záznam pro vybrané body zájmu

V tomto programu provedeme prvotní kontrolu nasnímaných dat a následně i další úpravy, aplikaci frekvenčních filtrů, doplnění textových poznámek nebo grafických symbolů přímo do obrazu. Dále můžeme kdekoli na povrchu nasnímaného zařízení vybrat tzv. bod zájmu a program pro tento bod zobrazí hodnotu zrychlení, frekvenční spektrum a orbitu.

Po provedení všech potřebných úprav exportujeme výsledný záznam do videosouboru ve formátu MP4.

5. Výsledný report

Výstupem z provedené analýzy zařízení pomocí systému IRIS-M je videoreport.

Tento report se vytváří v programu RDI Motion Studio, což je vlastně jednoduchý movie maker. Zde můžeme kombinovat textové obrazovky s jednotlivými videi a obrázky, ať už pořízenými v programu RDI Motion Amplification při zpracování dat, či pomocí externího fotoaparátu. Dále můžeme upravovat délku zobrazení jednotlivých částí konečného filmu, záznam můžeme stříhat nebo jednotlivé části mezi sebou přesouvat. Po ukončení editace program výsledný report uloží jako videosoubor MP4.

6. Závěr

Systém IRIS-M umožňuje tzv. zviditelnění provozních kmitů na jednotlivých frekvencích. Doposud bylo pro tyto účely možné využít pouze programové prostředky

vycházející ze skládání obrázku složeného z měření vibrací na jednotlivých bodech. Tato metoda je časově náročná a vyžaduje sběr vibračních dat z jednotlivých měřicích bodů. Měření se provádí buďto jedním snímačem a postupným přecházením z jednoho bodu na druhý, či použitím výcekanálové soupravy a osazením všech bodů snímači a změřením vibrací na všech bodech v jednom okamžiku. Oproti této metodě má použití vysokorychlostní kamery tu výhodu, že lze vizualizovat vibrace libovolného vybraného bodu na zařízení, a to bez nutnosti kontaktního měření. Systém IRIS-M je vhodné použít zejména tam, kde klasická vibrační analýza nepřinesla očekávané řešení provozních problémů.

Pomocí systému IRIS-M můžeme vizualizovat:

- vibrace potrubí a ocelových konstrukcí;
- vratný pohyb motorů a kompresorů;
- nevyvahu;
- nesouosost;
- měkkou patku;
- trhliny a praskliny základů strojů;
- průhyb stěn nádob;
- tuhost konstrukcí;
- torzní zkroucení.

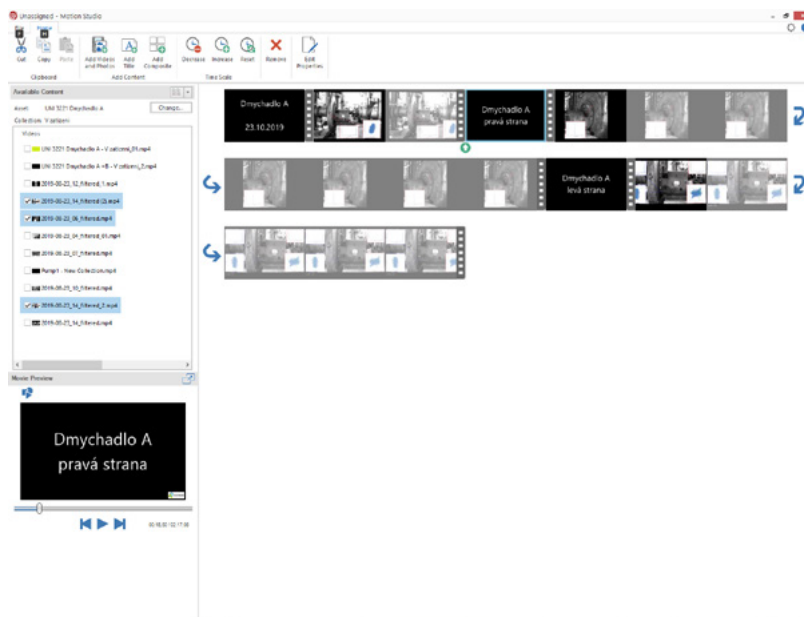
Od softwarové verze 2.5 lze systém použít také k měření otáček nebo ke kontrole částí pro přenos pohybu, jako jsou spojky, řetězy, řemeny, kardany apod.

Zdroje:

[1] Google, RDI Technologies, manuál IRIS-M, Bilfinger ISCZ

Recenzent

Ing. Pavlík Vít, ČEZ a. s., Elektrárny Pruněřov, Kadaň; osoba certifikovaná na funkci Specialista vibrační diagnostiky – Kategorie III



Obrázek 5: Obrazovka programu RDI Motion Studio

Základy geodetických měření ve strojírenství

Basic of the Industrial Surveying

JIRÍ POSPÍŠIL, HANA SAŇKOVÁ

VŠB-TU OSTRAVA

Anotace

Průmyslové geodézie je součástí inženýrské geodézie a má speciální požadavky pro vytvoření základů pro měření tzv. mikrosítí. V příspěvku jsou popsány postupy a zásady, které jsou nezbytné pro měření průmyslových zařízení. Dále je popsáno, jak je možné využít geodetická měření v průmyslu pro údržbu strojů nebo jednotlivých strojních částí.

Mikrosít tvoří výchozí body, které nadále slouží jako základ všech geodetických měření. Tyto body mohou být použity dočasně pro měření v rámci jedné akce nebo mohou sloužit jako základ měření při montáži i provozu výrobního zařízení. Důležitý je i postup, jak mikrosítí vzniká a z čeho vychází; jsou zde uvedeny tři základní případy. Nedílnou součástí těchto procesů jsou měřicí přístroje a použité vybavení, které musí splňovat požadavky na přesnost výsledků měření

Annotation

Industrial surveying is one part of the engineering surveying. Industrial surveying has a special rules for the micronetwork creation. There are introduced some procedures and principles which are necessary for the industrial surveying. Then there are explained reasons why is surveying used in the industry and how it can influence the mechanical engineering part of the industrial production.

Micronetwork consists of survey points which are set as a base for all surveying in the industry and it's connected with one mechanical part or concure many parts. You can find there how to create these points and three ways that can occur during these procedures. Another important part of the industrial surveying is the equipment and tools which are nowadays used and the accuracy which is expected

1. Úvod

Geodetické měření strojních zařízení a konstrukcí ve strojním průmyslu je specifickou částí inženýrské geodézie. Tato, podle [1] nazvaná, průmyslová geodézie nastupuje všude tam, kde už nelze použít tradiční strojní měřidla, jako jsou například mikrometry, spárové měřky a další mechanická měřidla. Geodet využívá ke své práci teodolity, nivelační přístroje, totální stanice nebo různé laserové měřicí přístroje. Tyto přístroje jsou vhodnější pro měření rozsáhlejších a členitějších celků, jako jsou např. jeřábové dráhy, válcovací stolice, rozsáhlé ocelové konstrukce a jiné. Geodetická měření se ve strojírenské praxi nazývají měřením optickým.

Geodet spolupracuje při výrobě, kontrole konstrukcí a zařízení připravených k transportu, u vytyčovací práci pro montáž konstrukce na staveništi a při kontrole smontovaných konstrukcí a zařízení před převjímkou. S potřebou geodetických

měření ve strojírenství se také často setkáváme i u strojů, které jsou již v provozu.

Ve strojírenské terminologii se měření a vyhodnocení stavu strojů nazývá technickou diagnostikou. Tuto práci provádí pracovník, který se odborně nazývá diagnostik. Definici diagnostika je možno nalézt v [2]: „Diagnostik je pracovník, který provádí náročnou a složitou činnost s cílem vyhodnocení technického stavu strojů a zařízení pomocí přístrojů a metod technické diagnostiky s nejvyšší možnou kvalitou.“

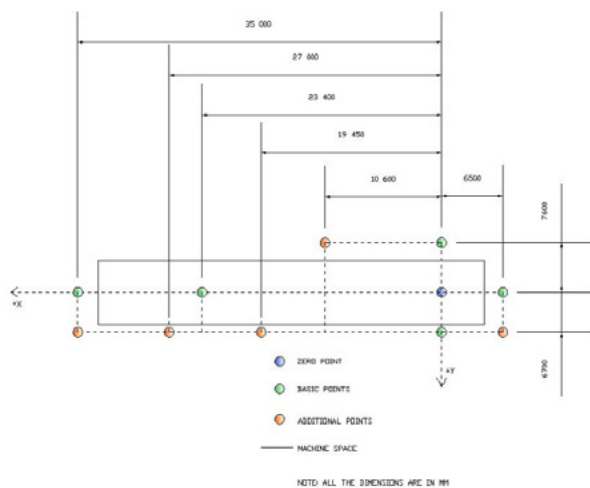
Na potřebu diagnostiky strojních zařízení je nutné upozornit nejen z hlediska optických (geodetických) měření, ale i z hlediska jeho technického stavu. Na základě výsledků diagnostiky lze následně provést seřízení stroje pro zlepšení jeho výkonnosti. Správné postupy a dobře naplánovaná diagnostika může výrazně prodloužit životnost stroje nebo jeho částí. Diagnostika napomáhá i v samotné výrobě, vyšší kvalitou i množstvím daného výrobku.

2. Obecné zásady pro budování mikrosítí

Pro veškerá geodetická měření v průmyslu je potřeba vycházet ze sítě měřických bodů. V průmyslové geodézii se zásadně nepoužívají body státních polohových a výškových bodových polí, ale je nutné vytvořit separátní mikrosít (lokální síť). Tato síť pak slouží jako geometrický základ měření, vytyčování, rektifikace i kontrolního měření po celou dobu montáže zařízení. Délky stran mikrosítí bývají poměrně krátké. Jako celek může mikrosít pokrývat plochu např. 60 × 15 m, většinou je však menší, protože se vztahuje pouze k měřenému objektu. Rozmístění samotných bodů je pak závislé na velikosti a hlavně členitosti strojního zařízení. Mikrosítí je zcela nezávislá svou přesností a orientací na vnějších státních polohových a výškových bodových polích připojených na státní referenční systémy. Ve strojírenství je důraz kladen pouze na geometrické určení a návaznost jednotlivých strojních částí, přičemž určení polohového umístění v prostoru výrobní haly je méně významné. Mikrosítí je vztažena pouze ke strojnímu zařízení a je zcela nezávislá na ostatních objektech včetně konstrukce haly (budovy).

Tvar základní mikrosítí býval obvykle pravouhlý, neboť se měřilo vůči struně realizující danou osu. Dnes je to účelem daný tvar. Vždy bývá určena základní (podélná) osa Y a příčná osa X strojního zařízení, viz obr. 1., a k ní je vztažen souřadný systém. Musíme si uvědomit, že tvar sítě a souřadný systém sítě není totéž. Při pravouhlém systému je každá osa realizována minimálně dvěma body a bývá v pravidelných úsecích doplněna dalšími body. Hustota a počet bodů mikrosítí není také přesně specifikován. Může se pohybovat od dvou bodů, to v případě že jako mikrosítí je realizována pouze jedna osa stroje, až do počtu v řádu desítek u složitějších strojních celků.

Konkrétní tvar mikrosítí a rozmístění základních bodů závisí na konstrukčních požadavcích, členitosti a geometrickém určení jednotlivých dílů strojního zařízení.



Obr. 1 Ukázkové schéma vytyčovaných bodů mikrosítě s kótami

3. Způsoby budování mikrosítě

Při vytváření mikrosítě mohou nastat následující případy:

- Budování mikrosítě podle projektu – body jsou určeny projektem, vytyčeny a následně zhuštěny pro potřeby měření. Síť se buduje před montáží strojního zařízení.
- Budování mikrosítě ze stávajících bodů – využití stávajících bodů a zhuštění bodů mikrosítě pro potřeby měření.
- Nové vybudování mikrosítě – celkové vytvoření mikrosítě pro potřeby měření.

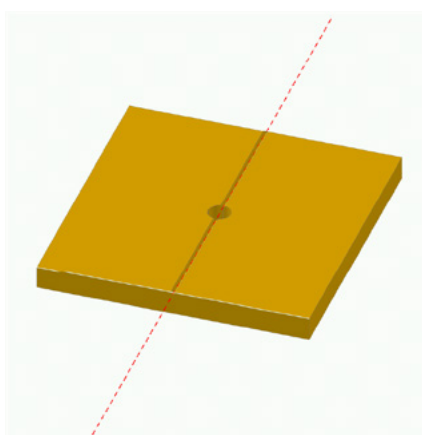
3.1 Budování mikrosítě podle projektu

Tento případ nastává v okamžiku, kdy je budováno zcela nové strojní zařízení, protože při obnovení či úpravách stávajících strojních zařízení se v praxi projekt pro vytvoření mikrosítě (vytyčovací síť stroje) nevypracovává.

Celý proces budování mikrosítě začíná při stavbě nové haly, popřípadě při stavebních úpravách pro instalaci nového strojního zařízení. Při těchto pracích jsou podle projektu přibližně vybudovány základní body mikrosítě. Tyto základní body (obr. 1) jsou dány zadavatelem a připravuje je geodet, který bude mít na starosti montáž stroje, většinou nejde o geodeta stavby, pokud se stavbou nemyslí pouze montáž technologického zařízení (stroje). Základní body mikrosítě mají ve výkresové dokumentaci svou kótu – polohové souřadnice X, Y. Tyto souřadnice jsou obvykle vztaženy k jednomu, tzv. hlavnímu, též nulovému bodu neboli počátku souřadnicové soustavy. V tomto bodě je souřadnice X i Y rovna nule. Souřadnice Z není v projektu pro budování mikrosítě uváděna, protože je dána rovinou podlahy nové haly. Nulová souřadnice Z je vtažena pouze k nulovému bodu strojního zařízení a na ostatní body je Z-ová souřadnice přenesena.

Prvotní stabilizace základních bodů je pouze přibližná. Zpravidla se provádí zabudováním kovové destičky (cca 10 × 10 cm) do podlahy výrobní haly, viz obr. 2. Přesné vyznačení základních bodů mikrosítě provádí geodet, který poté pracuje na celkovém měření během montáže stroje. Do zabudované kovové desky je přesná poloha vyražena důlčičkem, vyryt křížek nebo je vyvrtán malý otvor. Z takto stabilizovaných bodů se

vytyčují celé strojní zařízení. Při montáži strojního zařízení dochází k postupnému zastavování prostoru. Tak dochází k omezení počtu bodů mikrosítě pro vhodných pro orientaci na přechodném stanovisku. Některé body zůstávají trvale nepřístupné pod konstrukcí stroje a stávají se nepoužitelnými pro další měření. Z tohoto důvodu je někdy potřeba vybudovat pomocné body mikrosítě. Některé tyto body se stabilizují pouze dočasně, např. pomocí velmi silných indukčních magnetů (obr. 3). Trvalé stabilizace se provádějí některým z výše uvedených způsobů. Podrobnější zásady pro určení a stabilizaci podrobných bodů je uveden v následující kapitole.



Obr. 2 Trvalá stabilizace



Obr. 3 Dočasná stabilizace

3.2 Budování mikrosítě ze stávajících bodů

Pokud je již strojní zařízení smontováno a geodet přichází pouze kontrolovat uložení a návaznost jednotlivých strojních dílů, může vycházet ze stávajících bodů mikrosítě. Jako body pro orientaci totální stanice, pokud se zachovalo, nebo vybudovat novou navázanou na stávající stroj (jde o relativní geometrické vztahy, ne polohu v prostoru), se většinou volí body buď podélné, nebo příčné osy strojního zařízení. Body popsané v kapitole 2.1 se zpravidla nacházejí na podlaze haly, což může způsobovat komplikace při záměrech pro určení polohy přechodného stanoviska.

Při odstávce strojního zařízení se provádí servis a kontrola všech jeho částí. V praxi to znamená, že se v okolí pohybují desítky dělníků, s nimiž je spojen i značný přesun materiálu a často dochází ke kolizi záměr a činnosti ostatních pracovníků. Z důvodu lepší viditelnosti a orientace totální stanice se zřídí

pomocné body a stabilizují se trvale, nebo dočasně na stěnách a sloupech konstrukce výrobní haly. Tyto body jsou však vhodné pouze k měření v krátkém časovém úseku, neboť mohou být ovlivněny vnějšími klimatickými podmínkami. To usnadňuje viditelnost a změnu měřického stanoviska. Stabilizace pomocných bodů je provedena buď pomocí magnetických podstavců (dočasná stabilizace) – viz obr. 3, na kterých je uchycen odrazný hranol nebo pomocí čepů, které jsou zavrtány do stěn, nebo nosných konstrukcí (trvalá stabilizace). Následně jsou určeny souřadnice pomocných bodů a poté mohou být použity pro další orientaci přístroje během měření.

3.3 Nové vybudování mikrosítě

Posledním případem tvorby mikrosítě je stav, kdy jsou body mikrosítě zničeny, nedostupné nebo nikdy neexistovaly a mikrosít není zadána projektovou dokumentací. Tento případ nastává při rekonstrukci, údržbě nebo montáži nové části strojního zařízení.

Základní postup spočívá v určení osy stroje, ke které bude vztaženo veškeré další měření. Volba této osy je nejdůležitějším krokem v celém měření, které může výrazně napomocet nebo naopak zkomplikovat vyhodnocování. Geodet, který nemá zkušenosti s průmyslovou geodézií, jen velmi obtížně zvolí správnou část stroje, od které bude osa určena. V tomto případě je vždy nezbytná konzultace s obsluhou stroje nebo strojním inženýrem, neboť pouze ten zná funkční technologické návaznosti výrobní technologie.

Je nutné si uvědomit, k čemu bude vlastní měření sloužit a jaké jsou hlavní části stroje. Geodetická měření slouží převážně k určení geometrie strojních částí a jejich následnému seřizení (ustavení). Ustavení znamená, že jednotlivé části stroje musí být vůči sobě sousedé nebo kolmé. Při seřizování se posouvají jednotlivé části stroje tak, aby splňovaly podmínky sousososti a kolmosti. Je nutné podotknout, že některé části jsou i desítky tun těžké, pohyb s nimi je tedy velmi obtížný a v některých případech těžce proveditelný. S některými částmi pak nelze z provozních důvodů pohybovat vůbec.

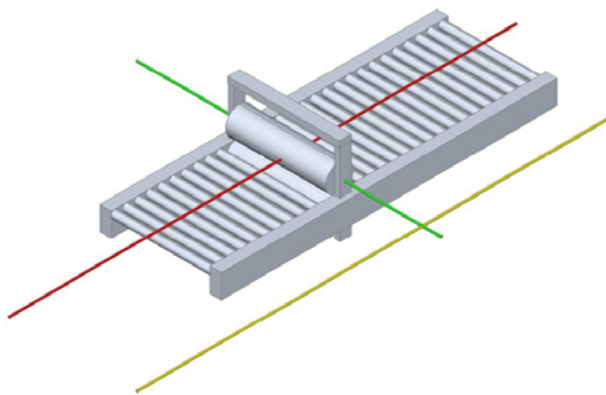
Jako příklad je uvedena válcovací stolice. Hlavní funkcí válcovací stolice je tváření materiálu za pomoci tlaku dvou a více válců, tzv. lisu (obr. 4).



Obr. 4 Princip válcovací stolice

Celá válcovací stolice se skládá z množství válců, které slouží jak k přísunu materiálu k lisu, tak k jeho odvádění. Lis je největší, nejhmotnější a nejdůležitější částí stroje. U válcovací stolice je nutné urovnat všechny válce tak, aby byly jejich podélné osy rovnoběžné. Proto, jak je výše uvedeno, zvolíme lis jako základ-

ní část, z které určíme podélnou osu celého stroje, viz obr. 5. Postup bude takový, že nejprve určíme osu lisu (zelená barva). K této ose určíme podélnou osu stroje (červená barva), tuto osu je většinou obtížné zajistit a dále z ní provádět měření. Proto zajistíme a alespoň dočasně stabilizujeme odsazenou podélnou osu žlutá barva).



Obr. 5 Určení os válcovací stolice

Na konci této části je nutné opět připomenout, že v těchto případech je nezbytná zkušenost a znalost funkce stroje. Velmi často je porušeno pravidlo pro tvorbu bodů „z velkého do malého“. Podélná osa stroje a následně celá mikrosít vzniká z příčné osy menšího strojního dílu. To znamená, že malá chyba v určení příčné osy může nepříznivě ovlivnit přesnost celé mikrosítě. Jiná možnost však neexistuje, a proto by se tyto práce měly provádět s maximální pečlivostí.

4. Přístroje a pomůcky pro měření mikrosítě

Přesnosti se ve strojírenství pohybují pod hranicí milimetru. Přesnost závisí na typu strojního zařízení v rozmezí hodnot $\pm 0,5$ až $0,05$ mm, proto je nutné používat odpovídající měřické přístroje a pomůcky. Měřič tedy může využívat posuvná měřidla pro určování délek, strojní vodováhy s citlivostí desetin až setiny mm/m pro určení výškových poměrů měřeného prvku a další strojírenská měřidla.

Pro měření geometrie zařízení jsou základní měřené veličiny délka a úhel. Pro splnění strojírenských kritérií na přesnost se zvyšují požadavky na měřené úhly a délky. V minulosti se v halách budovaly např. pozorovací pilíře na nucenou centraci. Délky pak byly měřeny pásmem nebo paralakticky a úhly pomocí vteřinových teodolitů (Zeiss Theo 010, Wild T2, apod.). Nucená centrace pak zajišťovala vysokou přesnost takto vzniklé mikrosítě. Tento způsob měření je však zastaralý, časově nemožný a v dnešním provozu z časových důvodů téměř nemožný. V současnosti se pro měření používají těžké stativy a totální stanice, které umožňují současné měření úhlů a délek.

V dnešní době se používají elektronické totální stanice, jejichž přesnost měření úhlu je $0,3$ mgon a přesnost měření délek nepřesahuje $1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ a dále přístroje označované

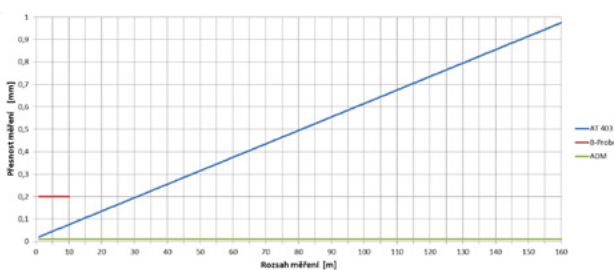
„Tracker“ s přesností měření délek $\pm 0,01$ mm. Jako příklad těchto přístrojů lze uvést přístroje firmy Leica – TDA 5005, TDRA6000, TS 30, TS 60 a Tracker AT 402 a AT403, nebo přístroj firmy Trimble S8 a přístroje společnosti Topcon MS05A-XII. Při použití totálních stanic uvedených přesností je nutné použít i vhodné odrazné hranoly, přičemž metoda pasivního odrazu do úvahy příliš nepřichází. Standardní odrazné hranoly mají přesnost centrace 2 mm (střed hranolu vůči točné ose držáku hranolu), která by degradovala přesnost měření délek. Z toho vyplývá, že je nutné použít přesnější odrazné hranoly (např. Leica GPH1P Professional s přesností 0,3 mm, nebo speciální kulové hranoly (1' nebo 1/2' palce), nebo speciální sady odražečů s přesností $\pm 0,01$ mm. Pro zvýšení přesnosti centrace je nutné zkrátit na minimum výšku odrazného hranolu nad rovinou podlahy. Kolmost hranolu je zajištěna jeho uchycením do magnetického stojanu, jehož poloha je vymezena stavěcími šrouby. Celková poloha je kontrolována dvěma na sebe kolmými libelkami. S rostoucí přesností měření ovšem roste cena veškeré měřicí techniky.

Příklad: Pokud je např. podle [6] přesnost elektronického dálkoměru Leica TDA 5005 $\pm 0,2$ mm pro délky do 120 m, pak tato hodnota odpovídá podélné odchylce σ_l daného bodu. Přesnost měření úhlů je dána výrobcem. Úhlová přesnost vysoce přesné totální stanice je 0,15 mgon. Pokud tuto hodnotu vložíme jako α do vzorce pro výpočet příčné odchylky σ_q

$$\sigma_q = \operatorname{tg} \alpha \cdot s, \quad 4.I.$$

a jako „s“ použijeme délku záměry 40 m, pak je příčná odchylka bodu 0,09 mm. Výsledná polohová odchylka je pak $\sigma_P = 0,22$ mm.

V současnosti využíváme pro geodetická měření strojů přístroj Leica Absolute Tracker AT 403, který svými parametry patří ke špičce měřicích přístrojů ve své kategorii. Dosah měření tohoto přístroje je 160 m s přesností uvedenou v následujícím obrázku 6.



Obr. 6 Přesnost určení polohy bodu (X,Y,Z) pro přístroj Leica AT403

S využitím možnosti fyzikálních redukcí, způsobu číslování a jiných funkcí měřicích přístrojů se stává měření rychlejší a geodet může získat výsledné hodnoty téměř okamžitě. Technika díky zabudovanému softwaru umožňuje využívat metodu přechodných stanovisek, transformací a vyrovnání měřených hodnot metodou nejmenších čtverců (MNC). Za pomoci těchto výpočetních metod se měření značně zjednodušuje a urychluje. Odpadá i přepočítávání určených úhlů a délek na souřadnice, protože tento krok je proveden automaticky softwarem přístro-

je. Tento mezivýpočet značně urychluje přípravné a měřické práce. Geodet tedy pracuje jen s výkresovou dokumentací a v ní určených kótách, které podle potřeby sčítá nebo odčítá.

5. Metody a přesnost měření mikrosítí

Prvním krokem při budování nové mikrosítě, případně jejího zhuštění, je rozbor projektové dokumentace. V této fázi je potřeba naplánovat rozmístění bodů mikrosítě. Umístění bodů musí splňovat v celém průběhu stavby (údržby) strojního zařízení viditelnost minimálně dvou orientací a zároveň viditelnost na měřené části stroje. Tento krok je velmi důležitý a při špatné volbě umístění s ohledem na postup prací, mohou být některé body pro další měření nevyužitelné.

Při vytyčování bodů mikrosítě bývají zpravidla všechny body vytyčeny z jednoho stanoviska polární metodou.

Po jejich stabilizaci jsou body mikrosítě znovu několikanásobně zaměřeny. Následně jsou tyto body několikanásobně zaměřeny ještě z jiného stanoviska a měřené hodnoty jsou vyrovnány MNC a vypočtou se souřadnice jednotlivých bodů mikrosítě. Pro polohové měření jednotlivých strojních částí je používána metoda přechodných stanovisek a výškové rozdíly bodů jsou určeny pomocí trigonometrického měření výšek.

Pro směrodatnou odchylku určení polohy bodu σ_{XYP} polární metodou platí podle [3] vztah:

$$\sigma_{XYP}^2 = \sigma_X^2 \cdot \left[1 + \frac{s}{d} \left(\frac{s}{d} - \cos \chi \right) \right] + \frac{1}{2} \cdot \left(\sigma_s^2 + \frac{\sigma_\chi^2}{\rho^2} \cdot s^2 \right) \quad 5.I$$

kde: σ_{XY} – směrodatná odchylka polohy bodů mikrosítě

s – vytyčovaná délka [m]

σ_s – směrodatná odchylka vytyčované délky [m]

d – vzdálenost k bodu mikrosítě [m]

χ – vytyčovaný úhel [gon]

σ_χ – směrodatná odchylka vytyčovaného úhlu [mgon]

ρ – hodnota radiánu v gonech (63662 mgon)

Když vyjádříme ze vztahu 5.I směrodatnou odchylku polohy bodu mikrosítě, pak:

$$\sigma_X^2 = \frac{d^2}{d^2 + s^2 - d \cdot s \cdot \cos \chi} \cdot \left(\sigma_{XYP}^2 - \frac{\sigma_s^2}{2} - \frac{\sigma_\chi^2 \cdot s^2}{2\rho^2} \right) \quad 5.II$$

Dosadíme-li do vzorce 5.II hodnoty pro přístroj Leica TDA 5005 a měřené hodnoty pro nejnepříznivější konfiguraci: $\sigma_s = 0,3$ mm, $\sigma_\chi = 0,3$ mgon, s = 50 m, $\chi = 200$ gon, d = 60 m, je směrodatná odchylka v poloze bodu při požadované přesnosti $\sigma_{XYP} = 1,0$ mm: $\sigma_{XY} = 0,6$ mm.

Tato hodnota by ovšem platila pro případy, kdy by se provádělo měření z bodů mikrosítě. Při použití přechodných stanovisek se výsledné souřadnice stanoviska určí z měřených hodnot transformací, včetně dosažených odchylek. Tyto odchylky by měly vyhovovat výše uvedenému kritériu pro σ_{XY} .

Celé měření mohou ovlivnit i další faktory:

- Chyby měřicího přístroje jsou u zmiňovaných typů přístrojů pro průmyslová měření velmi malé a většina lze odstranit pomocí měřicích postupů (měření ve dvou polohách), trojosých kompenzátorů, výpočtem nebo kalibrací přístroje.

- Chyby zacílení a odečtení. V dnešní době je již odečítání měřených hodnot zcela automatické a k cílení nám slouží funkce automatického cílení – ATR. Tato funkce provede automatické zacílení na odrazný hranol vždy do stejného místa, nebo dopočítá úhly ke středu odražeče.
- Vliv okolního prostředí zahrnuje vliv refrakce, který je pro záměry do 50 metrů zanedbatelný. Jeden z vlivů prostředí, s kterým se v průmyslové geodézii často setkáváme, je ovlivnění záměr tepelnými zdroji.
- Chyba z centrace přístroje se eliminuje využitím přechodných stanovisek a chyba z centrace cíle se minimalizuje speciálními pomůckami pro signalizaci cíle.

5. Závěr

Tento příspěvek popisuje měřické postupy, způsob stabilizace bodů, pomůcky a přesnost při budování mikrosítě pro geodetická měření strojních zařízení. Přesnost ustavení jednotlivých strojních částí není legislativně specifikována. Odvíjí se od doporučení výrobců nebo požadavků zadavatele. Z vlastní zkušenosti můžeme doporučit dodržování způsobů a podmínek uvedených v příspěvku pro dosažení požadované přesnosti.

Závěrem je potřeba uvést, že každý stroj je jiný a u každého stroje jsou jiné podmínky pro měření a požadavky na tvorbu mikrosítě. Proto je nutná alespoň částečná znalost funkce daného stroje a problematiky týkající se strojirenství. V opačném případě může dojít spíše ke zhoršení než k nápravě funkce strojního zařízení.

Literatura:

- [1] ČSN 730401, *Názvosloví v geodézii a kartografii*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 1990
- [2] Asociace technických diagnostiků České republiky, o. s., *Stanovy ATD ČR*, o. s., 2006
- [3] MICHALČÁK, O. and VOSIKA, O. and VESELÝ, M. and NOVÁK, Z. *Inžinierska geodézia I*, Nakladateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava, 1985, 408 s.
- [4] *Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí*, VÚGTK Praha-Zdiby. Dostupné z: <http://www.vugtk.cz/slovník/index.php>
- [5] POSPÍŠILOVÁ, L. and POSPÍŠIL, J. and STAŇKOVÁ, H. *MICRO-NETWORK CREATION IN INDUSTRIAL SURVEYING*. In: *Geodesy and Cartography* [online]. 2012, 38(2), 70-74 [cit. 2019-02-12]. DOI: 10.3846/20296991.2012.692216. ISSN 2029-6991. Dostupné z: <https://journals.vgtu.lt/index.php/GAC/article/view/4743>
- [6] Leica Geosystems AG, *Leica Industrial Theodolites and Total Stations*, vid. 10. 02. 2019]. Dostupné z: https://w3.leica-geosystems.com/media/new/product_solution/L3_TDA5005.pdf

Recenzent

Mgr. Šeremeta Marek, LAMI KAPPA, spol. s r. o., Teplice; osoba certifikovaná na funkci Technik diagnostik montážních a optických měření – Kategorie III



Rittal – The System.

Faster – better – everywhere.

► Rittal Automatizační systémy Automatizace ve zpracování vodičů



Stroje pro konfekcionování vodičů od společnosti Rittal.
Kombinace rychlosti s vynikající přesností opakování.

Rittal Automatizační systémy – veškeré
informace naleznete na www.rittal.cz

ROZVÁDĚČE

ROZVOD PROUDU

KLIMATIZACE

IT INFRASTRUKTURA

SOFTWARE & SLUŽBY





LIGHTING MANAGEMENT

řízení osvětlení bez programování

Systém **LIGHTING MANAGEMENT** v sobě kombinuje robustní hardware s uživatelsky přívětivým softwarem a usnadňuje návrh, uvádění do provozu i samotný provoz velkých osvětlovacích systémů.

V nové verzi lze integrovat KNX tlačítka a senzory se specifikací DALI-2.

Další novinkou je možnost řízení teploty chromatičnosti jednotlivých svítidel. To umožňuje vytvořit vhodné prostředí pro uživatele a jeho biorytmy.

Řešení Lighting Management dále podporuje připojení nouzových svítidel s jejich následnou správou a testy funkčnosti.



www.wago.com/cz/lighting-management

WAGO