

**2**  
**2007**

# JMMO

**JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA**  
**FINE MECHANICS AND OPTICS**

**zaostřeno na optiku**



**13. mezinárodní veletrh oční optiky,  
optometrie a oftalmologie**

**Brno – Výstaviště**

**23–25. 2.**

**2007**

[www.bvv.cz/opta](http://www.bvv.cz/opta)

Central European  
Exhibition Centre



BVV Veletrhy Brno  
Výstaviště 1  
647 00 Brno  
Tel.: 541 152 818  
Fax: 541 153 063  
E-mail: [opta@bvv.cz](mailto:opta@bvv.cz)  
[www.bvv.cz/opta](http://www.bvv.cz/opta)

BVV   
Veletrhy  
Brno



**IWA 2007**  
& Outdoor Classics

**Norimberk, Německo**  
**9. - 12. 3. 2007**

**34. mezinárodní veletrh loveckých a sportovních zbraní,  
vybavení a doplňků.**



**meopta**

**Meopta - optika, s. r. o.**  
**vystavuje v hale 2, stánek č. 513**  
**dalekohledy pro zájmovou činnost a volný čas**

## REDAKČNÍ RADA

**Předseda:** RNDr. Miloslav VYCHODIL, CSc., Meopta-optika, s.r.o., Přerov

**Členové:** RNDr. Ing. Ján BARTL, CSc., ÚM SAV, Bratislava, doc. Dr. RNDr. Zdeněk BOUČHAL, UP, Olomouc, Ing. Igor BREZINA, Bratislava, Ing. Jan DUPÁK, CSc., ÚPT AV ČR, Brno, prof. Ing. Pavol HORŇÁK, DrSc., STU, Bratislava, prof. RNDr. Miroslav HRABOVSKÝ, DrSc., SLO UP a FZÚ AV ČR, Olomouc, RNDr. Vladimír CHLUP, Olomouc, RNDr. Lubomír JASTRABÍK, CSc., FZÚ AV ČR, Praha, RNDr. Karol KAROVIČ, DrSc., ÚM SAV, Bratislava, RNDr. Pavel KLENOVSKÝ, Český metrologický institut, Brno, RNDr. Josef KRÁSA, CSc., FZÚ AV ČR, Praha, Ing. Jiří KRŠEK, VUT, Brno, doc. RNDr. Vojtěch KŘESÁLEK, CSc., UTB, Zlín, Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno, doc. Ing. Martin LIBRA, CSc., ČZU, PRAHA, prof. RNDr. Miroslav LIŠKA, DrSc., VUT, Brno, RNDr. Zdeněk LOŠŤÁK, Meopta-optika, s.r.o., Přerov, prof. Ing. Petr LOUDA, CSc., TU, Liberec, Ing. Vladimír MATELA, Meopta-optika, s.r.o., Přerov, Ing. Monika MÍČHALOVÁ, PHILIPS Slovakia s.r.o., Bratislava, doc. RNDr. Miroslav MILER, DrSc., ÚFE AV ČR, v.v.i., Praha, prof. RNDr. Jan PEŘINA, DrSc., UP, Olomouc, prof. Ing. Jaromír PIŠTORA, CSc., VŠB - TU, Ostrava, prof. RNDr. Ing. Jaroslav POSPÍŠIL, DrSc., UP, Olomouc, Jan ŘÍDKÝ, CSc., FZÚ AV ČR, Praha, RNDr. Dagmar SENDEŘÁKOVÁ, Ph.D., UK, Bratislava, prof. Ing. Karel STUDENOVSKÝ, DrSc., ČVUT, Praha, prof. RNDr. Anton ŠTRBA, CSc., UK, Bratislava

Gerd HÄUSLER, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen - Nürnberg, Erlangen (Germany), Michael J. LALOR, Liverpool John Moores University, U. K.; Paul RAUSNITZ, TCI New York, U. S. A.; Rodney J. SOUKUP, University of Nebraska-Lincoln, U. S. A.; M. C. TEICH, Boston University, U. S. A.; Emil WOLF, University of Rochester, U. S. A.

## JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

Vydává Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, v.v.i. za spoluúčasti The International Society for Optical Engineering (SPIE/CS) v Nakladatelství Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky, v.v.i.

**Ředitel FZÚ AV ČR:** Ing. Karel JUNGWIRTH, DrSc.

**Odpovědný zástupce vydavatele:** Jan ŘÍDKÝ, CSc.

**Šéfredaktor:** dipl. tech. Jaroslav NEVŘALA

**Adresa redakce v Olomouci** (předplatné, nakladatelské služby):

SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc,  
tel.: 585 631 576, fax: 585 631 531, e-mail: pelclova@optnw.upol.cz

**Adresa redakce v Přerově** (šéfredaktor): Kabelíkova 1, 750 02 Přerov,  
tel.: 581 242 151, mobil: 776 011 925, fax: 581 242 222.

Otisk povolen se svolením redakce a se zachováním autorských práv. Nevyžádané materiály se nevrací. Za původnost a správnost příspěvků odpovídají autoři.

**Předplatné:** Celoroční 420,- Kč/rok. Ceny jsou jednotné pro Českou i Slovenskou republiku. Do všech ostatních zemí je časopis JMO distribuován za jednotnou cenu 10 EUR/ks. Pro členy SPIE/CS činí předplatné 120,- Kč/rok. Předplatné pro studenty Bc., Mgr., Ph.D. a studenty středních škol při osobním odběru činí 120 Kč/rok; v případě zaslání poštou 300,- Kč/rok.

**Rozšiřuje** vydavatel a Podniková prodejna Meopta-optika, s.r.o., Přerov, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov.

**V Slovenské republice je kontaktní místo:** prof. RNDr. Anton Štrba, CSc., katedra experimentální fyziky FMFI UK, Mlynská dolina F2/148, SK - 842 48 Bratislava, tel.: 00421 2 65 426 706,  
e-mail: Strba@fmph.uniba.sk

**V Slovenské republice rozšiřuje a objednávky přijímá:**

prof. Ing. Ivo Čáp, CSc., Žilinská univerzita - FPV, Hurbanova 15,  
SK - 010 26 Žilina, tel.: +421 415 136 350, e-mail: ivo.cap@fpv.utc.sk

**Tiskne** TYPoServis Holešov, Masarykova 650, 769 01 Holešov,  
tel.: 573 398 746, e-mail: dtp@typoservis.cz

**Inzerce:** redakce, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov,  
tel.: 581 242 151, mobil: 776 011 925, fax: 581 242 222.

Odborné články jsou lektorovány.

© JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA 2007

# JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS  
ROČNÍK 52

2/2007

## OBSAH

- Využití dvourozměrné a trojrozměrné optické analýzy slepé skvrny sítnice v diagnostice glaukomu**  
(F. Pluháček, J. Pospíšil, T. Kuběna) .....31
- Studium optometrie v roce 2006** (J. Wagner, F. Pluháček) .....35
- Veletrh OPTA v Brně** (V. Malíšek) .....36
- Polarizační optický reflektometer pro vláknové senzory s rozloženými parametry**  
(M. Hlaváč, J. Jasenek, J. Červeňová) .....37
- Úprava elipsometru Gaertner L119 a jeho použití pro studium tenkých vrstev** (M. Lesňák, J. Luňáček, A. Talik, P. Hlubina, J. Pištora) .....40
- OCULUS: špičková technika pro optiky i oftalmology**  
(J. Šandera) .....42
- Aktuálně o fotovoltaice** (M. Libra, V. Poulek) .....43
- Vyhodnocování funkce přenosu modulace digitální videokamery pomocí spektrální hustoty výkonu reflexního náhodného testu a jeho obrazu**  
(J. Pospíšil, P. Jakubík, F. Pluháček) .....45
- Štatistické hodnotenie kvality povrchu hliníka pri delení abrazívnym vodným prúdom** (S. Hloch, J. Valíček) .....51
- Jurij Nikolajevič Děnisjuk, druhý ze dvou zakladatelů moderní holografie, zemřel** (M. Miler) .....55
- Na paměť Emmetta Leithe a Jurije Děnisjuka** (M. Miler) .....56
- Zveme Vás do PVA Letňany na veletrhy FOR INDUSTRY a FOR SURFACE...** .....57
- Světově největší CeBIT v Hannoveru** (jpe) .....58
- Prezentace firem a odborné přednášky na veletrhu OPTA 2007** (M. Strítecký) .....58
- Obsah časopisu Jemná mechanika a optika je uveden na internetu: <http://jmo.fzu.cz>

Informace o předplatném podá, objednávky přijímá, objednávky do zahraničí vyřizuje: SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 223 936, fax: 585 631 531.

Cena čísla 40 Kč včetně DPH

## ADVISORY BOARD

**Chairman:** Miloslav VYCHODIL - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.)

**Members:** Ján BARTL - Inst. of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, Bratislava (Slovak Rep.), Zdeněk BOUCHAL - Palacky Univ. (Czech Rep.), Igor BREZINA - Bratislava (Slovak Rep.), Jan DUPÁK - Inst. of Scientific Instruments of Czech Academy of Science, Brno (Czech Rep.), Pavol HORŇÁK - Slovak Tech. Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav HRABOVSKÝ - Joint Lab. of Optics of Palacky Univ. and Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Olomouc (Czech Rep.), Vladimír CHLUP - Olomouc (Czech Rep.), Lubomír JASTRABÍK - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Karol KAROVIČ - Inst. of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, Bratislava (Slovak Rep.), Pavel KLENOVSKÝ - Czech Metrology Inst., Brno (Czech Rep.), Josef KRÁSA - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Jiří KRŠEK - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Vojtěch KRŠÁLEK - Tomas Bata Univ. in Zlín (Czech Rep.), Ing. Jan KŮR, Mesing, spol. s r.o., Brno (Czech Rep.), Martin LIBRA - Czech Univ. of Agric, Praha (Czech Rep.), Miroslav LIŠKA - Tech. Univ., Brno (Czech Rep.), Zdeněk LOŠŤÁK - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Petr LOUDA - Tech. Univ., Liberec (Czech Rep.), Vladimír MATELA - Meopta-optika, s.r.o., Přerov (Czech Rep.), Ing. Monika MÍČHALOVÁ, PHILIPS Slovakia s.r.o., Bratislava (Slovak Rep.), Miroslav MILER - Inst. of Photonics and Electronics of Academy of Sciences, v.v.i., Praha (Czech Rep.) Jan PEŘINA - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Jaromír PIŠTORA - Tech. Univ., Ostrava (Czech Rep.), Jaroslav POSPÍŠIL - Palacky Univ., Olomouc (Czech Rep.), Jan ŘÍDKÝ - Inst. of Physics of Czech Academy of Science, Praha (Czech Rep.), Dagmar SENDEŘÁKOVÁ - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.), Karel STUDENOVSKÝ - Czech Tech. Univ., Praha (Czech Rep.), Anton ŠTRBA - Comenius Univ., Bratislava (Slovak Rep.),

Gerd HÄUSLER, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen - Nürnberg, Erlangen (Germany), Michael J. LALOR, Liverpool John Moores University, U. K.; Paul RAUSNITZ, TCI New York, U. S. A.; Rodney J. SOUKUP, University of Nebraska-Lincoln, U. S. A.; M. C. TEICH, Boston University, U. S. A.; Emil WOLF, University of Rochester, U. S. A.

## FINE MECHANICS AND OPTICS

Published by Institute of Physics Academy of Sciences of the Czech Republic under participation of The International Society for Optical Engineering (SPIE/CS) in the Publishing House of the Institute of Physics of the Academy of Sciences of the Czech Republic.

**Director of Institute of Physics, Academy of Sciences of the Czech Republic:** Karel JUNGWIRTH

**Editor:** Jan ŘÍDKÝ

**Managing Editor:** Jaroslav NEVŘALA

**Address of the Editor's office in Olomouc** (subscription, publisher services): SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, Czech Republic, phone: ++420 585 631 576, fax: ++420 585 631 531, e-mail: pelclovea@optnw.upol.cz

**Address of the Editor's office in Přerov** (Managing Editor):

Kabelíkova 1, 750 02 Přerov, Czech Republic.

Reproduction only with permission of the Editor and under observing the copyright. Unasked manuscripts are not sent back. The authors are responsible for originality and correctness of their contributions.

**Subscription fee:** Annual fee is 420,- CZK. This price of subscription is the same for both Czech and Slovak Republics. Fine Mechanics and Optics journal is distributed into other countries for uniform price 10 EUR/Pcs. For members of SPIE/CS the annual subscription fee is 120,- CZK. For Bc., Mgr., Ph.D. and secondary school students the subscription fee is 120,- CZK per year, annual subscription including postage is 300,- CZK.

**Distribution:** by the Publisher, Company Sales shop of Meopta-optika, s.r.o., Přerov, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov, Czech Republic.

**Contact place for the Slovak Republic:** Anton Štrba, Department of Experimental Physics, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Mlynská dolina F2/148, SK - 842 15 Bratislava, phone: 00421 2 65 426 706, e-mail: strba@fmph.uniba.sk

**Printing:** TYPOServis Holešov, Masarykova 650, CZ-769 01 Holešov, phone: 573 398 746 (from abroad: ++420 573 398 746). e-mail: dtp@typoservis.cz

**Advertising:** editor's office, Kabelíkova 1, CZ-750 02 Přerov, fax: 581 242 222.

Papers are reviewed.

© FINE MECHANICS AND OPTICS 2007

# FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL

VOLUME 52

2/2007

## CONTENTS

- Utilization of two- and three-dimensional optical analysis of the human eye optic disc in glaucoma diagnostics** (F. Pluháček, J. Pospíšil, T. Kuběna) .....31
- Optometry study in 2006** (J. Wagner, F. Pluháček) .....35
- Trade fair OPTA in Brno** (V. Malíšek) .....36
- Polarisation optical reflectometer for fiber sensors with distributed parameters** (M. Hlaváč, J. Jasenek, J. Červeňová) .....37
- The modification of Gaertner L119 ellipsometer and its use for thin-film structures study** (M. Lesňák, J. Luňáček, A. Talik, P. Hlubina, J. Pištora) .....40
- OCULUS: Advanced technology for opticians and ophthalmologists** (J. Šandera) .....42
- Actualities in photovoltaics** (M. Libra, V. Poulek) .....43
- Evaluation of the modulation transfer function of a digital video-camera by means of the power spectral density of a reflection random chart and its image** (J. Pospíšil, P. Jakubik, F. Pluháček) .....45
- Aluminium surface quality statistical evaluation at abrasive waterjet cutting** (S. Hloch, J. Valíček) .....51
- Yuri Nikolaevich Denisyuk, the second one from two founders of modern holography, passed away** (M. Miler) .....55
- In Memory of Emmett Leith and Yuri Denisyuk** (M. Miler) .....56
- You are invited to PVA Letnany fair FOR INDUSTRY and FOR SURFACE** .....57
- Worldwide largest CeBIT in Hannover** (jpe) .....58
- Trade fair OPTA 2007 presents companies and specialized lectures** (M. Střítecký) .....58
- You can also find the contents of the Journal on Internet:  
<http://jmo.fzu.cz>

Information on subscription rate and on ordering gives the SLO UP a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50, 772 07 Olomouc, tel.: 585 223 936, fax: 585 631 531.

Price for single copy: 40 Kč incl. VAT

# Využití dvourozměrné a trojrozměrné optické analýzy slepé skvrny sítnice v diagnostice glaukomu

*Změny ve slepé skvrně (papile) sítnice lidského oka patří mezi první příznaky glaukomu (zeleného zákalu). Jejich detekce a vhodná numerická reprezentace je možná na základě vyhodnocení dvourozměrných obrazových nebo trojrozměrných topografických dat získaných vhodným optickým snímáním papily a jejího nejbližšího okolí. Článek poskytuje popis dvou konkrétních metod: nově navržené metody obrazové analýzy barevných digitálních snímků papily pro detekci jasových a barevných glaukomových změn v papile a známé metody laserové skenovací tomografie pro sledování topografických změn papily. Těžištěm článku je srovnání diagnostické spolehlivosti odpovídajících číselných parametrů, charakterizujících glaukomové změny papily v případě jednotlivých metod. Za tímto účelem jsou obě metody aplikovány na soubor celkem 480 zdravých a glaukomových očí.*

## 1. ÚVOD

Glaukom (zelený zákal) je závažné oční onemocnění, které se projevuje zejména typickými změnami na očním pozadí, změnami v zorném poli postiženého oka a případně zvýšeným nitroočním tlakem [1, 2]. V průběhu této choroby dochází k nevratnému poškození vrstvy nervových vláken na sítnici, kterými je veden zrakový signál od fotoreceptorů dále do mozku, a následně k trvalému poškození zorného pole. Ve slepé skvrně sítnice (papile) lze při glaukomu pozorovat chorobné rozšiřování centrální prohlubně (exkavace) a její nabledlé části (tzv. nablednutí). Exkavace představuje oblast papily, kterou do oka vstupují či vystupují cévy a nervová vlákna zrakové dráhy, nablednutí je oblast exkavace s absencí nervových vláken.

Objektivní sledování a vhodný číselný popis těchto topografických, barevných a jasových změn je účinným nástrojem v diagnostice glaukomu. Změny barvy a jasu v papile lze vyhodnocovat a odpovídajícím způsobem numericky reprezentovat (například ve formě relativní velikosti oblasti nablednutí) pomocí digitálního optického (dvourozměrného) snímání papily a následného počítačového zpracování získaných digitálních barevných snímků. Za tímto účelem jsme navrhli, realizovali a ověřili novou metodu obrazové analýzy takovýchto snímků papily. Některé námi navržené postupy pro následné automatické diagnostické vyhodnocení odpovídajících číselných parametrů oblasti nablednutí byly diskutovány v publikacích [3, 4]. Topografická (trojrozměrná) analýza papily a numerický popis její exkavace vychází z rozboru příslušné trojrozměrné mapy, která je obvykle vytvořena metodou laserové skenovací tomografie (LST) [5-7]. Uvedené postupy vyhodnocení a numerické reprezentace oblasti nablednutí a exkavace jsme aplikovali na soubor celkem 480 zdravých a glaukomových očí. Na základě porovnání získaných statistických rozdílů příslušných numerických parametrů je v článku diskutována jejich diagnostická spolehlivost.

## 2. POUŽITÉ METODY ANALÝZY GLAUKOMOVÝCH SYMPTOMŮ V PAPILE

### 2.1 Dvourozměrná analýza a odpovídající numerický popis papily

Barevné a jasové změny v papile lze numericky charakterizovat poměrem P/D reprezentační oblasti nablednutí a reprezentační oblasti papily. Pro potřeby našeho výzkumu byly potřebné reprezentační oblasti získány vhodně zvolenými postupy obrazové analýzy aplikovanými na barevné digitální snímky papily. K pořízení

odpovídajících snímků sloužila barevná digitální videokamera s rozlišením 576 x 768 pixelů propojená s adaptovaným fotografickým systémem Retinofot Carl Zeiss Jena 201, viz [4]. Skutečná velikost snímané oblasti byla přibližně 5,8 mm x 4,4 mm. Fotografický systém byl orientován vždy tak, že řádky získané obrazové matice odpovídaly horizontálnímu směru. Jasové hodnoty každé z odpovídajících tří barevných složek (červené, modré a zelené) byly standardně kvantizovány do 256 úrovní od 0 do 255. Hodnota 0 představuje minimální (nulový) jas a hodnota 255 odpovídá maximálnímu jasů dané barevné složky.

Reprezentační oblast papily byla na snímku vymezena hraniční elipsou o malé excentricitě, proložené pěti pomocnými body manuálně vybranými zkušeným operátorem. Experimenty prokázaly, že pro detekci oblasti nablednutí je nejvhodnější zelená G složka barevného snímku [4]. Její jas  $G$  však nežádoucně závisí na osvětlení papily při snímání a vykazuje rozdílné hodnoty v různých periferních oblastech papily. Z těchto důvodů byla každá uvažovaná jasová hodnota  $G(u, v)$  obrazového bodu  $(u, v)$ , umístěného na průsečíku  $u$ -tého řádku a  $v$ -tého sloupce obrazové matice, vhodně normalizována na novou hodnotu  $G'_n(u, v)$  pomocí akceptovatelné relace

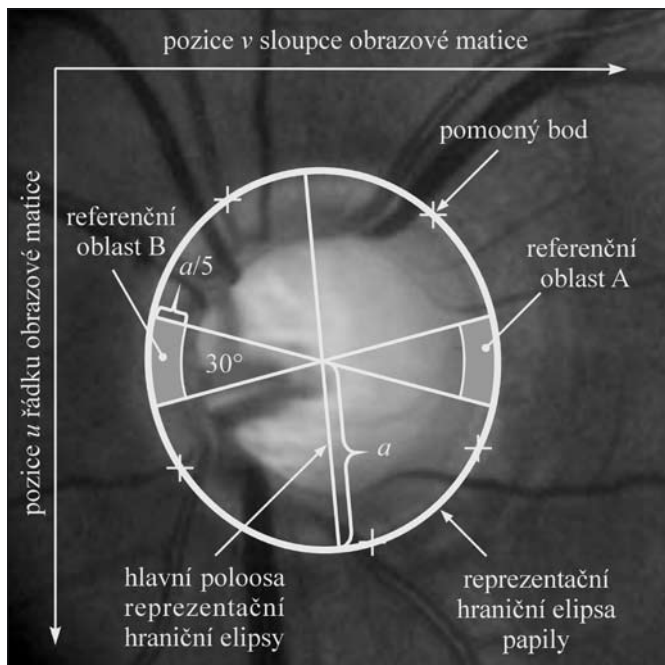
$$G'_n(u, v) = \frac{2G(u, v)}{G_A + G_B} - G_{An} - \frac{G_{Bn} - G_{An}}{\bar{v}_B - \bar{v}_A} (v - \bar{v}_A), \quad (1)$$

kde

$$G_{An}(u, v) = \frac{2G_A(u, v)}{G_A + G_B}, \quad G_{Bn}(u, v) = \frac{2G_B(u, v)}{G_A + G_B}. \quad (2)$$

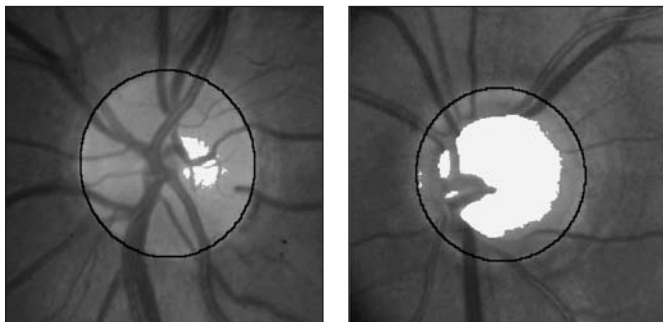
Uvedené hodnoty  $G_A$  a  $G_B$  byly definovány jako hodnoty zelené složky snímku s nejvyšší četností výskytu v pixelech referenčních oblastí A a B. Oblasti A a B představují temporálně (směrem od nosu) a nazálně (směrem k nosu) umístěné hraniční oblasti reprezentační plochy papily o úhlovém rozsahu  $30^\circ$  a šířce rovné jedné pětině velikosti hlavní poloosy  $a$  hraniční elipsy, viz obr. 1. Takto definované oblasti A, B jsou požadovaně minimálně ovlivněny progresí glaukomu. Další použité veličiny  $\bar{v}_A$  a  $\bar{v}_B$  představují průměrné hodnoty sloupcového indexu v pixelech oblastí A a B.

Reprezentační oblast nablednutí papily byla definována jako oblast snímku uvnitř hraniční elipsy, kde normalizovaná hodnota jasu  $G'_n$  byla větší nebo rovna vhodně zvolené prahové hodnotě  $p$ .



Obr. 1 Hraniční elipsa papily a referenční oblasti A a B

V našem výzkumu byla uvažována empiricky stanovená optimální hodnota  $p = 0,2$ . Obr. 2 ukazuje příklad snímku zdravé normální papily (vlevo) a glaukomové papily (vpravo) s odpovídající zanedbatelně malou a výrazně rozsáhlou oblastí nablednutí. Vyznačené hraniční elipsy definují reprezentační oblast papily.



Obr. 2 Příklad snímku normální zdravé papily (vlevo) a glaukomové papily (vpravo) s odpovídající zanedbatelně malou a výrazně rozsáhlou oblastí nablednutí. Reprezentační oblast papily je vymezena hraniční elipsou

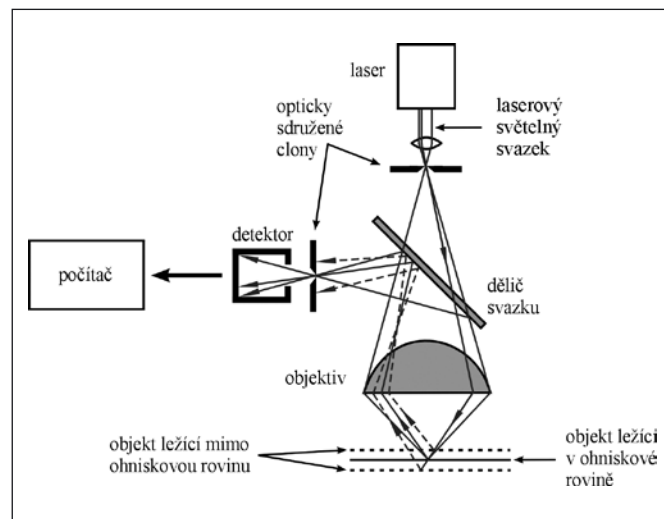
## 2.2 Trojrozměrná analýza a odpovídající numerický popis papily

Glaukomové topografické změny v papile jsou obvykle detekovány na základě vyhodnocení relativní velikosti exkavace. Rozsah exkavace byl numericky standardně popsán veličinou C/D, která představuje poměr reprezentační plochy exkavace a reprezentační plochy papily na snímku. Potřebné reprezentační oblasti byly stanoveny analýzou trojrozměrné mapy papily. Pro vytvoření této mapy byla použita metoda laserové skenovací tomografie (LST) [5-7] realizovaná prostřednictvím Heidelberského retinálního (sítnicového) tomografu [6, 7].

Laserový skenovací tomograf pracuje na principu automatických a krátce po sobě následujících posuvů ohniskové roviny jeho optické soustavy o přesně stanovenou vzdálenost (celkem se jednalo o 64 pozic) realizovaných ve směru jeho optické osy. V každé poloze ohniskové roviny zmíněná optická soustava postupně bod po bodu vhodným laserovým světlem osvětluje snímanou papilu tak, že posouvá své ohnisko v dané ohniskové rovině ve směru

kolmém ke své optické ose. Snímaná oblast byla standardně rozdělena na  $384 \times 384$  bodů, jako světelný zdroj sloužil diodový laser o dominantní vlnové délce 670 nm emitovaného světla o vhodně voleném optickém výkonu. Současně se odpovídajícím detektorem zaznamenávala optická intenzita světelného svazku odraženého od právě snímaného bodu papily. V optické soustavě přístroje, schematicky zobrazené na obr. 3, byly použity dvě velmi malé opticky sdružené clony, umístěné před laserovým zdrojem a před detektorem optického záření. Vlivem jejich vhodného uspořádání nebylo světlo odražené od snímaného bodu papily ležícího mimo ohniskovou rovinu přístroje fokusováno do detektoru a jeho detekovaná optická intenzita byla žádoucně výrazně nižší než detekovaná optická intenzita záření odraženého od bodu ležícího v ohniskové rovině. Osová poloha  $z$  (poloha na optické ose snímacího zařízení) každého snímaného bodu byla stanovena jako poloha maxima matematické křivky proložené grafem závislosti v tomto bodě detekované optické intenzity na osově poloze ohniskové roviny pro všech 64 uvažovaných poloh ohniskové roviny. Ze získaných dat byla stanovena trojrozměrná mapa vyšetřované papily, popisující závislost osově polohy  $z$  každého snímaného bodu na jeho poloze  $(x, y)$  ve vhodně zvolené referenční rovině.

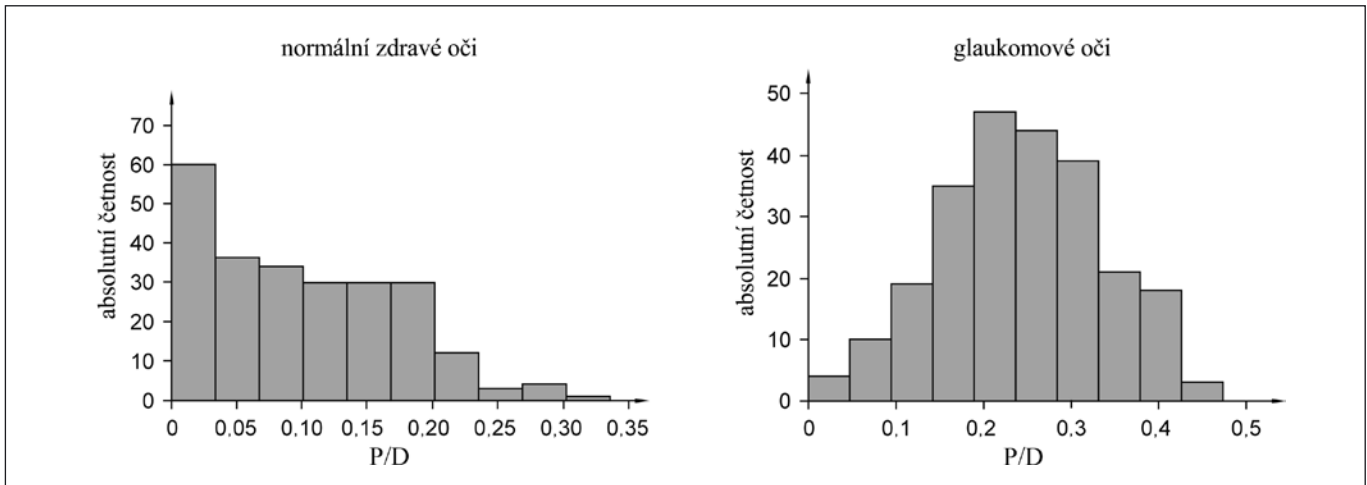
Rovinná reprezentační hranice papily v referenční rovině byla aproximována hladkou křivkou, proloženou operátorem zvolenými pomocnými body v referenční rovině. Reprezentační oblast exkavace byla definována jako pravouhlý průmět do referenční roviny té části trojrozměrné mapy papily, která se nacházela v hloubce větší nebo rovné konvenční hodnotě  $h = 50 \mu\text{m}$  pod referenční rovinou. Zavedená veličina  $h$  popisuje průměrnou hloubku (vzhledem k referenční rovině) pomocného sektoru o úhlovém rozsahu  $4^\circ$  v nasální části reprezentační hranice papily.



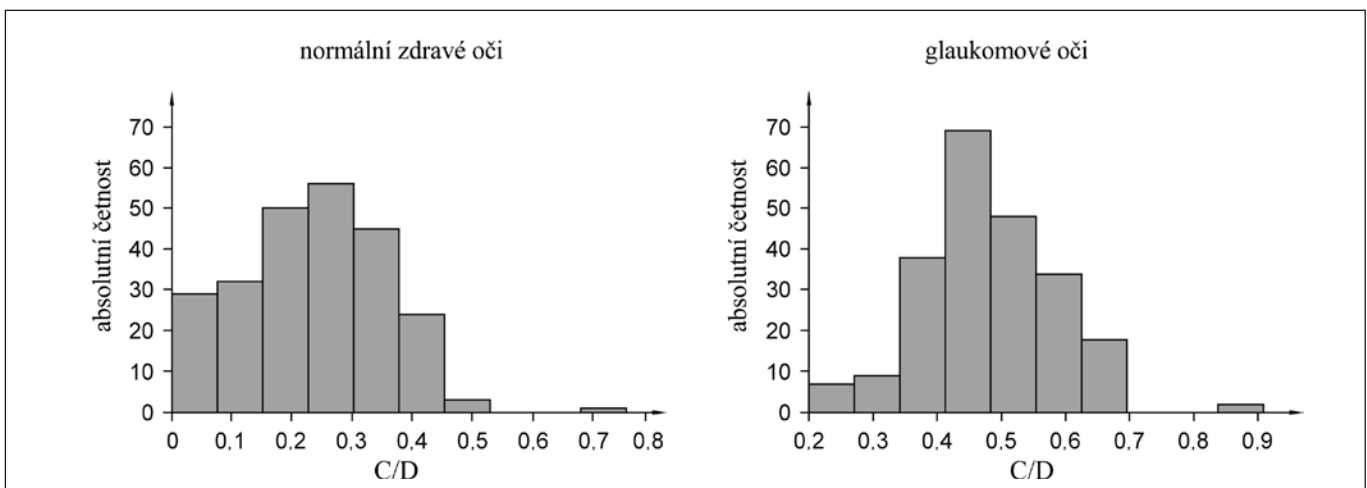
Obr. 3 Optický systém LST

## 3. SROVNÁNÍ DIAGNOSTICKÉ SPOLEHLIVOSTI

Obě výše popsané metody byly aplikovány na soubor očí 120 normálních zdravých jedinců a 120 jedinců s glaukomem. U každého jedince byly vyšetřovány vždy obě oči. Věk uvažovaných normálních zdravých jedinců se pohyboval v intervalu od 14 do 76 let s průměrem 46 let a směrodatnou odchylkou 13 let. Jedinci s glaukomem měli věk od 10 do 82 let, jejich průměrný věk činil 51 let a směrodatná odchylka byla 16 let. Diagnóza byla určena na základě subjektivního vyhodnocení nezávislého vyšetření nitroočního tlaku, zorného pole, rozšíření exkavace metodou LST a tloušťky vrstvy nervových vláken sítnice. Všechna diagnostická vyšetření byla provedena jediným oftalmologem. Výsledná získaná statistická rozdělení P/D a C/D poměrů jsou reprezentována na obr. 4 a obr. 5 ve formě příslušných histogramů.



Obr. 4 Histogramy statistického rozdělení P/D poměrů v případě normálních zdravých očí (vlevo) a očí postižených glaukomem (vpravo)



Obr. 5 Histogramy statistického rozdělení C/D poměrů v případě normálních zdravých očí (vlevo) a očí postižených glaukomem (vpravo)

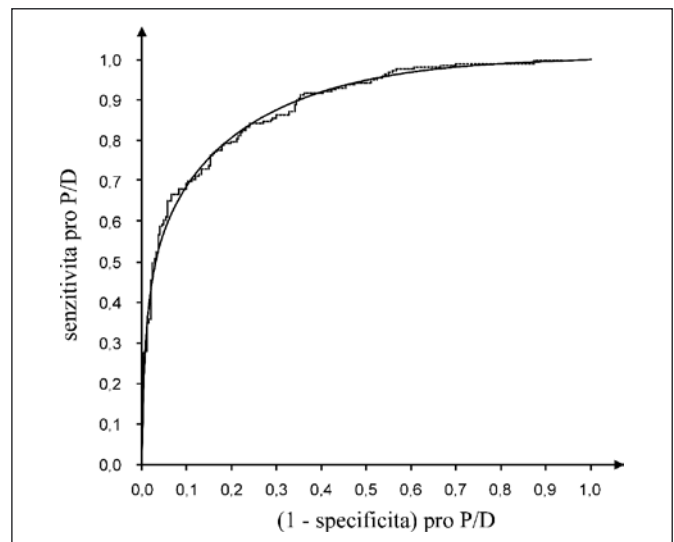
Srovnání P/D i C/D poměrů z hlediska jejich diagnostické využitelnosti může být provedeno na základě analýzy jejich získaných statistických rozdělení. Odpovídající průměrné hodnoty P/D pro normální zdravé a pro glaukomové oči byly 0,10 a 0,24 se směrodatnými odchylkami 0,07 a 0,09. V případě statistických rozdělení C/D vedly výpočty k průměrným hodnotám 0,23 pro normální zdravé oči a 0,50 pro glaukomové oči, směrodatná odchylka byla v obou případech 0,12. Uvedené výsledky potvrzují vliv glaukomu na oba uvažované poměry. Podrobnější srovnání lze provést pomocí vhodně definované normalizované charakteristické vzdálenosti  $d$  odpovídajících náhodných rozdělení (histogramů) pro normální a glaukomové oči nebo pomocí odpovídajících tzv. ROC (receiver operating characteristic) křivek.

Požadovanou normalizovanou vzdálenost  $d$  rozdělení P/D nebo C/D lze v souladu s publikacemi [4, 8, 9] definovat vztahem

$$d = \frac{|\bar{t}_h - \bar{t}_g|}{\left[ \frac{\sigma_h^2 + \sigma_g^2}{2} \right]^{1/2}} \quad (3)$$

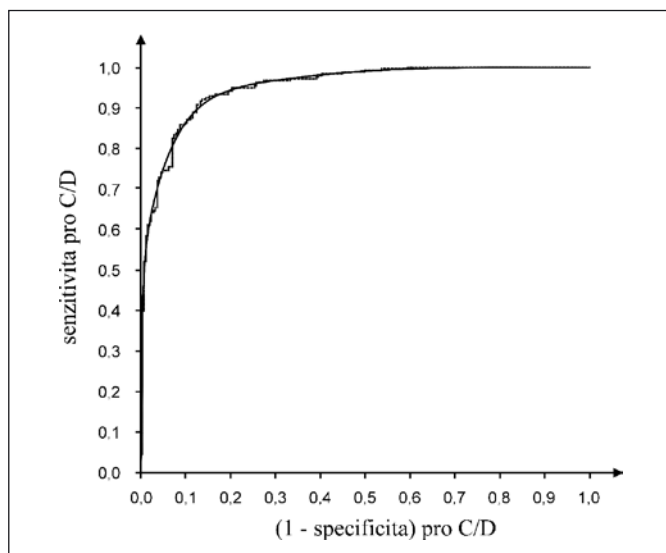
Zavedené charakteristické veličiny  $\bar{t}_h$ ,  $\bar{t}_g$  a  $\sigma_h$ ,  $\sigma_g$  reprezentují průměrné hodnoty a směrodatné odchylky statistických rozdělení veličiny P/D, případně C/D, vztahující se ke zdravým a glaukomovým očím. Vyšší hodnota  $d$  svědčí o vyšší diagnostické spolehlivosti. Ze získaných dat byly stanoveny hodnoty  $d = 1,73$  pro P/D a  $d = 2,19$  pro C/D.

Vyšetřované oko lze též diagnosticky testovat na základě srovnání hodnot C/D, respektive P/D poměrů s vhodně zvolenou prahovou parametrickou hodnotou  $t_{P/D}$ , respektive  $t_{C/D}$ . Pokud leží hodnota příslušného poměru pod, případně nad prahovou hodnotou,



Obr. 6 ROC křivka pro P/D poměr aproximovaná hladkou křivkou (plná čára) vztahující se k získaným experimentálním datům (body)

je oko klasifikováno jako zdravé (a výsledek testu označujeme za negativní), případně postižené glaukomem (pozitivní výsledek testu). Pro každou hodnotu parametru  $t_{P/D}$  nebo  $t_{C/D}$  vykazuje popsaný test příslušnou senzitivitu (správnou pozitivitu) a specifitu [10]. Senzitivita je dána pravděpodobností, se kterou může být test pozitivní pro glaukomové oko. Naopak specifita je rovna pravděpodobnosti negativního testu u zdravého oka. Test lze dále popsat veličinou  $(1 - \text{specifita})$  označovanou též jako falešná pozitivita, která reprezentuje pravděpodobnost pozitivního výsledku testu u glaukomového oka. Závislost senzitivity na  $(1 - \text{specifitě})$  je známá jako ROC křivka [10]. ROC křivky (plná čára) vztahující se k experimentálně získaným datům (body) prezentují obr. 6 pro P/D a obr. 7 pro C/D. Numerické srovnání studovaných poměrů P/D a C/D může být konvenčně provedeno na základě srovnání plochy pod příslušnými ROC křivkami. Přitom větší oblast pod křivkou odpovídá vyšší diagnostické spolehlivosti. Získané velikosti ploch pod sestavenými křivkami činily 0,89 pro P/D poměr a 0,95 pro C/D poměr.



Obr. 7 ROC křivka pro C/D poměr aproximovaná hladkou křivkou (plná čára) vztahující se k získaným experimentálním datům (body)

#### 4. ZÁVĚR

V článku jsou popsány dva různé objektivní přístupy k analýze slepé skvrny (papily) lidské oční sítnice a následně je srovnána jejich spolehlivost v diagnostice glaukomu. Jedná se o nově navrženou metodu dvourozměrné obrazové analýzy a známou metodou trojrozměrné analýzy papily. Metoda obrazové analýzy papily je založena na vhodném počítačovém algoritmu číselného zpracování barevného digitálního snímku papily, který umožňuje objektivní vymezení reprezentační oblasti nablednutí. Pro diagnostické účely byla oblast nablednutí číselně reprezentována relativní veličinou (poměrem) P/D. Trojrozměrná analýza papily a její exkavace vycházejí z konstrukce a vyhodnocení odpovídající trojrozměrné mapy.

Požadovaná mapa byla získána metodou laserové skenovací tomografie. Exkavace byla standardně číselně reprezentována poměrem C/D. Oba parametry byly stanoveny pro soubor 240 normálních zdravých a 240 glaukomových očí. Srovnání diagnostické spolehlivosti parametrů P/D a C/D bylo provedeno porovnáním definované normalizované vzdálenosti získaných statistických rozdělů a rozbořem příslušných ROC křivek. Získané výsledky ukázaly, že oba uvažované parametry jsou významně ovlivněny glaukomem a mohou být účinně využity v jeho diagnostice. Dále bylo zjištěno, že navržená metoda analýzy nablednutí je méně spolehlivá než trojrozměrná analýza exkavace. Hlavní výhodou analýzy nablednutí spočívá v možnosti aplikace příslušných postupů na barevné digitální snímky papily, které lze pořídit na většině běžně dostupných digitálních síťových kamer. Ve srovnání s laserovou skenovací tomografií tedy nevyžaduje žádné další speciální zařízení.

Článek byl napsán v rámci výzkumného záměru Fyzikálního ústavu AV ČR č. AVOZ10100522.

#### Literatura

- [1] SHIELDS, B.: Textbook of Glaucoma. Baltimore, Williams & Wilkins 1992.
- [2] NĚSTĚROV, A.: Primární glaukom. Praha, Avicenum 1991.
- [3] PLUHÁČEK, F., POSPÍŠIL, J.: Objektivní reprezentace a diagnostická interpretace glaukomových změn papily zřakového nervu s využitím obrazové analýzy. *Jemná mechanika a optika*, **50**, 2005, č. 2, pp. 35-41.
- [4] PLUHÁČEK, F., POSPÍŠIL, J.: Proposal, verification and comparison of three computer image analysis methods for detection and evaluation of colour glaucomatous changes within the optic disc of a human eye retina. *Optik*, Vol. **116**, 2005, pp. 133-143.
- [5] BARTZ-SCHMIDT, K. C. et al: The cumulative normalised rim/disc area ratio curve. *Greaf's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, Vol. **234**, 1995, pp. 227-231.
- [6] ZINSER, G. et al: Formation and analysis of three-dimensional data with the laser tomographic scanner (LST). In: Nasemann, J. E., Burk, R. O. W. (editors): *Scanning Laser Ophthalmoscopy and Tomography*. München, Quintessenz Verlag, 1990, pp. 243-252.
- [7] VERDONCK, N. et al: Short-term intra-individual variability in Heidelberg retina tomograph II. *Bull. Soc. Belge Ophthalmol.*, Vol. **286**, 2002, pp. 51-57.
- [8] MACHALA, L., POSPÍŠIL, J.: Proposal and verification of two methods for evaluation of the human iris video-camera images. *Optik*, Vol. **112**, 2001, pp. 335-340.
- [9] DAUGMAN, J. G.: Biometric Decision Landscapes. Technical Report No. TR482, University of Cambridge Computer Laboratory, 1999.
- [10] ZWEIG, M. H., CAMPBELL, G.: Receiver-operating characteristic (ROC) plots: A fundamental evaluation tool in clinical medicine. *Clinical Chemistry*, Vol. **39**, 1993, pp. 561-577.

RNDr. František Pluháček, Ph.D., katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Tř. 17. listopadu 50, 772 00 Olomouc, tel.: 58 55 63 43 10

Prof. RNDr. Ing. Jaroslav Pospíšil, DrSc., katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Tř. 17. listopadu 50a, 772 00 Olomouc, tel.: 58 55 63 42 83

MUDr. Tomáš Kuběna, soukromá oční ordinace, U Zimního stadionu 1795, 760 00 Zlín, tel.: 577 438 160



## Studium optometrie v roce 2006

Univerzita Palackého v Olomouci je v současné době jediným poskytovatelem studia nelékařského zdravotnického oboru Optometrie, které je koncipované dle platného zákona 96/2004 Sb. a navazujících předpisů. Toto tříleté bakalářské studium má akreditaci Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR podloženou souhlasným stanoviskem Ministerstva zdravotnictví ČR. Výchova optometristů bezprostředně souvisí s optometrií a kontaktoologií, jak ji definuje zákon, úzce souvisí s oční technikou a přímo navazuje na oftalmologii. Univerzita Palackého v této souvislosti spolupracuje se Společenstvem českých optiků a optometristů (SČOO) a firmami, které se pohybují na trhu v této oblasti. Tato spolupráce se projevuje pozitivně jak při vlastní výchově optometristů, tak v oboru optometrie.

Studium má na Univerzitě Palackého v Olomouci dvacetiletou tradici. Nejprve bylo koncipováno jako magisterské studium, později ve formě dálkového studia, garantované katedrou optiky Přírodovědecké fakulty UP a od roku 2005 jako studium denní. Toto studium je v současné době zabezpečováno spoluprací Lékařské fakulty UP, reprezentované především její Oční klinikou, a Přírodovědecké fakulty, kde je těžiště výuky na katedře optiky. Studenti jsou kmenově vedeni a přijímáni ke studiu na PřF. V současné době studuje optometrii na UP v Olomouci 64 studentů ve třech ročnících. Studenti třetího ročníku vstoupili do závěrečného semestru studia, kde teoretická výuka, cvičení, praktika a semináře jsou rozšířeny o praxe a zpracování témat bakalářské práce.

Cílem studia je vychovat odborníky, schopné samostatně vyšetřovat refrakci oka, určit potřebnou korekci, doporučit vhodnou korekční pomůcku, aplikovat kontaktní čočky, zhotovovat, resp. opravovat korekční pomůcku a v případech, které přesahují kompetence optometristy doporučit návštěvu lékaře. Tento rozsah kompetencí optometristy vede ke zefektivnění péče o zrak. Kvalita studia je určena mírou zvládnutí potřebné teorie, pochopení principů vidění včetně zrakových funkcí oka a schopností studentů prakticky zvládnout úkony, které souvisí s kompetencemi optometristy. Tímto směrem je veden další rozvoj studia optometrie na UP v Olomouci.



Obr. 1

Obor Optometrie z pohledu ČR zaznamenal v roce 2006 několik významných akcí. Členové katedry optiky PřF a Oční kliniky LF UP, jako garanti studia optometrie na UP, byli společně se studenty jejich iniciátory, aktivními účastníky a případně organizátory. Jednalo se o následující mezinárodní zahraniční a domácí akce:

### Konference WCOE5

Ve dnech 3. – 5. května 2006 se v italském Miláně konala mezinárodní konference **World Conference on Optometric Education – Fifth Session**. Ve spolupráci s SČOO se konference zúčastnilo celkem 8 zástupců z ČR. Univerzitu Palackého na této akci reprezentovali členové katedry optiky Mgr. Věra Kollárová a Mgr. František Pluháček, Ph.D., a studentky optometrie UP Lenka Musilová, Marisela Rondón Hernándezová a Petra Slatinská. V rámci odborného programu byl na konferenci představen studijní program oboru Optometrie na UP v posterové sekci prezentace (F. Pluháček, J. Wagner: Optometric Education in Palacký University). O programu konference bylo referováno v časopisu Česká oční optika (L. Musilová, M. Rondón Hernándezová, P. Slatinská, F. Pluháček: 5. světová konference optometrického vzdělávání v Miláně. Česká oční optika, 2006, č. 3, str. 26).



Obr. 2

### Návštěva zahraničního odborníka v České republice

Ve dnech 28. – 31. 8. 2006 navštívil katedru optiky PřF UP optometrista Dr. Joseph J. Pizzimenti, vzdělavatel optometrie na *Nova Southeastern University, Florida*, spolupracovník Světové rady optometrie *World Council of Optometry (WCO)*. S pracovníky katedry optiky PřF UP a Oční kliniky FN LF UP byly diskutovány kompetence



Obr. 3

optometrie v USA a ČR, obsah studijního programu oboru Optometrie na UP a možnosti jeho dalšího rozvoje, formy studia v USA, odborné prvky v oblasti péče o zrak a možnou účast UP na mezinárodních projektech WCO, zaměřených na optometrii. Jako perspektivní se ukazuje zapojení UP do projektu *VISION 2020 - Global Initiative to Eliminate Avoidable Visual Disability Due to Refractive Errors*, který je zaměřen na zjištění refrakčních vad dětské populace a jejich eliminaci, se zaměřením především na rozvojové země.

### Vzdělávací kongres OPTOMETRIE 2006

Tento historicky první vzdělávací optometrický kongres, který byl zařazen do kreditního systému celoživotního vzdělávání optometristů, proběhl 7. – 8. října 2006 v prostorách UP v Olomouci. Kongres byl pořádán SCOO ve spolupráci s katedrou optiky PřF UP. Akce se zúčastnilo více jak 300 účastníků (podrobnější informace: P. Šebek: Kongres OPTOMETRIE 2006 v Olomouci. Česká oční optika, 2006, č. 4, str. 28-29). Náplní kongresu byly odborné přednášky v oblastech:

- Světová vize v péči o zrak
- Legislativa a její výkon související s optometrií
- Primární optometrická péče o zrak v ČR
- Vyšetřovací metody
- Funkcionální optometrie
- Kontaktní čočky

### XIII. výroční sjezd ČKS

10. – 12. 11. 2006 se v Nymburce konal XIII. výroční sjezd České kontaktologické společnosti. Česká kontaktologická společnost umožnila bezplatnou účast několika vybraným studentům a absolventům oboru Optometrie na UP v Olomouci a oboru Optika-optometrie na MU v Brně. UP v Olomouci reprezentovali studentky Eliška Ondrejčíková, Lucie Slechanová a Lenka Stašková. Sjezd byl studentkami hodnocen jako velmi přínosná akce, která zaujala svým odborným i doprovodným programem.



Obr. 4



Obr. 5

RNDr. Jaroslav Wagner, Ph.D., katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Tř. 17. listopadu 50, 772 00 Olomouc, tel.: 585 634 266, e-mail: wagnerj@prfnw.upol.cz.

RNDr. František Pluháček, Ph.D., katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Tř. 17. listopadu 50, 772 00 Olomouc, tel.: 585 634 310, e-mail: pluhacek@prfnw.upol.cz.

## Veletrh OPTA v Brně

V roce 2007 začala světová optická veletržní sezóna ve Stockholmu ve dnech 11. – 14. ledna, pokračovala v Mnichově 26. – 28. ledna a bude pokračovat v Brně 23. – 25. února (OPTA, internetové stránky [www.bv.cz/opta](http://www.bv.cz/opta)). Pokračování bude představovat dalších 17 obdobných akcí v mimoevropských zemích a tři akce evropské: 11. – 14. března v Moskvě (MSOO 2007, [www.expoctr.ru](http://www.expoctr.ru)), 4. – 7. května v Miláně (MIDO, [www.mido.it](http://www.mido.it)) a 26. – 27. května ve Varšavě (OPTEXPO, [www.targikielce.pl](http://www.targikielce.pl)). Je zajímavé, že nejvíce, tj. čtyři akce, budou probíhat v Číně.

Místem brněnského veletrhu je Výstaviště 1, 64 700 Brno, tel.: 541 152 985, fax: 541 153 067, e-mail: [opta@bv.cz](mailto:opta@bv.cz)

Jde o nejvýznamnější středoevropskou oborovou akci oftalmologie a oční optiky, jíž se v loňském roce zúčastnilo 222 vystavovatelů z 19 zemí s 5728 účastníky, z nichž bylo 746 zahraničních. Čistá výstavní plocha činila 4381 m<sup>2</sup>, což vše ukazuje nejen na úctyhodné rozměry, ale i na význam a kvalitu této jedinečné a užitečné akce.

Vladimír Malíšek

# Polarizačný optický reflektometer pre vláknové senzory s rozloženými parametrami

Článok popisuje polarizačný optický vláknový reflektometer, ktorý je aktuálne vyvíjaný na pracovisku autora. Zariadenie integruje niekoľko nekonvenčných technológií, ktorých podstata je v článku vysvetlená. Reflektometer bude nasadený ako senzor pre distribuované snímanie fyzikálnych polí pozdĺž optického vlákna. V článku sú diskutované kľúčové detaily implementácie reflektometra z pohľadu vláknovej optiky, elektroniky a termodynamiky.

**Kľúčové slová:** Optické vláknové senzory s rozloženými parametrami, polarizačná optická vláknová reflektometria, optická vláknová reflektometria na báze sčítavania fotónov, DOVS, POTDR, PCOTDR.

## 1. ÚVOD

Optické vláknové senzory s rozloženými parametrami (nazývané i distribuované optické vláknové senzory - DOVS) sú dnes, vďaka úsiliu mnohých laboratórií a výskumných tímov na celom svete, rýchlo sa rozvíjajúcou vedeckou disciplínou. Stále častejšie sa objavujú na trhu výsledky výskumu a konkrétne technické riešenia s výkonnosnými parametrami, ktoré sú inými technológiami len ťažko dosiahnuteľné. DOVS totiž umožňujú merať hodnoty cieľových fyzikálnych veličín pozdĺž optického vlákna s dĺžkou mnoho kilometrov, s rozlišovacou schopnosťou niekoľkých centimetrov. To dovoľuje návrhárovi konštruovať trojrozmerné senzorické štruktúry na meranie komplexného obrazu meranej veličiny. Fakt, že samotné optické vlákno je relatívne tenké (cca 1/4 mm) uľahčuje zabudovanie senzora do sledovanej štruktúry. Takto je napríklad možné zabudovaním senzorického vlákna do betónových prvkov hrádze či mosta zabezpečiť neustále monitorovanie tlakových pomerov v konštrukcii a tým predchádzať poruchám s potenciálne katastrofickými dôsledkami. Dôležitý je i fakt, že zabudovaním tenkého pasívneho optického vlákna sa podstatne nezmenia mechanické vlastnosti monitorovanej stavebnej konštrukcie.

Metódy rozloženej detekcie v DOVS sú založené na rôznych princípoch. Výskum problematiky DOVS bol iniciovaný najmä objavením metódy optickej vláknovej reflektometrie v časovej oblasti (optical time domain reflectometry, OTDR) [1]. Hoci sú použiteľné i iné princípy detekcie, metóda OTDR spolu s jej rôznymi modifikáciami a vylepšeniami je stále základom implementácie DOVS. V Laboratóriu optoelektroniky KTEE FEI STU máme dlhodobu široko rozpracovanú viaceré meracie metódy vo vláknovej optike a aktuálne sa intenzívne venujeme najmä dvom nekonvenčným metódam založeným na OTDR. Jedná sa o OTDR na báze sčítavania fotónov (photon counting OTDR, PCOTDR) [2] a polarizačnú OTDR (POTDR) [3]. Prvá zo spomenutých metód umožňuje rapídne zvýšiť rozlišovaciu schopnosť a citlivosť aparatúry a zjednodušiť jej konštrukciu. Polarizačná modifikácia OTDR zase umožňuje merať nielen priebeh útlmu signálu vo vlákne, ale i lokálne polarizačné vlastnosti optického vlákna. Domnievame sa, že tieto metódy sú obzvlášť vhodné pre implementáciu DOVS. Preto sme sa rozhodli vyvinúť prototyp zariadenia, ktorý bude obe metódy integrovať. Princíp a implementácia polarizačného OTDR na báze sčítavania fotónov (polarisation photon counting OTDR, P2COTDR) sú v hlavných črtách popísané v nasledujúcich kapitolách.

## 2. PRINCÍP

### Intrinzičné distribuované optické vláknové senzory

Úlohou DOVS je určiť hodnotu meranej veličiny ako spojitú funkciu pozície pozdĺž zvolenej dráhy optického vlákna. Ak poznáme túto dráhu, potom je možné každú nameranú hodnotu z konkrétnej

sekcii vlákna so známou pozíciou identifikovať s konkrétnou lokalitou v priestore (pozri obrázok 1). To znamená, že vytvorenie vhodne tvarovanej priestorovej štruktúry z optického vlákna umožňuje rekonštruovať viacrozmerný obraz meraného poľa.

Náš výskum je v súčasnej dobe zameraný najmä na konštrukciu intrinzičných DOVS s využitím bežného jednovidového telekomunikačného optického vlákna pre vlnové dĺžky v okolí 1,55  $\mu\text{m}$  (napríklad Corning SMF-28). Ako sme ukázali v práci [4], mechanické vlastnosti štandardného jednovidového vlákna SMF-28 s primárnou ochranou umožňujú napríklad priamo konštruovať senzory relatívneho predĺženia až do hodnoty relatívneho predĺženia 4 %, pričom pri vhodnej konštrukcii mechanického spojenia vlákna a monitorovanej štruktúry sa dá očakávať zlepšenie tejto hodnoty až na 10 %. Voľba pracovnej vlnovej dĺžky vyplýva z požiadaviek na dostupnosť vhodných optoelektronických komponentov a na kompatibilitu so stávajúcimi telekomunikačnými riešeniami.



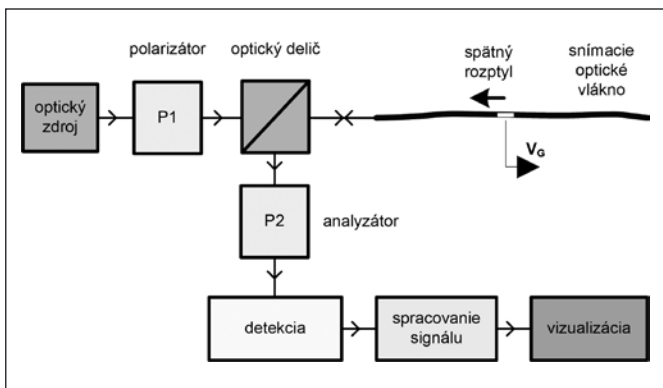
Obr. 1 Distribuovaný optický vláknový senzor zabudovaný v monitorovanej štruktúre umožňuje snímať dvojrozmerný obraz meranej veličiny

### OTDR, POTDR a PCOTDR

Optická vláknová reflektometria v časovej oblasti (optical time domain reflectometry, OTDR) je účinnou metódou, ktorá je dnes široko používaná v mnohých oblastiach optickej vláknovej technológie. Je založená na meraní časového priebehu úrovne spätne rozptýleného optického výkonu, ktorý je odozvou na úzky testovací optický impulz naviazaný do vlákna. Jedná sa v podstate o využitie radarového princípu v oblasti vedených optických vln. Metóda OTDR dáva ako výsledok priebeh úrovne výkonu optického signálu rozptýleného pozdĺž vlákna. Z toho je zrejme aj jej využitie pre DOVS: ak totiž nejaká vonkajšia veličina bude ovplyvňovať lokálny koeficient útlmu vlákna, sme schopní pri znalosti mechanizmu tohto ovplyvňovania získať z OTDR odozvy hodnotu veľkosti ovplyvňujúcej veličiny pozdĺž celej dĺžky optického vlákna.

Bohužiaľ, len málo cieľových veličín je schopných výraznejšie ovplyvniť útlm signálu v bežnom telekomunikačnom vlákne, ak neuvažujeme triviálny prípad senzorov mechanického poškodenia (ktoré však majú významné uplatnenie pri monitorovaní funkčného stavu kompozitných štruktúr). Avšak malá modifikácia tejto metódy

umožňuje určiť i lokálne polarizačné vlastnosti meraného optického vlákna. Jedná sa o polarizačnú OTDR (POTDR), ktorá je založená na meraní vývoja stavu polarizácie (state of polarisation, SOP) žiarenia šíriaceho sa vláknom. Na základe tejto informácie metóda umožňuje určiť lokálne polarizačné vlastnosti jednotlivých elementov optickej trasy. Podrobný teoretický rozbor metódy a princíp spracovania údajov nájde čitateľ napríklad v [5]. Pre využitie POTDR v senzorických aplikáciách je dôležité, že mnoho vonkajších vplyvov (napríklad magnetické a elektrické polia, mechanický tlak a ťah, teplota či vibrácie) veľmi silno pôsobia na SOP vláknom sa šíriaceho žiarenia. Ak poznáme mechanizmy ovplyvňovania polarizácie, je možné pomocou POTDR určiť hodnoty ovplyvňujúcich polí. Principiálna bloková schéma DOVS s POTDR je na obrázku 2. Testovací impulz prechádza polarizátorom P1, aby žiarenie, naviazané do snímacieho vlákna malo dobre definovaný SOP. Svetlo spätne rozptýlené z vlákna prechádza analyzátorom P2 a je detekované polarizačne nezávislým optickým detektorom.

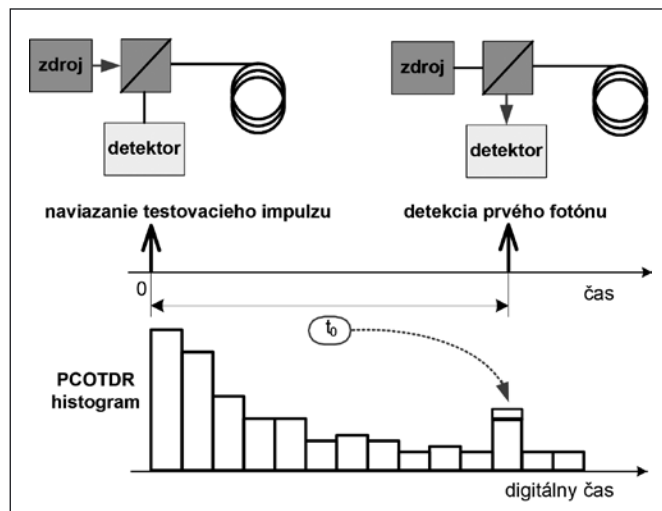


Obr. 2 Principiálna bloková schéma DOVS s POTDR

Viacerými meraniami pri rôznej orientácii polarizátora a analyzátoru sa dajú určiť lokálne polarizačné vlastnosti snímacieho optického vlákna. Výsledkom merania metódou POTDR je vývoj lokálneho dvojlomu pozdĺž vlákna. Ak vystavíme snímacie vlákno so známymi polarizačnými vlastnosťami vplyvu fyzikálneho poľa, ktoré interaguje so šíriacim sa žiarením, potom spracovaním POTDR signálu môžeme vypočítať parametre ovplyvňujúceho poľa pozdĺž osi vlákna. Výhodnou vlastnosťou POTDR z hľadiska jej využitia pre DOVS je jej extrémne vysoká citlivosť na mnoho fyzikálnych vplyvov, čo umožňuje konštruovať presné a citlivé senzory. Na druhej strane však táto vysoká citlivosť kladie značné požiadavky na návrh systému. Je totiž potrebné implementovať opatrenia selektívne zamedzujúce ovplyvnenie SOP žiarenia nežiadúcimi vplyvmi a tak dosiahnuť dostatočnú hodnotu pomeru signál-šum.

Ďalšou technológiou, ktorú integrujeme vo vyvíjanom zariadení, je OTDR založená na sčítavaní fotónov (photon counting OTDR, PCOTDR). Princíp PCOTDR spočíva vo využití ultranízkej úrovne optického výkonu spätého rozptylu - t.j. okolnosti, ktorá kladie v klasickej OTDR vysoké nároky na analógové obvody detekcie a spracovania signálu. Ak totiž optický výkon je tak malý, že sa začína výrazne prejavovať diskretná povaha toku spätne rozptýlených fotónov, je možné s výhodou využiť jeho štatistické vlastnosti na rekonštrukciu priebehu optického výkonu [6]. Pri PCOTDR môže byť testovací impulz kratší, čo zlepší rozlišovaciu schopnosť aparatury. Navyše sa tu detekcia a spracovanie optického signálu vykonávajú digitálnymi metódami, z čoho vyplývajú podstatne nižšie nároky na vlastnosti elektronických obvodov reflektometra. Preto môže byť PCOTDR implementovaná jednoduchšie a lacnejšie ako klasická OTDR pri súčasnom dosiahnutí lepších výkonnostných parametrov.

Činnosť PCOTDR reflektometra je znázornená na obrázku 3. Jedná sa o postupné vytváranie histogramu distribúcie časového oneskorenia medzi naviazaním testovacieho impulzu a detekciou



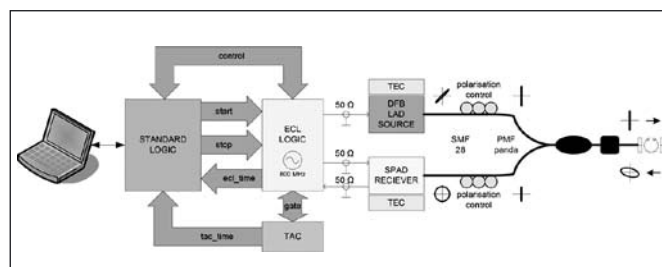
Obr. 3 Princíp formovania PCOTDR histogramu

prvého fotónu spätne rozptýleného žiarenia. Optický zdroj generuje testovací impulz, ktorý je naviazaný cez 3dB delič do vlákna. Prvý fotón spätne rozptýleného žiarenia je detekovaný lavínovou fotodiódou SPAD (single photon avalanche diode). Mnohonásobným opakovaním tohoto procesu sa postupne vytvára PCOTDR histogram, ktorý je v digitálnej podobe pripravený na ďalšie spracovanie.

### 3. IMPLEMENTÁCIA

Bloková schéma navrhovaného zariadenia je na obrázku 4. Výkonným jadrom zariadenia je modul osadený rýchlou ECL logikou. ECL modul obsahuje 800MHz oscilátor a 18bitový čítač. Samotné meranie prebieha nasledovne: Súčasne s naviazaním impulzu do vlákna začne čítač zvyšovať aktuálnu hodnotu, ktorá sa porovnáva s registrami *start* a *stop*. Na základe porovnania sa generuje hradlovací impulz, ktorý aktivuje detektor SPAD. Pri danej frekvencii oscilátora je možné merať so snímacím vláknom až do dĺžky 33 km, pričom je možné „vybrať“ na vlákne ľubovoľnú oblasť s dĺžkou minimálne 12,5 cm. V okamihu detekcie prvého fotónu sa prepíše aktuálna hodnota čítača do registra *ecl\_time*. Nameraný časový interval je potom rovný rozdielu (*ecl\_time* - *start*). Doplnkom k digitálnemu meraniu dĺžky časového intervalu je použitie prevodníka čas - amplitúda (time to amplitude converter, TAC). TAC umožňuje ďalšie zvýšenie rozlišovacej schopnosti a je ho možné spustiť buď súčasne s naviazaním impulzu, alebo súčasne s aktiváciou SPAD. Prvý spôsob kladie zvýšené nároky na dynamický rozsah TAC. Druhý spôsob umožňuje dosiahnutie maximálnej rozlišovacej schopnosti (menej ako 2  $\mu$ m pri 16bitovom TAC), avšak negatívnu úlohu tu zohrá neistota v čase aktivácie detektora.

Činnosť optickej časti je nasledovná. Impulzný zdroj s DFB laserovou diódou produkuje testovací optický impulz s prakticky lineárnou polarizáciou (LP). Polarizačný kontroler nastaví polarizáciu na LP paralelnú s rýchlou osou (napríklad os *y*) vstupného polarizačného vlákna optického deliča C. Na výstupe deliča žiarenie, stále LP pozdĺž osi *y*, prechádza polarizátorom P s transmisnou



Obr. 4 Bloková schéma P2COTDR reflektometra pre DOVS

osou orientovanou znovu v smere osi  $y$ . Na výstupe optického traktu je otočný konektor, ktorý umožňuje pripojenie snímacieho vlákna s ľubovoľnou orientáciou vzhľadom na transmisnú os polarizátora. Spätne rozptýlené žiarenie zo snímacieho vlákna môže nadobúdnúť ľubovoľný, v čase sa vyvíjajúci SOP. Žiarenie znova prechádza polarizátorom P, ktorý v tomto prípade pôsobí ako analyzátor polarizácie a detekuje SOP žiarenia. Do deliča C je teraz v spätnom smere naviazaná len zložka žiarenia LP pozdĺž osi  $y$ , ktorá je vedená cez druhý polarizačný kontroler na SPAD príjmač. Úlohou druhého polarizačného kontrolera je zmeniť LP žiarenia na kruhovú polarizáciu. Tak sa predíde prípadnej nežiadúcej polarizačnej závislosti detektora. Pre určenie lokálnych polarizačných vlastností snímacieho optického vlákna metódou POTDR je potrebné vykonať viacero OTDR meraní pri rôznej orientácii snímacieho vlákna vzhľadom k polarizátoru. Otočný konektor na výstupe umožňuje ľubovoľne nastaviť túto orientáciu.

Úlohou modulu označeného STD LOGIC je opakovane nastavovať registre *start a stop* a po detekcii fotónu (alebo ne-detekcii) inkrementovať komponent PCOTDR histogramu, ktorý prislúcha nameranému času. Modul je osadený hradlovým poľom a pamäťou SRAM typu 256 KB x 16 na uloženie histogramu. V prípade že sa niektorá zo 16bitových buniek pamäte naplní, celý obsah pamäte sa prenesie do riadiaceho počítača, kde dochádza k záverečnému uloženiu a spracovaniu údajov.

Obe optoelektronické súčiastky sú vybavené termoelektrickým kontrolerom TEC na stabilizáciu teploty. Technológia výroby detektorov SPAD pre dlhovlnnú oblasť nieje zatiaľ dostatočne zvládnutá a detektory je potrebné hlboko chladiť. Detektor je umiestnený v mosadznom bloku o rozmeroch 32 x 32 x 12 mm, ktorého teplota je udržiavaná na  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  pomocou kaskády Peltierových článkov. Celá chladená oblasť je uložená v izolovanom kontajneri. Disipáciu tepla zabezpečuje aktívny chladič bežne používaný pre chladenie procesorov. Bez prítomnosti hradlovacích impulzov kaskáda Peltierových článkov transportuje asi 1,5 W odpadového tepla, pričom vlastná spotreba dosahuje hodnoty 44 W. Hlavným mechanizmom vzniku odpadového tepla je konvekčná výmena medzi chladenou oblasťou a teplou stranou Peltierových článkov. Nezanedbateľné sú i príspevky tepla privedeného izolačným materiálom a prírodnými vodičmi, tepla vyžiareného z okolitého prostredia a tepla produkovaného na PN priedehode detektora SPAD v dôsledku prechodu zvyškového prúdu.

#### 4. ZÁVER

V článku sme čitateľovi predstavili koncepciu zaujímavého zariadenia, ktorého účelom je merať viacrozmerne fyzikálnych polí. Základným stavebným prvkom tohto distribuovaného optického vláknového senzora je P2COTDR reflektometer. Princípy nekonvenčných metód POTDR a PCOTDR, ktoré toto fotonické zariadenie integruje, sme teoreticky vysvetlili a diskutovali sme kľúčové detaily ich praktickej implementácie. Po dokončení vývoja a konštrukcie zariadenia uskutočníme sériu experimentov, ktoré poskytnú základný obraz o prakticky dosiahnuteľných výkonnostných parametroch. Tieto experimenty budú zamerané najmä na možnosti distribuovaného merania skalárneho a vektorového tlakového poľa v stavebných štruktúrach.

#### Podakovanie

Táto práca vznikla za finančnej podpory vedeckej grantovej agentúry MŠ SR a SAV v rámci riešenia výskumného projektu VEGA 1/3097/06.

#### Literatúra

- [1] BARNOSKI, M. K., JENSEN, S. M. Fiber waveguides: A novel technique for investigation of attenuation characteristics. In: *Applied Optics*, 1976, Vol. 15, No. 9, pp. 2112 - 2115.
- [2] Hlaváč, M., Jasenek, J. Novel approach to signal processing in the PC-OTDR. In *Radioelectronics 2004*, April 2004, Bratislava, Slovakia, pp. 95 - 99., ISBN 80-227-2017-8.
- [3] Rogers, A. J. Polarisation-optical time domain reflectometry: a technique for the measurement of field distributions. In: *Applied Optics*, 1981, Vol. 20, No. 6, pp. 1060 - 1074.
- [4] Hlaváč, M. et al. Dynamical range of the fiber optic strain sensor made of the standard telecom optical fiber. In: *ELI-TECH 2006 (CD-ROM)*, Bratislava: FEI STU, 2005. ISBN 80-227-2388-6
- [5] Hlaváč, M. Optické vláknové senzory s rozloženými parametrami na báze OTDR, Bratislava: FEI STU, 2005. 78 s. Písomná práca k dizertačnej skúške.
- [6] Hlaváč, M., Jasenek, J. The reconstruction of the ultra low power level optical signal by photon counting. In: *ECS 2005*, Bratislava: FEI STU, 2005.

Ing. Marek Hlaváč, marek.hlavac@stuba.sk, Prof. Ing. Jozef Jasenek, PhD., jozef.jasenek@stuba.sk,

Ing. Jozefa Červeňová, PhD., jozefa.cervenova@stuba.sk

Laboratórium optoelektroniky, katedra teoretickej a experimentálnej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, Slovenská republika, telefon: +421 2 602 91 426

# Úprava elipsometru Gaertner L119 a jeho použití pro studium tenkých vrstev

*Předložená práce se zabývá popisem úprav a modernizace elipsometru Gaertner L119 a jeho využitím pro studium tenkých vrstev s automatizovaným režimem měřicího procesu. Zařízení se využívá jako nulovací elipsometr v konfiguraci PCSA pro měření na jedné vlnové délce při různých úhlech dopadu. K testování přístroje byla provedena měření tloušťky vrstev  $\text{SiO}_2$  připravených termickou oxidací na monokrystalických křemíkových deskách při teplotě  $1200^\circ\text{C}$ . Naměřené tloušťky byly porovnány jednak s výsledky měření na spektrálním elipsometru systému Yamaguchi a také s interferometrickými a reflektometrickými měřeními v bílém světle.*

**Klíčová slova:** Elipsometrie, tenké vrstvy.

## 1. ÚVOD – VÝZNAM A POUŽITÍ REFLEXNÍ ELIPSOMETRIE PŘI ZKOUMÁNÍ VRSTEVNATÝCH SYSTÉMŮ

V různých oblastech mikroelektroniky se setkáváme se systémy, které jsou tvořeny monokrystalickou podložkou např. z křemíku, na které jsou vytvářeny další vrstevnaté struktury. Pro jejich studium se s výhodou používá elipsometrických metod, které umožňují specifikovat optické parametry tenkých vrstev, vícevrstevnatých systémů, povrchů, periodických systémů atd. Hlavními výhodami těchto nepřímých měřicích metod jsou vysoká citlivost, nedestruktivnost a neovlivňování procesu růstu vrstvy [1, 2].

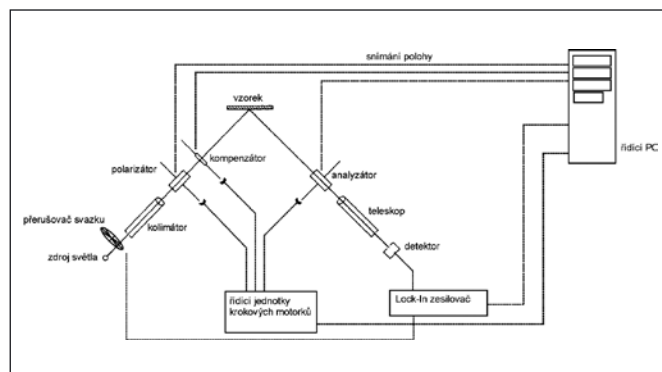
Reflexní elipsometrie je dnes již standardní, často používaná varianta elipsometrie. Vychází z určení změn polarizačních stavů světla, které se odráží od povrchu vzorku. Je známo, že poměr komplexních reflexních koeficientů pro  $p$  a  $s$  polarizovanou vlnu určuje tzv. hlavní elipsometrické parametry  $\Psi$  a  $\Delta$ . Z těchto parametrů je možno získat informace o optických parametrech systému a také o tloušťce tenkých vrstev [1, 2].

## 2. EXPERIMENTÁLNÍ SESTAVA - ELIPSOMETR GAERTNER L119

Upravené zařízení na Institutu fyziky VŠB-TU Ostrava konstručně vychází z elipsometru firmy Gaertner L119 [3]. Tento původní přístroj byl mechanický s ručním ovládáním, což bylo vzhledem k současným požadavkům nevyhovující. Měření nebylo dostatečně přesné, ale především neúměrně zvyšovalo dobu nastavení základních prvků a tím i celého měření.

Základním úkolem modernizace bylo vytvoření zařízení s automatizovaným režimem měřicího procesu vhodného ke studiu tenkovrstevných systémů. Bylo zvažováno několik variant měřicí sestavy (rotující analyzátor, rotující analyzátor a polarizátor, kompenzátor s fotoelastickým modulátorem atd.), ale nakonec jsme se rozhodli pro nulovací elipsometrii se čtvrtvlnovou destičkou. Schéma měřicí sestavy elipsometru pro nulovací metodu v konfiguraci PCSA je na obr. 1.

Jako zdroj světla byl použit He-Ne laser Hughes 3222H-PC vyzařující na vlnové délce 632,8 nm. Světlo laseru prochází přerušovačem svazku, který vytváří periodický obdélníkový signál s opakovací frekvencí 2 – 3 kHz. Při měření se používá synchronní zesilovač SR830 DSP firmy Stanford Research Systems. Jako detektor slouží křemíková fotodioda Hamamatsu S1406-03 s vestavěným zesilovačem na čipu. Dioda je napájena napětím 18 V. Z důvodu eliminace kolísání napětí v elektrické síti je napájena z NiMH akumulátorů. Fotodioda je spojena s PC pomocí paralelní linky. Ta umožňuje změnu zesílení vestavěného zesilovače prostřednictvím ovládacího softwaru.

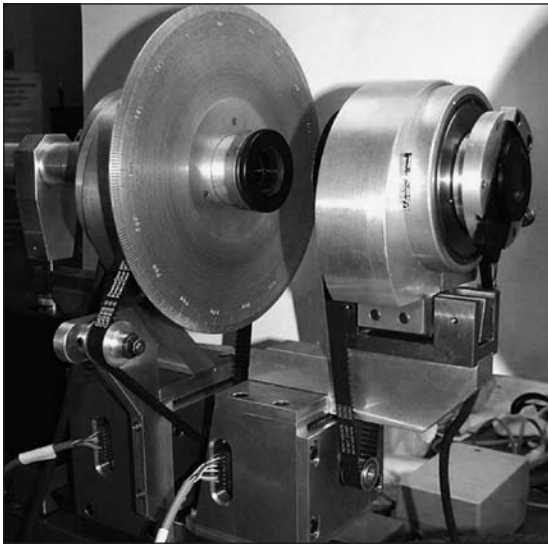


Obr. 1 Schéma elipsometru

Polarizátor a analyzátor tvoří Glan – Thompsonovy hranoly se vstupní aperturou cca 2 x 2 cm. Kompenzátořem je čtvrtvlnová destička. Polarizátor, analyzátor a kompenzátor jsou otáčeny krokovými motorky SX23-1020 (Microcom). Motorky mají statický točivý moment 2 Nm a standardní délku kroku  $1,8^\circ$  s možností dalšího elektronického zmenšení. Točivý moment se na optické prvky přenáší ozubeným řemenem s kevlarovým jádrem. Použitý převod je 17:1 (viz obr. 2).

Krokové motorky jsou řízeny kontrolery Microcon M1486B, které jsou vybaveny výkonným souborem povelů, umožňujícím např. plynulé řízení rychlosti nebo dělení kroku - mikrokrokování. Kontrolery jsou osazeny na deskách CD30M, které dále obsahují také výkonový zesilovač s pulsní regulací a možností mikrokrokování. Desky jsou pomocí sériového rozhraní RS232 propojeny s počítačem.

Poloha polarizátoru, analyzátořu a kompenzátořu je snímána inkrementálními čidly ERN 180 firmy Heidenhein. Jedná se o inkrementální čidla, která mají dostatečný vnitřní průměr, aby bylo možno do nich vložit Glan – Thompsonovy hranoly. Zvyšují přibližně o jeden řád přesnost nastavení polohy PAC a především významným způsobem urychlují nastavení prvků PAC a tím i měřicí proces. Čidla mají fyzicky dělení 5000 dílků na jednu otáčku. Výstupní signál má sinusový průběh s amplitudou 1 V. Snímače jsou připojeny do dvou měřicích karet IK220 stejného výrobce. Karty IK220 interpolují signál z inkrementálních čidel a zvyšují tak desetinásobně přesnost určení polohy. Karty jsou instalovány v PC přes PCI rozhraní.



Obr. 2 Polarizátor a kompenzátor. Ve spodní části jsou umístěny krokové motorky. Analyzátor je konstrukčně shodný s polarizátorem

### 3. PŘÍPRAVA VRSTEV $\text{SiO}_2$ NA MONOKRYSTALICKÉM SI SUBSTRÁTU

Pro přípravu vzorků byly použity monokrystalické křemíkové desky vyrobené firmou ON Semiconductor v Rožnově p. R. Jedná se o desky s krystalografickou orientací (111) o průměru  $(100 \pm 0,5)$  mm a tloušťce  $(381 \pm 25)$   $\mu\text{m}$ . Desky jsou dotovány bórem (typ P), mají měrný odpor v intervalu  $(0,008 - 0,009)$   $\Omega \cdot \text{cm}$ .

Vrstvy  $\text{SiO}_2$  s tloušťkami v rozmezí 50 – 550 nm byly na vzorcích připraveny termickou oxidací při teplotě 1200 °C na základě využití tzv. Deal - Groveova modelu [4]. Byla použita varianta suché oxidace s ohledem na technické možnosti použití pece. Vzorky pro experimenty měly rozměry cca 2 x 2 cm a byly nařezány diamantovým hrotem.

### 4. ZPRACOVÁNÍ A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ

Při výpočtu tloušťky vrstvy předpokládáme, že systém je tvořen superstrátem s indexem lomu  $n_0$  (vzduch), neabsorbující vrstvou s indexem lomu  $n_1$  a tloušťkou  $d_1$  a absorbující podložkou s optickými konstantami  $n_2$  a  $k_2$ . Vrstvy jsou z optického hlediska homogenní a isotropní. Rozhraní tohoto systému se předpokládají ideálně hladká a rovinná. Dopadne-li na takto definovaný systém kolimovaný monochromatický světelný svazek s vlnovou délkou  $\lambda$  pod úhlem  $\varphi_0$  na horní rozhraní tohoto systému, můžeme elipsometrické parametry  $\Psi$  (azimut) a  $\Delta$  (fázový rozdíl) svázat s komplexními odrazivostmi  $R_p$  a  $R_s$  pomocí rovnice [1]:

$$\text{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s} = \frac{r_p^I + r_p^{II} \cdot e^{-2i\delta}}{1 + r_p^I \cdot r_p^{II} \cdot e^{-2i\delta}} \cdot \frac{1 + r_s^I \cdot r_s^{II} \cdot e^{-2i\delta}}{r_s^I + r_s^{II} \cdot e^{-2i\delta}}, \quad (1)$$

kde  $r_p^I, r_p^{II}, r_s^I, r_s^{II}$  jsou reflexní Fresnelovy koeficienty  $p$  a  $s$  složek na rozhraní vzduch-vrstva a vrstva-podložka a

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d_1 (n_1^2 - n_2^2 \sin^2 \varphi_0)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

je fázový rozdíl paprsků ve vrstvě,  $\varphi_0$  úhel dopadu,  $d_1$  tloušťka vrstvy,  $n_1$  index lomu vrstvy a  $n_2$  index lomu podložky.

Obecně není možné udat explicitní řešení rovnice (1) v analytické formě, ale určuje se fitováním závislostí  $\Psi$  a  $\Delta$  pomocí počítače

$$\begin{aligned} \Delta &= f_1(n_0, n_1, n_2, k_2, d_1, \varphi_0), \\ \Psi &= f_2(n_0, n_1, n_2, k_2, d_1, \varphi_0) \end{aligned}$$

Pro fitování byla použita Levenbergova – Marquardtova metoda nejmenších čtverců, která je součástí optimalizačního Toolboxu v prostředí programového balíku MATLAB [5].

Všechna měření byla prováděna při vlnové délce  $\lambda = 632,8$  nm, a to pro každý vzorek vždy třikrát pro šest úhlů dopadu  $\varphi_0$ : 50, 55, 60, 65, 70 a 75°. V našem případě byly použity hodnoty indexu lomu substrátu  $n_2 - ik_2$  pro Si:  $n_{\text{Si}} = 3,8817 - 0,0189i$  [6] a index lomu vrstvy  $n_1$  pro  $\text{SiO}_2$ :  $n_{\text{SiO}_2} = 1,4692$  [7].

### 5. VÝSLEDKY A JEJICH SROVNÁNÍ S JINÝMI MĚŘENÍMI

Bylo proměřeno a zpracováno osm sad vzorků, jejichž výsledky jsou shrnuty v tabulce 1.

První sada byla změřena na Institutu fyziky VŠB-TUO pomocí nulovací elipsometrie na upraveném elipsometru Gaertner L119 (druhý sloupec tab. 1).

Druhá srovnávací sada byla změřena na spektrálním elipsometru systému YAMAGUCHI v konfiguraci PCSA a vyhodnocena vlastním software na základě použití Yehova maticového formalismu na pracovišti Research Institute of Electronics, Shizuoka University v Japonsku (třetí sloupec tab. 1) [8].

Další dvě sady byly proměřeny na Institutu fyziky VŠB-TUO metodami spektrální reflektometrie [9] a spektrální interferometrie [10] v bílém světle (čtvrtý a pátý sloupec tab. 1). Při interferometrii byla vyhodnocena měření v intervalu vlnových délek od 450 do 900 nm, při reflektometrii v intervalu 390 až 1000 nm. Uvažovala se spektrální závislost optických konstant jak vrstvy  $\text{SiO}_2$  [7], tak substrátu Si [6].

Tab. 1 Srovnání změřených tlouštěk vrstev  $\text{SiO}_2$  na monokrystalickém Si substrátu určených různými metodami

Vzorek	Nulovací elipsometrie	Spektrální elipsometrie	Reflektometrie v bílém světle	Interferometrie v bílém světle
1.	48,3 nm	49,0 nm	/	/
2.	72,6 nm	74,7 nm	73,5 nm	73,2 nm
3.	82,2 nm	82,3 nm	85,2 nm	77,3 nm
4.	156,7 nm	157,3 nm	154,4 nm	162,8 nm
5.	285,8 nm	284,9 nm	287,6 nm	283,2 nm
6.	331,3 nm	335,7 nm	332,4 nm	335,5 nm
7.	389,8 nm	/	392,6 nm	393,4 nm
8.	449,7 nm	448,1 nm	452,0 nm	449,6 nm

Pozn.: Maximální nejistota měření nulovacím elipsometrem byla  $\pm 0,5$  nm. U interferometrických měření byla výrazně větší [9]. Vzorek č. 1 je pod hranicí citlivosti spektrální reflektometrie a interferometrie v bílém světle. Vzorek č. 7 nebyl v Japonsku měřen.

### 6. ZÁVĚR

Článek se zabývá popisem a využitím zmodernizovaného elipsometru firmy Gaertner L119 s automatizovaným režimem měřicího procesu ke studiu tenkovrstevných systémů. Při měření a testování byla určena nulovací elipsometrií při 6 úhlech dopadu tloušťka osmi sad vrstev  $\text{SiO}_2$ , které byly vytvořeny termickou oxidací na monokrystalických Si deskách při teplotě 1200 °C. Naměřené hodnoty byly porovnány s výsledky získanými třemi nezávislými měřicími metodami: spektrální elipsometrií, spektrální reflektometrií a spektrální interferometrií v bílém světle. Shoda v naměřených hodnotách podle použitých metod je velmi dobrá. Rozdíly se pohybují většinou do 4 nm, u vzorků 3 a 4 je to 5, resp. 6 nm. Tyto odchylky mohou být způsobeny např. závislostí tloušťky vrstvy  $\text{SiO}_2$  v důsledku nehomogenního teplotního pole v celém průřezu pece.

V další fázi se počítá s rozšířením experimentálních možností zařízení ve dvou směrech: měření na více vlnových délkách pomocí speciálního laseru a úpravou konfigurace pro měření TIRE (Total Internal Reflection Ellipsometry).

Tato práce byla částečně podpořena projektem GAČR č. 202/06/0531 a MSM6198910016.

## Literatura

- [1] AZZAM, R. M. A. – BASHARA, N. M.: Ellipsometry and Polarized light. North-Holland Publishing Company, Amsterdam 1977.
- [2] OHLÍDAL, I. – FRANTA, D.: Ellipsometry of thin film systems, *Progress in Optics*, 16, 2000, s. 108.
- [3] ARCHER, R. J.: Manual of Ellipsometry, Gaertner scientific corporation, Chicago, 1968, 36 s.
- [4] DEAL, B. E. – GROVE, A. S.: General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon, *Journal of Applied Physics*, 36, 1965, s. 3770.
- [5] Optimization Toolbox of Optical Constants of Solids, Math-Works, Massachusetts 2000.
- [6] PALIK, E. D.: Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press, Orlando 1995.
- [7] POSTAVA, K. – YAMAGUCHI, T.: Optical functions of low-k materials for interlayer dielectrics. *Journal of Applied Physics*, 89, 2001, s. 2189.
- [8] PIŠTORA, J.: nepublikované sdělení
- [9] HLUBINA, P.: Spectral reflectometry and white-light interferometry used to measure thin films, *Optical Metrology in Production Engineering, Proc. of SPIE*, 5457, 2004, s. 756.
- [10] CHLEBUS, R. – HLUBINA, P. – CIPRIAN, D. – LUŇÁČEK, J. – LESŇÁK, M.: Měření tloušťky tenké vrstvy SiO<sub>2</sub> na křemíkovém substrátu s využitím spektrální interferometrie v bílém světle. *JMO*, zasláno redakci.

Doc. Dr. Ing. Michal Lesňák, Institut fyziky, VŠB - TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, tel.: 597 325 206, fax: 597 323 139, e-mail: michal.lesnak@vsb.cz

Doc. Dr. RNDr. Jiří Luňáček, Institut fyziky, VŠB - TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, tel.: 597 324 111, fax: 597 323 139, e-mail: jiri.lunacek@vsb.cz

Ing. Adam Talík, Institut fyziky, VŠB - TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, tel.: 597 325 206, fax: 597 323 139, e-mail: adam.talik.hgf@vsb.cz

Doc. RNDr. Petr Hlubina, CSc., Institut fyziky, VŠB - TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, tel.: 597 323 134, fax: 597 323 139, e-mail: petr.hlubina@vsb.cz

Prof. Ing. Jaromír Pištora, CSc., Institut fyziky, VŠB - TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, tel.: 597 323 129, fax: 597 323 139, e-mail: jaromir.pistora@vsb.cz

## OCULUS: špičková technika pro optiky i oftalmology

**Mezi účastníky veletrhu OPTA 2007 opět nebude chybět firma OCULUS, spol. s r. o., která na českém trhu zastupuje několik prestižních značek zahraničních výrobců oftalmologických a optických přístrojů. Vedle tradičního sortimentu představí i novinky - automatický fokometr Nidek LM-1200 a LCD optotyp Nidek SC-2000.**

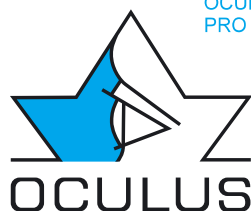
Společnost OCULUS na český trh dodává přístroje renomovaných světových výrobců - německé značky OCULUS, japonských firem NIDEK a NEITZ a amerického výrobce OCULAR Instruments. Pro oční lékaře dodává kompletní vybavení pro oční ambulance včetně očních laserů, pro oční optiky refrakční přístroje, fokometry, PD-metry a automatické brusy na broušení brýlových čoček. Největší zájem v současnosti je o nové typy automatických fokometrů Nidek a kombinovaný přístroj autorefraktokeratotonometr Nidek RKT-7700. Tento nový přístroj kombinuje měření refrakce, keratometrie a nitroočního tlaku, a to vše bezkontaktně. Autorefraktokeratotonometr Nidek RKT-7700 měří objektivní refrakci, zakřivení rohovky v centru, nitrooční tlak (včetně funkce APC), průměr rohovky, průměr zornice a PD. Dalšími atributy RKT jsou 3D (třírozměrná - v osách x, y, z) automatická lokalizace měřeného oka, elektricky ovládaná bradová opěrka, vestavěná tiskárna a výklopný LCD displej.

Na veletrhu OPTA 2007 představí OCULUS nový automatický fokometr Nidek LM-1200 pro měření všech typů brýlových čoček a nový LCD optotyp Nidek SC-2000 s možností nastavovat i kontrast optotypů. Nový automatický fokometr NIDEK LM-1200 je kromě rozšířeného automatického rozpoznávání typu čoček vybaven i jezdcem

pro měření PD čoček zasazených v obroučkách. U progresivních čoček je schopen měřit délku i šířku progresivního kanálu a výsledky zobrazit v barevném grafu. Centra oblastí vidění do dálky i do blízka jsou detekována automaticky. Mezi další doplňky patří měření propustnosti čoček pro UV záření a barevný výklopný LCD displej.

Druhá veletržní novinka, LCD optotyp Nidek SC-2000, je autonomním systémem umožňujícím zobrazení optotypů v rozsahu 0,03-2,0. 19palcová LCD obrazovka s vysokým rozlišením SXGA a životností 50 000 provozních hodin poskytuje kvalitní zobrazení optotypů. Pro lepší pohodlí obsluhy i pacienta je přístroj vybaven bezdrátovým dálkovým ovládním a automatickou centrací zvolených optotypů. Přístroj umožňuje i změnu kontrastu pro zjištění kontrastní citlivosti. Samozřejmostí je řádkování a sloupkování zvolených optotypů a nastavení jejich velikosti dle vyšetřovací vzdálenosti. Hloubka pouhých 38 mm jej předurčuje pro použití i ve stísněných prostorech.

Jan Šandera



OCULUS - VÁŠ SPOLEHLIVÝ DLOUHOLETÝ PARTNER  
PRO DODÁVKY OFTALMOLOGICKÝCH A OPTICKÝCH PŘÍSTROJŮ

OCULUS, spol. s r.o.  
Pardubická 765  
500 04 Hradec Králové

tel./fax: 495 531 145, 495 531 140  
e-mail: oculus@oculus.cz www.oculus.cz





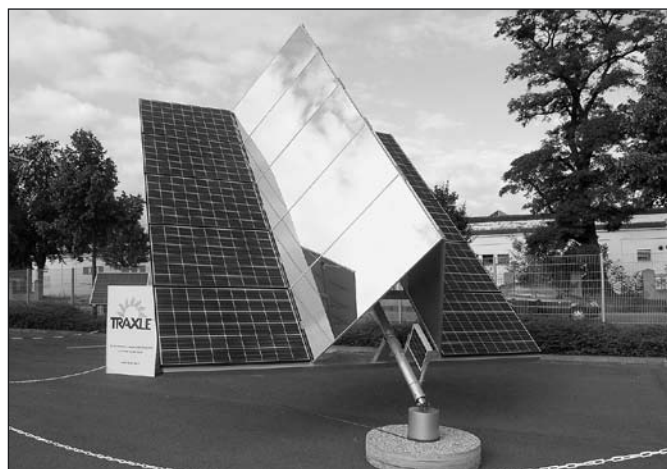
## Aktuálně o fotovoltaice

Letošní v pořadí již 21. evropská konference a výstava o fotovoltaické (PV) přeměně energie se konala na výstavišti v Drážďanech (Německo) 4. – 8. září 2006. Jednalo se o velkou a prestižní akci, na které bylo registrováno cca 2000 účastníků konference a 385 vystavovatelů z celého světa. Díky blízké vzdálenosti od našich hranic přijela řada účastníků z České republiky jak na konferenci, tak i na výstavu. O novinkách v tomto oboru jsme psali v poslední době poměrně hodně [1], proto se v tomto článku omezíme jen na několik zajímavostí z výstavy.

Na obr. 1 je poměrně rozsáhlá expozice PV panelů německé firmy Solara, lze zde rozpoznat PV panely na bázi polykrystalického i monokrystalického křemíku. Byly zde i malé flexibilní PV panely zapouzdřené do teflonu, které jsou použitelné jako drobné mobilní zdroje elektrické energie v terénu. Podobnou expozici PV panelů zde měla i řada dalších firem. Na výstavě se objevily i PV panely na bázi jiných polovodičů (např. GaAs), které mají vyšší účinnost přeměny energie a nižší citlivost na teplotu a radiační poškození, ale jejich objemy výroby jsou zanedbatelné v porovnání s panely na bázi křemíku, hlavně pro svoji cenu. Uplatňují se proto jen ve speciálních aplikacích, zejména ve vesmíru. Naproti tomu PV panely na bázi organických polymerních vrstev jsou možná výhodnější cenou,



Obr. 1 Expozice PV panelů německé firmy Solara



Obr. 2 Česká expozice firmy Poulek Solar, s.r.o. ve venkovním prostoru

ale mají zatím nízkou účinnost PV přeměny energie jen kolem 7 % a proto zatím nemají větší praktický význam.

Na obr. 2 je část české expozice firmy Poulek Solar, s.r.o. ve venkovním prostoru. Jedná se o fotovoltaický solární systém s pohyblivým automatickým stojanem typu TRAXLE a s hřebenovým koncentrátorem záření s maximálním výkonem 2 kW. Tento pohyblivý stojan byl rovněž popsán v práci [1] a o koncentrátorech záření bylo podrobně pojednáno v práci [2].



Obr. 3 Expozice elektronických měničů holandské firmy Mastervolt

Elektronické měniče jsou důležitým prvkem v konstrukci solárního fotovoltaického systému, chceme-li stejnosměrný proud z PV panelů přeměnit na střídavý proud buď pro účely přímého spojení se sítí v síťových systémech, nebo pro účely napájení spotřebičů střídavým proudem v ostrovních systémech. Expozice měničů holandské firmy Mastervolt je na obr. 3.

Výrobní kapacity čistého křemíku limitují světovou výrobu PV panelů a firmy shánějí další a další výrobní kapacity a know-how. Výroba křemíku je totiž na celé této výrobě investičně i energeticky nejnáročnější. Model zařízení na tažení monokrystalických křemíkových ingotů Czochralského metodou je na obr. 4.

Značná část expozice byla věnována i konstrukci různých PV systémů a solární architektury. Na obr. 5 je velký PV systém firmy SOLARWATT ve venkovní expozici, ve vnitřní expozici byla řada modelů staveb s PV panely zakomponovanými do konstrukce.

A nakonec problém akumulace vyrobené energie. Řada firem vystavovala různé elektrochemické akumulátory. Tato forma akumulace energie patří sice k méně efektivním, ale dobře se uplatňuje na odlehklých místech bez elektrické sítě k napájení drobných spotřebičů. Běžným použitím je napájení např. meteorologických stanic, radiokomunikačních pojítek, měřicích systémů v terénu, osvětlení v chalupách na samotě apod. Jiné formy akumulace energie jsme zatím na výstavě neviděli, očekávali bychom například výrobu vodíku elektrolýzou vody a jeho následného použití v palivových článcích.

Konferencí a výstav v oboru fotovoltaiky se zúčastňujeme již řadu let. Trvale rostoucí počet účastníků konference i počet vystavovatelů a návštěvníků výstavy svědčí o bouřlivém rozvoji tohoto oboru. Některé evropské země již přistoupily k dotační politice elektrické energie z fotovoltaické přeměny solární energie a v dalších zemích se podobná politika připravuje. Podle posledních informací se tato politika připravuje i v Číně a v Japonsku.



Obr. 4 Model zařízení na tažení monokrystalických křemíkových ingotů



Obr. 5 PV systém firmy SOLARWATT ve venkovní expozici

#### Literatura

- [1] Libra, M., Poulek, V., *Solární energie, fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*, kniha-monografie, Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, (2006), ISBN 80-213-1488-5
- [2] Libra, M., Poulek, V., *Koncentrace záření v solárních fotovoltaických systémech*, *Jemná mechanika a optika*, **51**, 3, (2006), str. 82-85

Doc. Ing. Martin Libra, CSc., Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Kamýčká 129, 165 21 Praha 6, tel.: 224 383 284, e-mail: libra@zf.czu.cz

Ing. Vladislav Poulek, CSc., Poulek Solar, s.r.o., Velvarská 9, 160 00 Praha 6, tel.: 603 342 719, e-mail: info@solar-trackers.com

## Technické pokyny pro autory

### Příspěvky se přijímají v elektronické formě.

**Požadavky na textovou část:** Text musí být pořízen v editoru MS WORD, doporučuje se font Times New Roman, velikost písma 12, dvojitě řádkování, formát stránky A4. Ve všech částech příspěvku používejte stejný font. Text pište do jednoho sloupce se zarovnáním k levému okraji, klávesu ENTER používejte pouze na konci odstavce.

Rovnice a vzorce uváděné na samostatných řádcích musí být vytvořeny modulem pro matematiku editoru MS WORD, rovnice a vzorce, které jsou součástí textu na řádku, zapisujte pomocí vložených symbolů, nikoliv zmíněným modulem. Při psaní matematických a chemických výrazů dodržujte základní pravidla: Veličiny pište kurzívou, matice tučně stojatě (antikva), vektory a skaláry tučnou kurzívou. Úplný (totální) diferenciál „d“ vždy stojatě. Ludolfovo číslo „ $\pi$ “ stojatě. Indexy, pokud vyjadřují veličinu, pište kurzívou, v opačném případě stojatě (např. max, min apod.). Imaginární jednotku „i“ stejně jako „j“ v elektrotechnice pište stojatě.

Dodržujte pravidla českého pravopisu; za interpunkčními znaménky je vždy mezera. Rovněž tak před a za znaménky „+“, „-“, „=“ apod. je vždy mezera.

**Požadavky na obrázky a grafy:** Grafickou část příspěvku nevěšujte do textu, ale dodávejte ji jako samostatné grafické soubory typu \*.CDR, \*.EPS, \*.TIF, \*.JPG a \*.AI (vektorovou

grafiku jako \*.EPS nebo \*.AI soubory, bitmapovou grafiku jako \*.TIF nebo \*.JPG soubory). V žádném případě nedodávejte obrázky v souboru typu \*.doc. Bitmapové soubory pro černobílé kresby musí mít rozlišení alespoň 600 dpi, pro černobílé fotografie nejméně 200 dpi a pro barevné nejméně 300 dpi. Při generování obrázků v COREL DRAW do souboru typu \*.EPS převedte text do křivek. U souborů typu \*.JPG používejte takový stupeň komprese, aby byla zachována co nejlepší kvalita obrázku. Velikost písma v obrázcích by neměla klesnout pod 1,5 mm (při předpokládané velikosti obrázku po zalomení do tiskové strany).

### Pokyny k předávání příspěvku

Ke každému textu nebo grafice musí být přiložen kontrolní výtisk nebo fotografie.

Dále je třeba, aby k článku autor dodal překlad resumé a názvu článku do anglického (českého – slovenského) jazyka, klíčová slova, jména všech autorů včetně titulů, jejich plných adres, telefonického spojení a případně e-mailové adresy.

Soubory je možno dodat na disketě, CD nebo na médiu ZIP 100 MB.

Ke každému příspěvku připojte seznam všech předávaných souborů a u každého souboru uveďte pomocí jakého software byl vytvořen.

Příspěvky zasílejte na adresu: Redakce časopisu JMO, Kabelíkova 1, 750 02 Přerov.

# Vyhodnocování funkce přenosu modulace digitální videokamery pomocí spektrální hustoty výkonu reflexního náhodného testu a jeho obrazu

*Článek pojednává o možném optimálním způsobu měření a počítačového vyhodnocování lokálně invariantní funkce přenosu modulace dané digitální videokamery ve fotografickém režimu pomocí spektrální hustoty výkonu bílým světlem nekoherentně osvětleného statického dvourozměrného reflexního náhodného testu a jeho digitálního elektrooptického obrazu. Tento test simuluje bílý šum a k jeho výrobě a k vyhodnocování obrazových dat bylo využito speciálně vyvinutých programů v rámci počítačového prostředí MATLAB 6.5. Zvolený vyhodnocovací postup vyplývá z prezentovaných spektrálních přenosových rovnic obsahujících kvadrát zjišťované funkce přenosu modulace, který byl potom navíc požadovaně vyhlazen. Některé získané výsledky jsou prezentovány graficky v pixelové škále relativních prostorových frekvencí a zhodnoceny se zřetelem k využitým rozdílným efektivním kamerovým pixelovým rozlišením a kvalitám obrazového snímání. Potvrzují, že využitý vyhodnocovací způsob umožňuje srovnávat zobrazovací kvalitu digitální videokamery při zmíněných volbách zobrazovacích podmínek.*

## 1. ÚVOD

Zatímco předcházející publikace [1] obsahuje matematickou analýzu a interpretaci fotografické činnosti digitální videokamery při předpokládaném lineárním elektrooptickém zobrazení statického dvourozměrného reflexního náhodného předmětu (testu) a prezentuje vhodné měřicí zařízení k zjišťování kvadrátu lokálně invariantní funkce přenosu modulace (FPM), který vyplývá ze zavedených spektrálních hustot výkonu (SHV) předmětu a jeho obrazu, tato navazující publikace pojednává o zvoleném optimálním způsobu měření a počítačového vyhodnocování zmíněného kvadrátu využitím počítačového prostředí MATLAB 6.5. Některé získané výsledky jsou znázorněny graficky a též zhodnoceny. Potvrzují fakt, že realizované měřicí zařízení a zvolený postup měření a vyhodnocování získaných dat jsou vhodnými prostředky k srovnávání zobrazovací kvality testované digitální videokamery při jejím různém efektivním pixelovém rozlišení a nastavitelné úrovni obrazového snímání (viz též [2]). Tyto prostředky jsou obohaceny dosud existujících metod měření FPM s náhodným testem (viz např. [3-8]).

Obdobně jako v publikaci [1] jsou v dalším textu spektrální veličiny opatřeny vlnovkou. Index 1 u prostorových souřadnic a prostorových frekvencí se vztahuje k vodorovným (řádkovým) směrům, kdežto index 2 přísluší svislým (sloupcovým) směrům dvourozměrné struktury testu. Navíc souřadnice a frekvence pixelové škály jsou čárkované, kdežto pro vzorkovací škálu nečárkované.

## 2. ZVOLENÝ ZPŮSOB MĚŘENÍ A VYHODNOCOVÁNÍ FUNKCE PŘENOSU MODULACE DIGITÁLNÍ VIDEOKAMERY

Testování dané digitální videokamery pomocí realizovaného měřicího zařízení, popsáno v sekci 3 a znázorněného na obr. 2 publikace [1], se vztahovalo k jejímu kombinovanému stupni SDK. Ten je tvořen zobrazovacím subsystémem ZS (optickou zobrazovací soustavou – objektivem), který vytváří optický obraz testu OB v její obrazové rovině (též pojmávané jako referenční rovina digitální videokamery), optickoelektrickým detekčním subsystémem DS v obrazové rovině subsystému ZS s předpokládanou pravouhlou periodickou vzorkovací mřížkou fotodetekčních buněk (čipů) a digitalizačním subsystémem DGS, realizujícím kvantování, převzorkování a binární kódování předtím vzorkovacími buňka-

mi produkovaného předvzorkovaného elektrického obrazového signálu do měřitelné formy digitálního elektrického obrazového signálu (digitálního elektrického videosignálu). Stupeň SDK je totiž z hlediska uvažované digitalizace přiměřeně charakteristický pro každou digitální videokameru, neboť v něm probíhají všechny nezbytné a typické procesy vedoucí k čistě digitálnímu elektrickému obrazovému signálu o Fourierově spektru  $\tilde{s}_{\text{SDK}}(\mu_1, \mu_2; \kappa; \chi_1, \chi_2)$  a SHV typu  $\tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(\mu_1, \mu_2; \kappa; \chi_1, \chi_2)$ , které jsou vztahy k referenční spektrální rovině vzorkovací mřížky (k vzorkovací škále). Zbývající kombinovaný rekonstrukční stupeň, označený RS na obr. 1 a 2 publikace [1], slouží jen k obnovení tohoto signálu do výsledné analogové optické formy, která je pozorovatelná na kamerovém displeji. Je tudíž pro měření digitální vlastnosti dané kamery méně podstatný a je akceptovatelně nahrazen vyhodnocovacím systémem počítače PC, který je spojen s kamerovým stupněm SDK prostřednictvím USB kabelu nebo vhodné záznamové paměťové karty.

Při zmíněné volbě jen kombinovaného stupně SDK se výchozí kompletní spojitá spektrální přenosová rovnice SHV (17) z publikace [1] změní na odpovídající jednodušší lokálně variantní (anizoplanatický) tvar

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(\mu_1, \mu_2; \kappa; \chi_1, \chi_2) &\hat{=} \tilde{\varphi}_{\text{DGS}}(\mu_1, \mu_2; \kappa; \chi_1, \chi_2) = \\ &= G_1^2 \tilde{\varphi}_{\text{OB}}(\mu_1, \mu_2) \left| \tilde{h}_{\text{SDK}}(\mu_1, \mu_2; \kappa; \chi_1, \chi_2) \right|^2 + \\ &+ \tilde{\varphi}_{\text{evk}}(\mu_1, \mu_2; \kappa; \chi_1, \chi_2). \end{aligned} \quad (1)$$

Přitom v souladu s publikací [1] jsou  $(\mu_1, \mu_2)$  relativní prostorové frekvence ( $0 \leq |\mu_1| \leq 1, 0 \leq |\mu_2| \leq 1$ ) vyjádřené v počtech spektrálních harmonických cyklů (složek) v kladných rozsazích délkových vzorkovacích period ( $\xi_1, \xi_2$ ) pro jejich vodorovný (řádkový) a svislý (sloupcový) směr (jde tedy o prostorové frekvence ve vzorkovací škále). Nezáporné lokální parametry  $(\chi_1, \chi_2)$  reprezentují přiměřené posuvy ( $0 \leq \chi_1 \leq 1, 0 \leq \chi_2 \leq 1$ ) uvažovaného náhodného testu vzhledem k vzorkovací mřížce v rozsazích  $(\xi_1, \xi_2)$ , způsobující lokální variantnost kamerového elektrooptického zobrazení, a  $\kappa$  je kladný kvantizační parametr (celkový počet kvantizačních hladin předpokládaného rovnoměrného kvantování elektrického obrazového signálu daný konstrukcí uvažované digitální videokamery).

$G_1$  představuje kladný transformační součinitel předpokládané lineární konverze spojitého optického obrazového signálu na vzorkovaný elektrický obrazový signál,  $\tilde{\varphi}_{\text{OB}}(\mu_1, \mu_2)$  značí SHV testu a  $\tilde{\varphi}_{\text{evk}}(\mu_1, \mu_2; \kappa, \chi_1, \chi_2)$ , je celková SHV působícího elektrického fotodetekčního (e), vzorkovacího (v) a kvantizačního (k) šumu. Výraz

$$\begin{aligned} & \tilde{h}_{\text{SDK}}(\mu_1, \mu_2; \kappa; \chi_1, \chi_2) = \\ & = \tilde{h}_{\text{ZS}}(\mu_1 - \chi_1, \mu_2 - \chi_2) \tilde{h}_{\text{DS}}(\mu_1, \mu_2) \tilde{h}_{\text{DGS}}(\mu_1, \mu_2; \kappa) \end{aligned} \quad (2)$$

vyjadřuje celkovou obecně lokálně variantní funkci přenosu (FP) uvažovaného stupně SDK, jejíž modul tvoří jeho funkci přenosu modulace (FPM) a fáze reprezentuje jeho funkci přenosu fáze (FPF). FP a FPM jsou v tomto článku zvoleny jako moderní kritéria kvality uvažovaného kamerového stupně SDK.

Požadovaný lokálně invariantní (izoplanatický) tvar relace (1), příslušející splnění Nyquistova vzorkovacího teoremu (13) z publikace [1] nebo dosažitelný vhodným průměrováním spekter (1) přes přiměřené hodnoty parametrů příčných posuvů ( $\chi_1, \chi_2$ ) podle publikace [1], lze vyjádřit v explicitní formě pro  $|\tilde{h}_{\text{SDK}}(\mu_1, \mu_2; \kappa)|^2$  takto:

$$|\tilde{h}_{\text{SDK}}(\mu_1, \mu_2; \kappa)|^2 = \frac{\tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(\mu_1, \mu_2; \kappa) - \tilde{\varphi}_{\text{evk}}(\mu_1, \mu_2; \kappa)}{G_1^2 \tilde{\varphi}_{\text{OB}}(\mu_1, \mu_2)}. \quad (3)$$

Přítom spektrální člen  $\tilde{\varphi}_{\text{evk}}(\mu_1, \mu_2; \kappa)$  vystihuje korekci na celkový šum (evk), který vyplývá z odchylek prostorové alternativy spektra (1) od jejího průměrného tvaru. Jestliže je funkce (3) uvažovaného stupně SDK určena, pak odpovídající její celková forma pro celou digitální videokameru je principiálně zjistitelná pomocí lokálně invariantní alternativy vztahů (3) z publikace [1]. Jsou-li rozdíly mezi jednotlivými výsledky (1) zanedbatelné, tj. prakticky tyto výsledky nezávisí na ( $\chi_1, \chi_2$ ), jde prakticky o požadované lokálně invariantní zobrazení. Jestliže navíc jsou všechny šumové složky (e, v, k) ve výrazu (3) zanedbatelné, tento výraz se redukuje na jednodušší tvar

$$|\tilde{h}_{\text{SDK}}(\mu_1, \mu_2; \kappa)|^2 = \frac{\tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(\mu_1, \mu_2; \kappa)}{G_1^2 \tilde{\varphi}_{\text{OB}}(\mu_1, \mu_2)}. \quad (4)$$

Zároveň pro praktická využití se spektra (3) a (4) obvykle ještě normují tak, aby platila normovací podmínka

$$\tilde{h}_{\text{SDK}}(\mu_1 = 0, \mu_2 = 0; \kappa) = 1. \quad (5)$$

Využitý počítačový způsob zjišťování hodnot spekter (3) a (4) pomocí softwaru MATLAB 6.5 [9] a příslušně vyvinutých programů je založen na následujících lokálně invariantních analogiích diskretních vztahů (24), (26) až (28) z publikace [1], vztažených k vzorkovací soustavě o kladných prostorových polohách  $n_1 = 1, 2, \dots, N_1$  a  $n_2 = 1, 2, \dots, N_2$  vzorkovacích buněk, jejichž celkové počty jsou  $N_1$  a  $N_2$ :

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa) &= \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} s_{\text{SDK}}(n_1, n_2; \kappa) \times \\ & \times \exp\left[-i 2\pi \left(\frac{n_1}{N_1} v_1 + \frac{n_2}{N_2} v_2\right)\right], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa) = \frac{1}{N_1 N_2} \left| \left[ \tilde{s}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa) \right]_{N_1 N_2} \right|^2, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(v_1; \kappa) &= \frac{1}{N_2} \sum_{v_2=1}^{N_2} \left| \left[ \tilde{s}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa) \right]_{N_1 N_2} \right|^2 = \\ & = N_1 \sum_{v_2=1}^{N_2} \tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(v_2; \kappa) &= \frac{1}{N_1} \sum_{v_1=1}^{N_1} \left| \left[ \tilde{s}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa) \right]_{N_1 N_2} \right|^2 = \\ & = N_2 \sum_{v_1=1}^{N_1} \tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa). \end{aligned} \quad (9)$$

Zatímco vztah (6) vystihuje diskretní Fourierovu transformaci (DFT), která je základem pro odpovídající rychlou Fourierovu transformaci (FFT), a relace (7) až (9) představují spektrální periodogramové definice SHV, vzorce

$$v_1 = \mu_1 N_1, \quad v_2 = \mu_2 N_2 \quad (10)$$

definují využitě relativní prostorové frekvence ( $1 \leq v_1 \leq N_1, 1 \leq v_2 \leq N_2$ ) ve vzorkovací škále. Vystihují počty spektrálních harmonických cyklů (složek) vztažených k celé oblasti  $N_1 \times N_2$  vzorkovacích buněk.

Obdobně lze pro projevující se celkové šumové spektrum (evk) psát:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathcal{N}}_{\text{evk}}(v_1, v_2; \kappa) &= \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} \mathcal{N}_{\text{evk}}(n_1, n_2; \kappa) \times \\ & \times \exp\left[-i 2\pi \left(\frac{n_1}{N_1} v_1 + \frac{n_2}{N_2} v_2\right)\right], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\tilde{\varphi}_{\text{evk}}(v_1, v_2; \kappa) = \frac{1}{N_1 N_2} \left| \left[ \tilde{\mathcal{N}}_{\text{evk}}(v_1, v_2; \kappa) \right]_{N_1 N_2} \right|^2, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_{\text{evk}}(v_1; \kappa) &= \frac{1}{N_2} \sum_{v_2=1}^{N_2} \left| \left[ \tilde{\mathcal{N}}_{\text{evk}}(v_1, v_2; \kappa) \right]_{N_1 N_2} \right|^2 = \\ & = N_1 \sum_{v_2=1}^{N_2} \tilde{\varphi}_{\text{evk}}(v_1, v_2; \kappa), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_{\text{evk}}(v_2; \kappa) &= \frac{1}{N_1} \sum_{v_1=1}^{N_1} \left| \left[ \tilde{\mathcal{N}}_{\text{evk}}(v_1, v_2; \kappa) \right]_{N_1 N_2} \right|^2 = \\ & = N_2 \sum_{v_1=1}^{N_1} \tilde{\varphi}_{\text{evk}}(v_1, v_2; \kappa). \end{aligned} \quad (14)$$

Takže ekvivalentní diskretní analogii spojitě relace (3) je základní bezšumový vztah

$$|\tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa)|^2 = \frac{\tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa) - \tilde{\varphi}_{\text{evk}}(v_1, v_2; \kappa)}{G_1^2 \tilde{\varphi}_{\text{OB}}(v_1, v_2)}, \quad (15)$$

kteří však bývá navíc zatížen fluktuacemi dat v důsledku diskretnosti výpočtů a jiných náhodných změn. Jejich vhodné vyhlazení (zkratka vyhl) vede k následujícím měřitelným výsledným lokálně invariantním a vyhlazeným (fitovaným) relacím

$$\begin{aligned} |\tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa)|^2 &\triangleq \left[ |\tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa)|^2 \right]_{\text{vyhl}} = \\ & = \left[ \frac{\tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa) - \tilde{\varphi}_{\text{evk}}(v_1, v_2; \kappa)}{G_1^2 \tilde{\varphi}_{\text{OB}}(v_1, v_2)} \right]_{\text{vyhl}}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} |\tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1; \kappa)|^2 &\triangleq \left[ |\tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1; \kappa)|^2 \right]_{\text{vyhl}} = \\ & = \left[ \frac{\tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(v_1; \kappa) - \tilde{\varphi}_{\text{evk}}(v_1; \kappa)}{G_1^2 \tilde{\varphi}_{\text{OB}}(v_1)} \right]_{\text{vyhl}}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \left| \tilde{h}_{\text{SDK}}(v_2; \kappa) \right|^2 &\triangleq \left[ \left| \tilde{h}_{\text{SDK}}(v_2; \kappa) \right|^2 \right]_{\text{vyhl}} = \\ &= \left[ \frac{\tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(v_2; \kappa) - \tilde{\varphi}_{\text{evk}}(v_2; \kappa)}{G_1^2 \tilde{\varphi}_{\text{OB}}(v_2)} \right]_{\text{vyhl}}, \end{aligned} \quad (18)$$

kde pro nyní uvažovanou vzorkovací škálu platí upravené zobecněné analogie vztahů (24), (26) až (28) z publikace [1] ve tvarech

$$\tilde{s}_{\text{OB}}(v_1, v_2) = \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} s_{\text{OB}}(n_1, n_2) \exp \left[ -i 2\pi \left( \frac{n_1}{N_1} v_1 + \frac{n_2}{N_2} v_2 \right) \right], \quad (19)$$

$$\tilde{\varphi}_{\text{OB}}(v_1, v_2) = \frac{1}{N_1 N_2} \left[ \left[ \tilde{s}_{\text{OB}}(v_1, v_2) \right]_{N_1 N_2} \right]^2, \quad (20)$$

$$\tilde{\varphi}_{\text{OB}}(v_1) = \frac{1}{N_2} \sum_{v_2=1}^{N_2} \left[ \left[ \tilde{s}_{\text{OB}}(v_1, v_2) \right]_{N_1 N_2} \right]^2 = N_1 \sum_{v_2=1}^{N_2} \tilde{\varphi}_{\text{OB}}(v_1, v_2), \quad (21)$$

$$\tilde{\varphi}_{\text{OB}}(v_2) = \frac{1}{N_1} \sum_{v_1=1}^{N_1} \left[ \left[ \tilde{s}_{\text{OB}}(v_1, v_2) \right]_{N_1 N_2} \right]^2 = N_2 \sum_{v_1=1}^{N_1} \tilde{\varphi}_{\text{OB}}(v_1, v_2). \quad (22)$$

Přitom  $s_{\text{OB}}(n_1, n_2)$  vystihuje dvourozměrnou prostorovou strukturu testu OB. Zároveň platí relace

$$\tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa) = \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} h_{\text{SDK}}(n_1, n_2) \exp \left[ -i 2\pi \left( \frac{n_1}{N_1} v_1 + \frac{n_2}{N_2} v_2 \right) \right], \quad (23)$$

$$\tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1; \kappa) = \sum_{v_2=1}^{N_2} \tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa), \quad (24)$$

$$\tilde{h}_{\text{SDK}}(v_2; \kappa) = \sum_{v_1=1}^{N_1} \tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa), \quad (25)$$

kde  $h_{\text{SDK}}(n_1, n_2)$  reprezentuje funkci impulzní odezvy (FIO) stupně SDK digitální videokamery (jejíž význam je zmíněn v úvodu publikace [1]).

V případech, kdy uvažovaná šumová spektra jsou zanedbatelná, prakticky platí vyhlazená analogie relace (4) v akceptovatelných tvarech

$$\begin{aligned} \left| \tilde{h}_{\text{SKD}}(v_1, v_2; \kappa) \right|^2 &\triangleq \left[ \left| \tilde{h}_{\text{SKD}}(v_1, v_2; \kappa) \right|^2 \right]_{\text{vyhl}} = \\ &= C \left[ \tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(v_1, v_2; \kappa) \right]_{\text{vyhl}}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\left| \tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1; \kappa) \right|^2 \triangleq \left[ \left| \tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1; \kappa) \right|^2 \right]_{\text{vyhl}} = C_1 \left[ \tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(v_1; \kappa) \right]_{\text{vyhl}}, \quad (27)$$

$$\left| \tilde{h}_{\text{SDK}}(v_2; \kappa) \right|^2 \triangleq \left[ \left| \tilde{h}_{\text{SDK}}(v_2; \kappa) \right|^2 \right]_{\text{vyhl}} = C_2 \left[ \tilde{\varphi}_{\text{SDK}}(v_2; \kappa) \right]_{\text{vyhl}}. \quad (28)$$

Přitom naznačené vyhlazení spočívá ve spojitě nefluktující aproximaci spekter s náhodnými změnami dat a bylo v rámci MATLABu 6.5 realizováno odděleně pro vodorovný a svislý směr prostorových frekvencí ( $v_1, v_2$ ) pomocí exponenciální polynommické vyhlazovací funkce typu

$$\left| \tilde{h}(v) \right|^2 = \exp(av^6 + bv^5 + cv^4 + dv^3 + ev^2 + fv + g), \quad (29)$$

kde  $a, b, c, d, e, f$  a  $g$  jsou vhodné reálné konstanty, které vyplývají z aplikace metody minimální střední kvadratické odchylky. Záro-

veň byly zvoleny konstanty  $C, C_1$  a  $C_2$  tak, aby zajišťovaly splnění normovacích podmínek

$$\begin{aligned} \left| \tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1 = 1, v_2 = 1; \kappa) \right|^2 &= 1, \quad \left| \tilde{h}_{\text{SDK}}(v_1 = 1; \kappa) \right|^2 = 1, \\ \left| \tilde{h}_{\text{SDK}}(v_2 = 1; \kappa) \right|^2 &= 1. \end{aligned} \quad (30)$$

Těž se předpokládá, že počítačově realizovaný náhodný test podle publikace [1] vykazuje v celém jeho reprezentačním frekvenčním pásmu vlastnosti bílého šumu, kdy platí

$$\begin{aligned} \left[ \tilde{\varphi}_{\text{OB}}(v_1, v_2) \right]_{\text{vyhl}} &= \text{konst.}, \quad \left[ \tilde{\varphi}_{\text{OB}}(v_1) \right]_{\text{vyhl}} = \text{konst.}, \\ \left[ \tilde{\varphi}_{\text{OB}}(v_2) \right]_{\text{vyhl}} &= \text{konst.} \end{aligned} \quad (31)$$

K získání lokálně invariantní FPM digitální videokamery jen splněním Nyquistova vzorkovacího teorému (13) z publikace [1], kdy vzorkovací šum (nedokonalost vzorkování) se neprojevuje, je třeba v měřicím zařízení podle obr. 2 publikace [1] nastavit adekvátní zobrazovací podmínky. Jde například o vhodné příčné zvětšení  $M$  zobrazovacího subsystému ZS testované videokamery, které vede k požadované periodě pixelů (obrazových elementů) měřicího testu zobrazeného do její fotodetekční vzorkovací roviny. Jsou-li obecně ( $\xi'_1, \xi'_2$ ) dané délkové pixelové periody testu OB, zobrazeného do referenční fotodetekční roviny uvažované digitální videokamery, a ( $\xi_1, \xi_2$ ) délkové vzorkovací periody ve vodorovném a svislém směru této roviny, pak lze zmíněný teorém (13) z publikace [1] ekvivalentně vyjádřit v délkových škálách pomocí nerovností

$$\frac{1}{2\xi'_1} \leq \frac{1}{2\xi_1}, \quad \frac{1}{2\xi'_2} \leq \frac{1}{2\xi_2}, \quad (32)$$

neboli

$$\xi'_1 \geq \xi_1, \quad \xi'_2 \geq \xi_2. \quad (33)$$

Přitom výrazy ( $1/2\xi'_1, 1/2\xi'_2$ ) představují mezní prostorové frekvence obrazu testu v počtech harmonických cyklů (čar) na jednotku délky (mm), tj. jeho limitní rozlišení, a znaky ( $1/2\xi_1, 1/2\xi_2$ ) jsou mezní prostorové frekvence (limitní rozlišení) digitální videokamery (její vzorkovací mřížky).

Jsou-li uvažovány mezní relativní prostorové frekvence testu ( $\mu'_{1\text{mez}}, \mu'_{2\text{mez}}$ ) v pixelové škále ( $\mu'_1, \mu'_2$ ), která vyjadřuje počty spektrálních harmonických cyklů v rozsazích délkových pixelových period ( $\xi'_1, \xi'_2$ ), nebo ekvivalentně jeho mezní relativní prostorové frekvence ( $v'_{1\text{mez}}, v'_{2\text{mez}}$ ) v pixelové škále ( $v'_1, v'_2$ ) splňující v rámci MATLABu 6.5 vztahy

$$v'_1 = \mu'_1 N'_1, \quad v'_2 = \mu'_2 N'_2 \quad (34)$$

a vystihující počty spektrálních harmonických cyklů vztažených k celé pixelové oblasti ( $N'_1, N'_2$ ), pak platí  $1 \leq v'_1 \leq N'_1$  a  $1 \leq v'_2 \leq N'_2$ . Odpovídající relace jsou

$$\mu'_{1\text{mez}} = \frac{\xi'_1}{2\xi'_1} = \frac{1}{2}, \quad \mu'_{2\text{mez}} = \frac{\xi'_2}{2\xi'_2} = \frac{1}{2}, \quad (35)$$

$$v'_{1\text{mez}} = \mu'_{1\text{mez}} N'_1 = \frac{N'_1}{2}, \quad v'_{2\text{mez}} = \mu'_{2\text{mez}} N'_2 = \frac{N'_2}{2}, \quad (36)$$

kde  $N'_1 = N_{1\text{OB}}$  a  $N'_2 = N_{2\text{OB}}$  jsou celkové efektivní počty pixelů testu. Podmínkám (32) pak přísluší nerovnosti

$$\frac{N'_1}{2} \leq \frac{\xi'_1 N'_1}{2\xi_1}, \quad \frac{N'_2}{2} \leq \frac{\xi'_2 N'_2}{2\xi_2}. \quad (37)$$

Ekvivalenty relací (35) až (37) pro vzorkovací škály ( $\mu_1, \mu_2$ ) a ( $v_1, v_2$ ), již dříve interpretované v této sekci a vzájemně související vzorců (10), jsou vztahy

$$\mu_{1\text{mez}} = \frac{\xi_1}{2\xi'_1}, \mu_{2\text{mez}} = \frac{\xi_2}{2\xi'_2}, \quad (38)$$

$$v_{1\text{mez}} = \frac{\xi_1 N_1}{2\xi'_1}, v_{2\text{mez}} = \frac{\xi_2 N_2}{2\xi'_2}, \quad (39)$$

$$\frac{\xi_1 N_1}{2\xi'_1} \leq \frac{N_1}{2}, \frac{\xi_2 N_2}{2\xi'_2} \leq \frac{N_2}{2}, \quad (40)$$

kde  $N_1$  a  $N_2$  jsou již dříve zmíněné celkové efektivní počty vzorkovacích buněk. Přitom rovnosti v relacích (37) a (40) přísluší optimálním hodnotám  $\xi'_1 = \xi_1$ ,  $\xi'_2 = \xi_2$ .

Je-li  $M$  nastavené příčné zvětšení testované digitální videokamery ( $0 < M \leq 1$ ) a jsou-li  $L_{1\text{OB}}$  a  $L_{2\text{OB}}$  skutečné příčné rozměry testu, pak lze pixelové periody ( $\xi'_1$ ,  $\xi'_2$ ) testu vystihnout vztahy

$$\xi'_1 = \frac{L_{1\text{OB}}}{N'_1} M, \xi'_2 = \frac{L_{2\text{OB}}}{N'_2} M. \quad (41)$$

Přitom vzorkovací periody ( $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ) splňují relace

$$\xi_1 = \frac{L_{1\text{DS}}}{N_1}, \xi_2 = \frac{L_{2\text{DS}}}{N_2}, \quad (42)$$

kde  $L_{1\text{DS}}$  a  $L_{2\text{DS}}$  jsou skutečné příčné rozměry roviny kamerového fotodetektorního subsystému DS, jimž přísluší efektivní počty  $N_1$  a  $N_2$  vzorkovacích buněk. Takže nezbytné příčné zvětšení  $M$  testované digitální videokamery pro zajištění podmínek (32) absence vzorkovacího šumu vyhovuje při využití vztahů (41) a (42) ekvivalentním obecným relacím

$$M \geq M_{1\text{opt}} = \frac{L_{1\text{DS}}}{L_{1\text{OB}}} \frac{N'_1}{N_1}, M \geq M_{2\text{opt}} = \frac{L_{2\text{DS}}}{L_{2\text{OB}}} \frac{N'_2}{N_2}, \quad (43)$$

kde rovnosti přísluší optimálním příčným zvětšením  $M_{1\text{opt}}$  a  $M_{2\text{opt}}$  uvažované videokamery.

Protože u realizovaného náhodného testu podle obr. 3 publikace [1] platí  $L_{1\text{OB}} = L_{2\text{OB}} = L_{\text{OB}}$ ,  $N'_1 = N'_2 = N$  a tudíž  $\xi'_1 = \xi'_2 = \xi'$ , rovnocenné podmínky (32), (37), (40) a (43) mají tyto adekvátní tvary:

$$\frac{1}{2\xi'} \leq \frac{1}{2\xi_1}, \frac{1}{2\xi'} \leq \frac{1}{2\xi_2}, \quad (44)$$

$$\frac{N}{2} \leq \frac{\xi' N}{2\xi_1}, \frac{N}{2} \leq \frac{\xi' N}{2\xi_2}, \quad (45)$$

$$\frac{\xi_1 N_1}{2\xi'} \leq \frac{N_1}{2}, \frac{\xi_2 N_2}{2\xi'} \leq \frac{N_2}{2}, \quad (46)$$

$$M \geq M_{1\text{opt}} = \frac{L_{1\text{DS}}}{L_{\text{OB}}} \frac{N}{N_1}, M \geq M_{2\text{opt}} = \frac{L_{2\text{DS}}}{L_{\text{OB}}} \frac{N}{N_2}. \quad (47)$$

Z předcházející teorie vyplývá, že k experimentálnímu zjištění uvažovaného kvadrátu FPM testované digitální videokamery je obecně třeba v souladu se vztahy (16) až (18) nejdříve zjistit odpovídající obecně fluktuující a přes přiměřené hodnoty parametrů příčných posuvů ( $\chi_1$ ,  $\chi_2$ ) zprůměrované SHV výsledného obrazového signálu a jeho výsledné parazitní šumové složky (příslušející odchylkám od průměrného tvaru výsledného prostorově závislého obrazového signálu) a potom provést požadované vyhlazení jejich relativního rozdílu při předběžné znalosti SHV využitého náhodného testu. Popsaný postup byl proveden zvláště pro vodorovný směr

řádků a zvláště pro svislý směr sloupců jednotlivých obrazových realizací. Přitom vyhodnocovací výpočty umožnily vyvinuté speciální programy v rámci počítačového prostředí MATLAB 6.5, a to pro nastavené efektivní obrazové rozlišení testované digitální videokamery  $N_1 \times N_2 = 1568 \times 1152$  nebo  $N_1 \times N_2 = 640 \times 480$  pixelů při volitelných úrovních kvality obrazového snímání FINE (nejkvalitnější snímání), NORMAL (běžně využívané snímání) a ECONOMY (úsporné snímání). Rozpisy a vysvětlující popisy využitých základních počítačových programů pro výrobu náhodného testu a vyhodnocování SHV a kvadrátu FPM testované digitální videokamery jsou shrnuty v práci [10].

### 3. ZÍSKANÉ VÝSLEDKY MĚŘENÍ FUNKCE PŘENOSU MODULACE DIGITÁLNÍ VIDEOKAMERY

Jde o některé výsledky měření FPM stupně SDK zvolené digitální videokamery Panasonic NV-MX300EG o specifikaci uvedené v publikaci [11] při využití měřicího zařízení podle sekce 3 publikace [1]. Výsledky jsou prezentovány graficky pomocí počítačového softwaru CorelDraw 9. Grafy se výhodně vztahují k pixelové škále relativních prostorových frekvencí ( $v'_1$ ,  $v'_2$ ) o nejužitečnějších rozmezích  $\langle 1, N/2 = 400 \rangle$  a jejich matematický fundament tvoří vztahy (16) až (18) a (26) až (31). Byl ověřen vliv obou v předcházející sekci zmíněných kamerových efektivních rozlišení  $1568 \times 1152$  a  $640 \times 480$  pixelů a kvality obrazového snímání FINE, NORMAL a ECONOMY na výsledky měření vyhlazených a lokálně variantních kvadrátů FPM dané digitální videokamery. Pro srovnávací účely bylo zvoleno jednotné opticky nastavené konstantní příčné zvětšení  $M = 0,1$  ( $1/M = 10$ ) testované digitální videokamery v režimu s automatickou optimální regulací velikosti clony, rychlosti závěrky a mechanismu pro vyvažování složek bílé barvy v závislosti na světelných podmínkách.

Měřicí parametry v zařízení podle obr. 2 publikace [1] pro vodorovný (řádkový) a vertikální (sloupcový) směr využitého čtvercového reflexního náhodného testu, simulujícího bílý šum, nejdříve byly  $L_{1\text{OB}} = L_{2\text{OB}} = L_{\text{OB}} = 282$  mm,  $N_{1\text{OB}} = N_{2\text{OB}} = N'_1 = N'_2 = N = 800$ ,  $L_{1\text{DS}} = 32$  mm,  $L_{2\text{DS}} = 24$  mm. Při volbě celkových efektivních počtů  $N_1 = 1568$  a  $N_2 = 1152$  vzorkovacích buněk mají odpovídající pixelové a vzorkovací délkové periody (41) a (42) hodnoty  $\xi'_1 = \xi'_2 = \xi' = 0,03525$  mm a  $\xi_1 = 0,02041$  mm,  $\xi_2 = 0,02083$  mm. Jim přísluší mezní délkové prostorové frekvence testu a testované digitální videokamery o velikostech  $1/2\xi' = 14,1844$  mm<sup>-1</sup> a  $1/2\xi_1 = 24,5$  mm<sup>-1</sup>,  $1/2\xi_2 = 24,0$  mm<sup>-1</sup>. Jejich relativní hodnoty, související s příslušně upravenými vztahy (36) a (39), jsou  $v'_{1\text{mez}} = v'_{2\text{mez}} = N/2 = 400$  a  $v_{1\text{mez}} = \xi_1 N_1 / 2\xi' = 453,94156$  a  $v_{2\text{mez}} = \xi_2 N_2 / 2\xi' = 340,12984$ . Dále platí  $\xi' N / 2\xi_1 = 690,83782$ ,  $\xi' N / 2\xi_2 = 676,90830$ ,  $N_1 / 2 = 784,0$ ,  $N_2 / 2 = 576,0$  a optimální příčná zvětšení (47) jsou  $M_{1\text{opt}} = 0,05789$  ( $1/M_{1\text{opt}} = 17,2725$ ),  $M_{2\text{opt}} = 0,05910$  ( $1/M_{2\text{opt}} = 16,9200$ ). Předcházející hodnoty pro shora uvedené měřicí parametry tedy splňují nerovnosti (44) až (47). To znamená, že pro nastavené příčné zvětšení  $M = 0,1$  testované digitální videokamery zajistily lokálně invariantní zobrazení bez vlivu vzorkovacího šumu. Nebylo tedy zapotřebí provádět průměrování naměřených dat přes přiměřené hodnoty parametrů příčných posuvů ( $\chi_1$ ,  $\chi_2$ ), případně ( $N_1 \chi_1$ ,  $N_2 \chi_2$ ) nebo ( $N_1 \chi_1 / M$ ,  $N_2 \chi_2 / M$ ). Tento fakt byl i experimentálně potvrzen provedením takového průměrování, které podle očekávání prakticky vedlo ke stejným výsledkům jako při absenci průměrování. Přitom možné přechody vzorkovací škály na pixelovou škálu zajišťují převodní vztahy

$$v'_{1\text{mez}} = \frac{\xi' N}{\xi_1 N_1} v_{1\text{mez}} = 0,88117 v_{1\text{mez}},$$

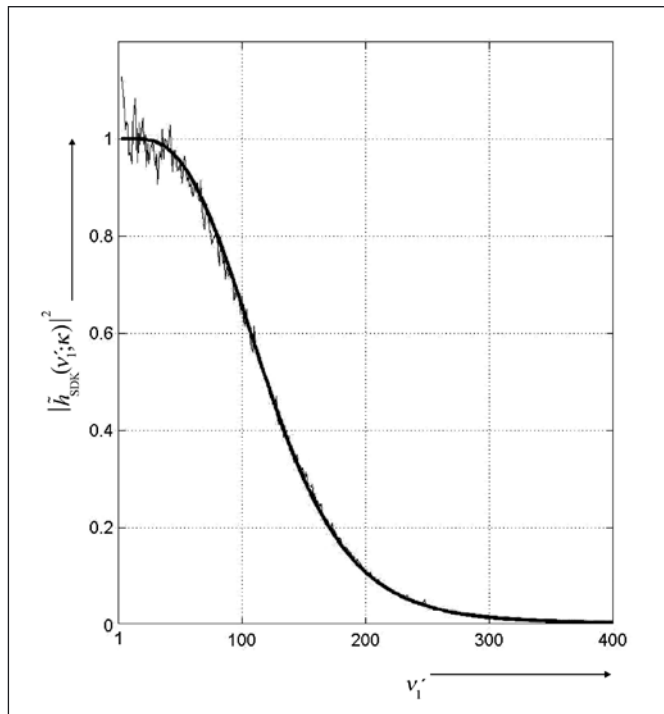
$$v'_{2\text{mez}} = \frac{\xi' N}{\xi_2 N_2} v_{2\text{mez}} = 1,17519 v_{2\text{mez}}. \quad (48)$$

Jiná situace nastala pro využití jiné celkové efektivní počty  $N_1 = 640$  a  $N_2 = 480$  vzorkovacích buněk, kdy hodnoty ostatních měřicích parametrů, zmíněných v předcházejícím odstavci, zůstaly nezměněny. Odpovídající charakteristické hodnoty jsou:  $\xi' = 0,03525$  mm,  $\xi_1 = \xi_2 = 0,05$  mm,  $1/2\xi' = 14,1844$  mm<sup>-1</sup>,  $1/2\xi_1 = 1/2\xi_2 = 10$  mm<sup>-1</sup>,  $v'_{1mez} = v'_{2mez} = N/2 = 400$ ,  $v_{1mez} = 453,90071$ ,  $v_{2mez} = 340,42553$ ,  $\xi'N/2\xi_1 = \xi'N/2\xi_2 = 282,0$ ,  $N_1/2 = 320$ ,  $N_2/2 = 240$ ,  $M_{1opt} = M_{2opt} = 0,14184$  ( $1/M_{1opt} = 1/M_{2opt} = 7,0502$ ). Je vidět, že nerovnosti (44) až (47) nyní nejsou splněny. Takže se nyní při nezměněné hodnotě  $M = 0,1$  projevuje vzorkovací šum vedoucí k nepříznivé lokální varianci zobrazení. K jejímu odstranění bylo tudíž třeba měření provádět pro různě nastavené průměrné hodnoty parametrů ( $\chi_1, \chi_2$ ) a získané dílčí výsledky řádně zprůměrovat přes tyto hodnoty (bylo vždy zvoleno 100 snímků). Přitom platí převodní relace

$$v'_{1mez} = \frac{\xi'N}{\xi_1 N_1} v_{1mez} = 0,88125 v_{1mez},$$

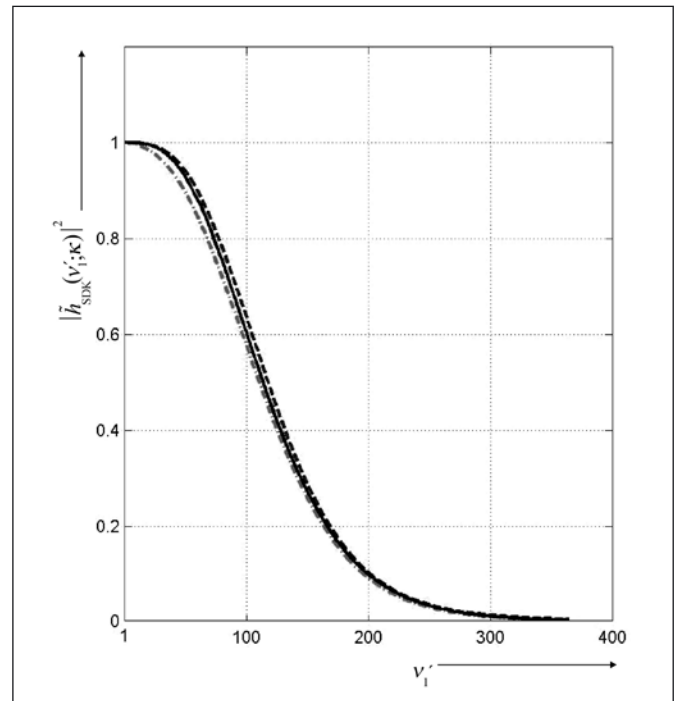
$$v'_{2mez} = \frac{\xi'N}{\xi_2 N_2} v_{2mez} = 1,1750 v_{2mez}. \quad (49)$$

Předcházející tvrzení se projevila u naměřených kvadrátů FPM testované digitální videokamery, jejichž uvažované jednorozměrné tvary pro bílé nekoherentní světlo jsou znázorněny na obr. 1 až 5. Fluktuující křivka a její vyhlazená forma podle doplňujícího obr. 1 přísluší změřenému lokálně invariantnímu kvadrátu sloupcové FPM typu  $|\tilde{h}_{SDK}(v'_1; \kappa)|^2$ , nyní pro optimální příčné zvětšení  $M_{1opt} = 0,05789$ , obrazové a vzorkovací šumem neovlivněné efektivní rozlišení  $1568 \times 1152$  pixelů a úroveň kvality obrazového snímání FINE testované digitální videokamery. V tomto případě totiž pixelová škála uvažovaných relativních prostorových frek-

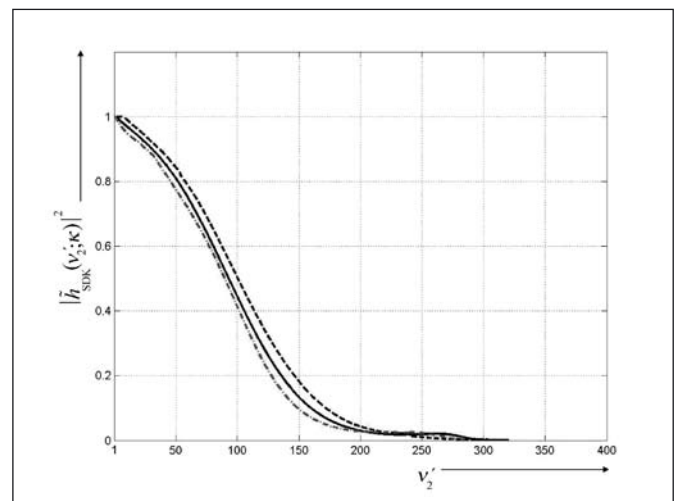


Obr. 1 Fluktuující sloupcové spektrum  $|\tilde{h}_{SDK}(v'_1; \kappa)|^2$  kvadrátu FPM testované digitální videokamery Panasonic NV-MX300EG ve fotografickém režimu, získané realizovanou metodou měření SHV dvourozměrného reflexního náhodného testu a jeho obrazu v nekoherentním bílém světle, pro optimální příčné zvětšení  $M_{1opt} = 0,05789$ , efektivní rozlišení  $1568 \times 1152$  pixelů a kvalitu obrazového snímání FINE. Jeho vyhlazenou formu tvoří klesající spojité křivka

vencí  $v'_1$  pro vodorovný směr obrazových řádků končí při mezní hodnotě  $v'_{1mez} = N/2 = 400$ , která splňuje nezbytné podmínky (45) pro absenci vzorkovacího šumu. Srovnání dále získaných vyhlazených forem zmíněného spektra  $|\tilde{h}_{SDK}(v'_1; \kappa)|^2$  pro jednotně nastavené příčné zvětšení  $M = 0,1$ , nezměněné kamerové rozlišení  $1568 \times 1152$  pixelů a uvažované tři kvality obrazového snímání FINE (čárkovaná křivka), NORMAL (plná křivka) a ECONOMY (čerchovaná křivka) poskytuje obr. 2. Podmínky (45) pro absenci vzorkovacího šumu, a tedy i pro lokálně invariantní zobrazení, splňuje také naměřené řádkové spektrum  $|\tilde{h}_{SDK}(v'_2; \kappa)|^2$  podle obr. 3 pro kamerové rozlišení  $1568 \times 1152$  pixelů a nastavené kvality obrazového snímání FINE, NORMAL a ECONOMY.

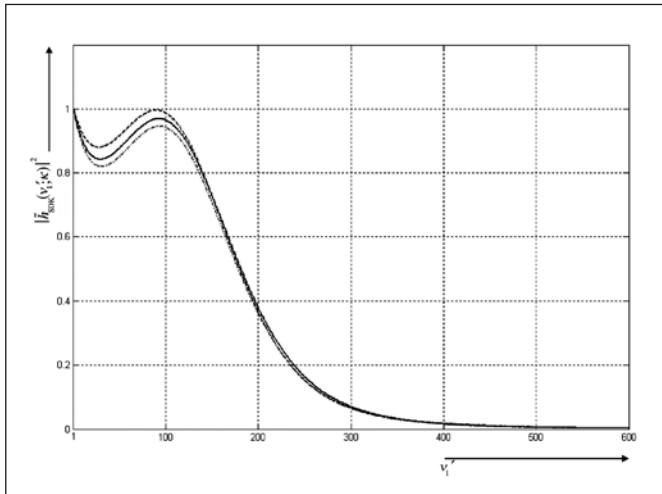


Obr. 2 Vyhlazené formy získaného sloupcového spektra  $|\tilde{h}_{SDK}(v'_1; \kappa)|^2$  testované digitální videokamery pro příčné zvětšení  $M = 0,1$ , efektivní obrazové rozlišení  $1568 \times 1152$  pixelů a kvality obrazového snímání FINE (přerušovaná křivka), NORMAL (plná křivka) a ECONOMY (čerchovaná křivka)

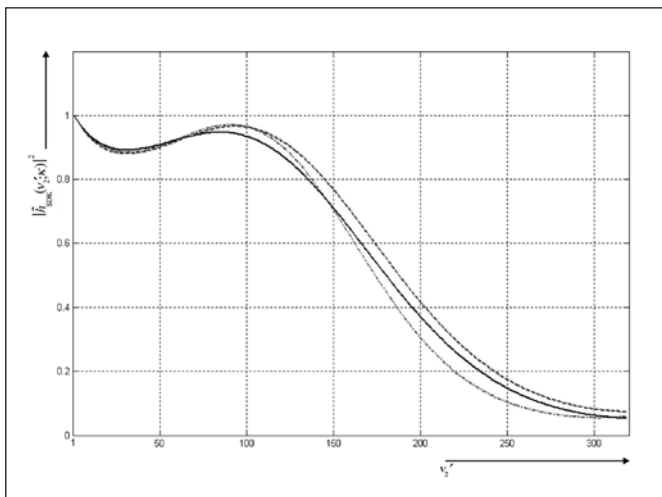


Obr. 3 Získaná vyhlazená řádková spektra  $|\tilde{h}_{SDK}(v'_2; \kappa)|^2$  testované digitální videokamery pro příčné zvětšení  $M = 0,1$ , efektivní obrazové rozlišení  $1568 \times 1152$  pixelů a kvalitu obrazového snímání FINE (přerušovaná křivka), NORMAL (plná křivka) a ECONOMY (čerchovaná křivka)

Na rozdíl od předcházejících případů vykazují dále naměřená spektra  $|\tilde{h}_{\text{SDK}}(v'_1; \kappa)|^2$  a  $|\tilde{h}_{\text{SDK}}(v'_2; \kappa)|^2$  pro studované jiné kamerové efektivní rozlišení  $640 \times 480$  pixelů přítomnost vzorkovacího šumu, neboť v těchto případech podmínka (45) pro jeho absenci, a tedy i absenci lokálně variantního zobrazení, není splněna. Nezbytně přes přiměřené hodnoty parametrů  $(\chi_1, \chi_2)$  zprůměrované a též vyhlazené lokálně invariantní (ale vzorkovacím šumem ovlivněné) formy zmíněných spekter jsou pro kvality obrazového snímání FINE, NORMAL a ECONOMY vystiženy grafy na obr. 4 a 5.



Obr. 4 Vyhlašené formy získaného sloupcového spektra  $|\tilde{h}_{\text{SDK}}(v'_1; \kappa)|^2$  testované digitální videokamery pro příčné zvětšení  $M = 0,1$ , efektivní obrazové rozlišení  $640 \times 480$  pixelů a kvality obrazového snímání FINE (přerušovaná křivka), NORMAL (plná křivka) a ECONOMY (čerkovaná křivka)



Obr. 5 Získaná vyhlazená řádková spektra  $|\tilde{h}_{\text{SDK}}(v'_2; \kappa)|^2$  testované digitální videokamery pro příčné zvětšení  $M = 0,1$ , efektivní obrazové rozlišení  $640 \times 480$  pixelů a kvality obrazového snímání FINE (přerušovaná křivka), NORMAL (plná křivka) a ECONOMY (čerkovaná křivka)

#### 4. ZÁVĚR - ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ FUNKCE PŘENOSU MODULACE DIGITÁLNÍ VIDEOKAMERY

Naměřené a v tomto článku prezentované normované hodnoty vyhlazených kvadrátů FPM testované digitální videokamery prakticky vykazují odchylky od fluktuujících (nevylazených) hodnot, které nepřekračují velikost běžně udávané spodní teoretické meze  $0,03$  lidského rozlišení jasů (kdy podíl signálu k šumu je  $\text{SNR} \leq 1/0,03 = 33,3$ ) v nejužitečnějších centrálních oblastech využitých

relativních prostorových frekvencí  $(v'_1, v'_2)$ . Zvolená vyhlazovací procedura je tedy prakticky akceptovatelná v těchto oblastech. Dostatečná opakovatelnost jednotlivých vyhlazených výsledků je zajištěna s chybou získaných hodnot menší než  $0,03$  ve srovnání s průměrnými výsledky. Jejich správnost (systematické vychýlení odhadu) a absolutní přesnost odpovídají využitému měřicímu uspořádání, kvalitě realizovaného reflexního náhodného testu, správnosti postupu měření a vyhodnocování získaných dat a zvolenému lineárnímu a lokálně invariantnímu přístupu k činnosti proměřované digitální videokamery v uvažovaném fotografickém funkčním režimu. Získaná data mají prakticky jen srovnávací význam, neboť nebyly k dispozici (a v současnosti neexistují) adekvátní normalizované kalibrační prostředky a postupy.

Dosažené výsledky jsou však v podstatě ve shodě s očekáváním, že při nastavitelně lepší kvalitě obrazového snímání mají výsledné FPM obvykle příznivější tvary a větší hodnoty v nejužitečnějších centrálních oblastech prostorových frekvencí v porovnání s též zvolitelnými horšími kvalitami obrazového snímání. Obdržené tvary kvadrátů FPM testované digitální videokamery dokazují, že jde o elektrooptickou zobrazovací soustavu s vlastnostmi dolnofrekvenčního filtru prostorových frekvencí (obdobně jako tomu je u čistě analogových optických zobrazovacích soustav).

Provedená měření též ukázala, že výsledky mohou být výrazně ovlivněny volbou pixelového rozlišení testované digitální videokamery a přítomností fotodetekčního, vzorkovacího a kvantizačního šumu. Přitom majoritní je vliv vzorkovacího šumu (chyby vzorkování), který je důsledkem zobrazovacích podmínek nespňujících požadovaný vzorkovací teorém typu (32). Jeho splnění vede přímo k požadovaným lokálně invariantním spektrům, jak tomu je u vyhlazených kvadrátů FPM na obr. 1 až 3 tohoto článku, získaných při efektivním obrazovém rozlišení  $1568 \times 1152$  pixelů. Přítom sloupcové prakticky se nepřekrývající formy těchto spektrálních funkcí na obr. 2 vykazují větší hodnoty, širší (lepší) reprezentativní frekvenční pásma a menší rozdíly pro tři zvolené kvality obrazového snímání FINE, NORMAL a ECONOMY v porovnání s jejich řádkovými formami podle obr. 3.

Komplikovanější interpretace přísluší naměřeným a vyhlazeným výsledným kvadrátům FPM testované digitální videokamery podle obr. 4 a 5, které odpovídají nastavenému menšímu efektivnímu obrazovému rozlišení  $640 \times 480$  pixelů při zmíněných kvalitách obrazového snímání FINE, NORMAL a ECONOMY. Vzhledem k tomu, že toto rozlišení nespňuje vzorkovací teorém (32), jsou naměřené výsledky ovlivněny vzorkovacím šumem. Korekce jemu příslušné nežádoucí lokální variance výsledků do jejich požadovaných lokálně invariantních forem bylo dosaženo průměrováním každé adekvátní množiny dílčích výsledků přes přiměřené hodnoty parametrů příčných posuvů náhodného testu vzhledem ke kamerové vzorkovací soustavě. Takto získané zprůměrované a navíc vyhlazené a vzorkovacím šumem ovlivněné sloupcové a řádkové lokálně invariantní kvadráty FPM vykazují vedle nevýrazného (prakticky zanedbatelného) překrytí v okrajových frekvenčních oblastech ještě navíc zvlnění v počátečním frekvenčním pásmu. Tento jev, který se projevuje i při opakovaných měřeních, je pravděpodobně konstrukční vlastností testované digitální videokamery při daných zobrazovacích podmínkách a je též ovlivněn použitou vyhlazovací funkcí typu (29), která byla k danému účelu zvolena hlavně pro akceptovatelné spojitě vystižení centrálních částí měřených FPM. Aplikace rozdílných vyhlazovacích funkcí pro odlišná frekvenční pásma se při užití zvoleného výpočetního prostředí MATLAB 6.5 ukázaly časově náročné s ne zcela uspokojivými výsledky.

Nakonec je třeba konstatovat, že užití průměrování dílčích výsledků do lokálně invariantních a vzorkovacím šumem ovlivněných forem při nastaveném horším efektivním obrazovém rozlišení  $640 \times 480$  pixelů prakticky vedlo k větším hodnotám a k širším reprezentativním frekvenčním pásmům zjištěných kvadrátů FPM, než tomu bylo u předcházejících vzorkovacím šumem neovlivněných výsledků při lepším efektivním obrazovém rozlišení  $1568 \times 1152$  pixelů. Jde zřejmě o výsledky rozdílných druhů s jiným obsahem



určujících parametrů, včetně vlivu vzorkovacího šumu. Společně u obou druhů však je, že rozdíly centrálních sloupcových dat podle obr. 2 a 4 pro zvolené tři kvality obrazového snímání jsou většinou menší než u řádkových dat podle obr. 3 a 5. Lze též reálně očekávat, že výsledky pro jiné zobrazovací a vyhodnocovací podmínky budou vykazovat větší nebo menší odlišnosti od zde prezentovaných výsledků.

*Tento článek se vztahuje k Výzk. záměru FZÚ AV ČR č. AVOZ 10100522.*

#### Literatura

- [1] POSPÍŠIL J., JAKUBÍK P.: Teorie a popis realizovaného zařízení k měření funkce přenosu modulace digitální videokamery pomocí spektrální hustoty výkonu reflexního náhodného testu a jeho obrazu. *Jemná mech. a optika*, **52**, 2007, č. 1, 7 - 12.
- [2] POSPÍŠIL J., JAKUBÍK P., MACHALA L.: Light-reflection random-target method for measurement of the modulation transfer function of a digital video-camera. *Optik*, **116**, 2005, 573-585.
- [3] KUBOTA H., OHZU H.: Method of measurement of response function by means of random chart. *J. Opt. Soc. Am.*, **47**, 1957, 666-667.
- [4] POSPÍŠIL J.: The experimental determination of modulation transfer functions by means of the power spectrum of a random chart and its image. *Optik*, **29**, 1969, 379-385.
- [5] WILLIAMS T. L.: Specifying and measuring the image quality of fibre plates by means of their MTF. *Proc. Electro-Optics*, 71 Int. Conf., Brighton, England, 1971, 402-413.
- [6] WILLIAMS T. L.: *The Optical Transfer Function of Imaging Systems*. Institute of Physics Publishing, London, 1999.
- [7] BOREMAN G., DERENIAK E. L.: Method for measuring the modulation transfer function of charged coupled devices using laser speckle. *Optical Eng.*, **25**, 1986, 148-150.
- [8] DANIELS A., BOREMAN G. D., DUCHARME A. D., SAPIR E.: Random transparency targets for the modulation transfer function measurement in the visible and infrared regions. *Optical Eng.*, **34**, 1995, No. 3, 860-868.
- [9] USER'S GUIDE, VERSION 3: Image Tool Box for Use with MATLAB. The MathWorks Inc., Apple Hill Drive Natick, MA, 1993-2001.
- [10] JAKUBÍK P.: Přenosové vlastnosti signálů v digitálních elektrooptických zobrazovacích soustavách. Dizertační práce. PřF UP, Olomouc, 2006.
- [11] USER'S GUIDE: Digital Video Camera Panasonic, Model NV-MX300EG. Panasonic Comp. Inc., Praha, 2002.

Prof. RNDr. Ing. Jaroslav Pospíšil, DrSc. a Mgr. Petr Jakubík, Ph.D., katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého a Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50a, 772 09 Olomouc; tel.: 585 634 283, e-mail: pospis@prfnw.upol.cz; RNDr. František Pluháček, Ph.D., katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého, Tř. 17. listopadu 50, 772 00 Olomouc; tel.: 585 634 310, e-mail: pluhacek@prfnw.upol.cz

Sergej HLOCH, Katedra prevádzky technologických systémov, Fakulta výrobných technológií, TU v Košiciach  
Jan VALÍČEK, Institut fyziky, Hornicko geologická fakulta, VŠB Technická Univerzita Ostrava

## Štatistické hodnotenie kvality povrchu hliníka pri delení abrazívnym vodným prúdom

*V príspevku sa pojednáva o štatistickom hodnotení povrchu hliníka vytvoreného abrazívnym vodným prúdom. Bol vyhodnotený vplyv faktorov na kvalitu povrchu v hĺbke 1, 6 a 11 mm. Zo štatistického hodnotenia kvality povrchu pomocou faktorovej analýzy vyplývalo, že nestačí iba charakteristika parametra profilu drsnosti Ra.*

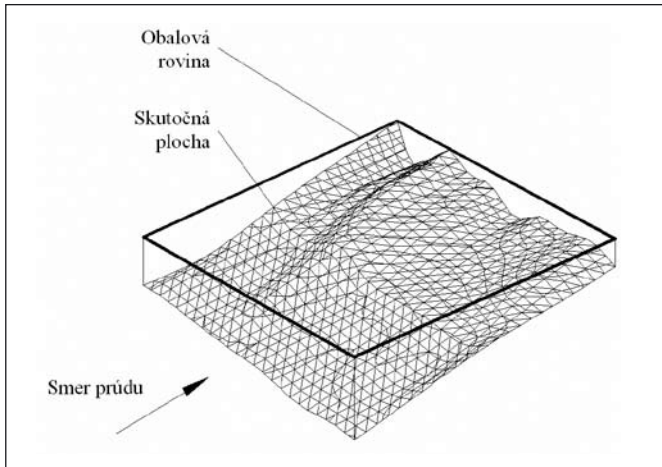
### 1 ÚVOD

Hodnotenie kvality povrchu vytvorených pomocou abrazívneho vodného prúdu (AWJ) ostáva stále aktuálnou a teoreticky náročnou problematikou, ktorá v súčasnosti nie je uspokojivo rozpracovaná, keďže súčasné analytické riešenia technologického procesu AWJ sú postavené na intuitívnej platforme obsluhy zariadenia a analytických spôsoboch identifikácie, ktoré sa javia v tomto prípade ako neefektívne a nepraktické [1, 2, 3]. Technologický proces prebiehajúci pri delení materiálov AWJ v reálnych objektoch je veľmi dynamický a stochastický proces. Preto aplikáciou analytických spôsobov identifikácie procesu delenia nie je možné získať úplný model procesu, pričom sa zanedbáva vplyv určitých veličín, nie sú známe presné hodnoty niektorých faktorov, ktoré sa navyše časom menia a uplatňuje sa v mnohých prípadoch intuícia, ktorú je možné nadobudnúť len pri mnohonásobnom vykonávaní danej

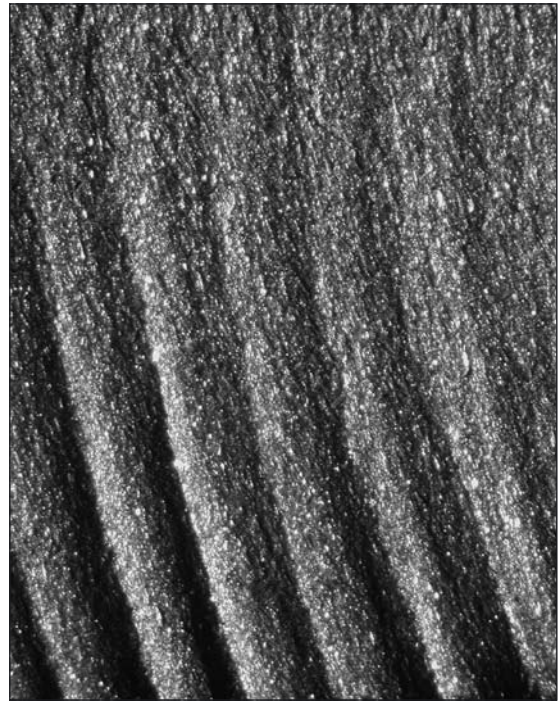
činnosti, čo je z časového a finančného hľadiska neefektívne [4, 5, 6, 7]. Matematicko - štatistické metódy naopak umožňujú rýchle zostavenie štatistických modelov aj z veľkého počtu vstupných údajov [2]. Z praktických skúseností je vidieť, že technologický proces delenia AWJ je zložitý, do ktorého vstupujú faktory pôsobiace vo svojej vzájomnej interakcii pri rôznych úrovniach na kvalitatívne charakteristiky vytvoreného povrchu. Vyhodnotenie týchto faktorov a ich vlastností je proces, skladajúci sa z navzájom nadväzujúcich krokov. V každom z nich pôsobí množstvo faktorov, ktoré majú vplyv na výsledok a pri klasickom spôsobe vyhodnotenia spôsobujú neistoty v konečných záveroch. Tieto modely reálnych situácií naplnené konkrétnymi číslami a ich kauzalitu umožňujú analyzovať a vyhodnotiť plánované experimenty (Design of Experiments – DoE).

## 2 RELIÉF OBROBENEJ PLOCHY VYTVORENÝ ABRAZÍVNÝM VODNÝM PRÚDOM

Pri delení AWJ vznikajú nepresnosti, ktoré sú definované odchýlkami rozmerov, tvarov a vzájomnej polohy ako aj drsnosťou povrchu. Geometrické odchýlky plochy ohraničujúcej súčiastku od okolitého prostredia od ideálnej plochy je možné stanoviť podľa *obr. 1*.



Obr. 1 Vymodelovaný príklad odchýlky skutočného povrchu od ideálneho vytvoreného AWJ



Obr. 2 Reliéf obrobenej plochy AWJ

Obrobená plocha (*obr. 2*) sa vytvára ako obalová plocha trajektórie pracovného pohybu AWJ. Ide o špecifický spôsob obrábania charakteristický tým, že sa používa mnohoklinový nástroj, ktorého rezné klíny sú tvorené brúsnymi zrnami (abrazívom), ktoré sú v kvapaline náhodne orientované.

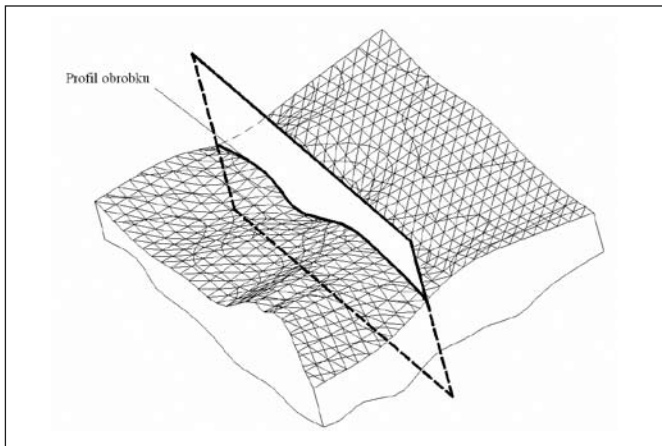
Táto náhodnosť polohy ako i odlišnosť tvaru zrn abraziva má za následok nepravidelný úber materiálu. V procese delenia AWJ je obrobok nositeľom kvalitatívnych charakteristík, pričom geometria obrobenej súčiastky sa líši od ideálnej geometrie. Analýzou profilov jednotlivých vzoriek, ktorých povrchy sú vytvorené za

rôznych rezných podmienok je možno kvalitatívne vyjadriť štatistickými charakteristikami; drsnosťou  $R_a$  a výškou nerovnosti profilu  $R_z$ . Tvar mikrogeometrických nerovností obrobených povrchov sa vyznačuje veľkou rozmanitosťou. Podľa normy ISO 4287 Geometrická špecifikácia povrchu, drsnosť definuje ako časť geometrických odchýlok s relatívne malou vzdialenosťou nerovností (*obr. 3*).

Pri delení AWJ vzniká povrch, ktorý sa podľa tej istej normy, nazýva skutočný povrch, ktorý ohraničuje súčiastku oddeľujúcu ju od okolitého prostredia.

Tabuľka 1 Zakódovanie faktorov do úrovni

Poradie pokusov	Kódované podmienky pokusov				Aktuálne podmienky pokusov			
	$x_1$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	Abrazívo	$m_a$ [g.min <sup>-1</sup> ]	$v$ [mm.min <sup>-1</sup> ]	$x$ [mm]
1	1	1	1	-1	Granát	300	100	2
2	1	1	1	1	Granát	300	100	4
3	1	1	-1	1	Granát	300	50	4
4	1	1	-1	-1	Granát	300	50	2
5	1	-1	1	1	Granát	500	100	4
6	1	-1	1	-1	Granát	500	100	2
7	1	-1	-1	-1	Granát	500	50	2
8	1	-1	-1	1	Granát	500	50	4
9	-1	1	1	-1	Olivín	200	100	2
10	-1	1	1	1	Olivín	200	100	4
11	-1	1	-1	1	Olivín	200	50	4
12	-1	1	-1	-1	Olivín	200	50	2
13	-1	-1	1	-1	Olivín	400	100	2
14	-1	-1	1	1	Olivín	400	100	4
15	-1	-1	-1	1	Olivín	400	50	4
16	-1	-1	-1	-1	Olivín	400	50	2

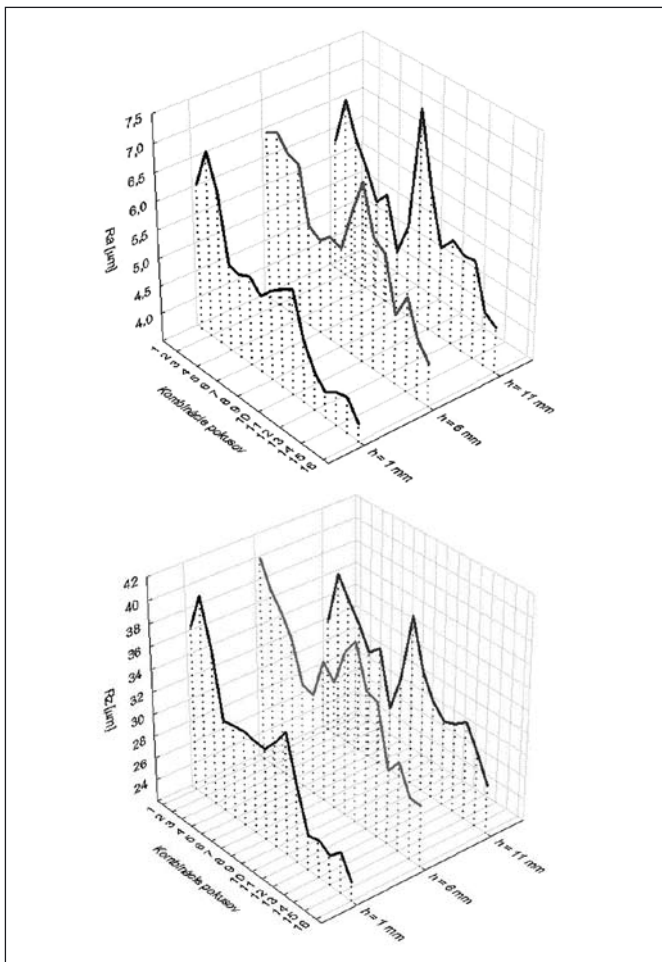


Obr. 3 Vymodelovaný príklad skutočného a menovitého povrchu vytvoreného AWJ

### 3 ŠTATISTICKÉ HODNOTENIE FAKTOROV

Pri štatistickom hodnotení faktorov sa použil dvojúrovňový plánovaný štvorfaktorový experiment. Pomocou 16 tich pokusov s tromi opakovaniami sa hodnotil vplyv faktorov ako tvaru abraziva, hmotnostného toku abraziva, rýchlosti posuvu a vzdialenosť ústia zaostrovacej trubice od povrchu deleného materiálu, na parametre  $Ra$  a  $Rz$ . Tabuľka 1 uvádza podrobnejšiu špecifikáciu faktorov aj s priradenými úrovňami podľa, ktorej sa zrealizoval plánovaný experiment.

K štúdiu vplyvu hodnotených faktorov na  $Ra$  a  $Rz$  bol použitý dvojpolohovací stôl od firmy Wating, určený pre rovinné aplikácie



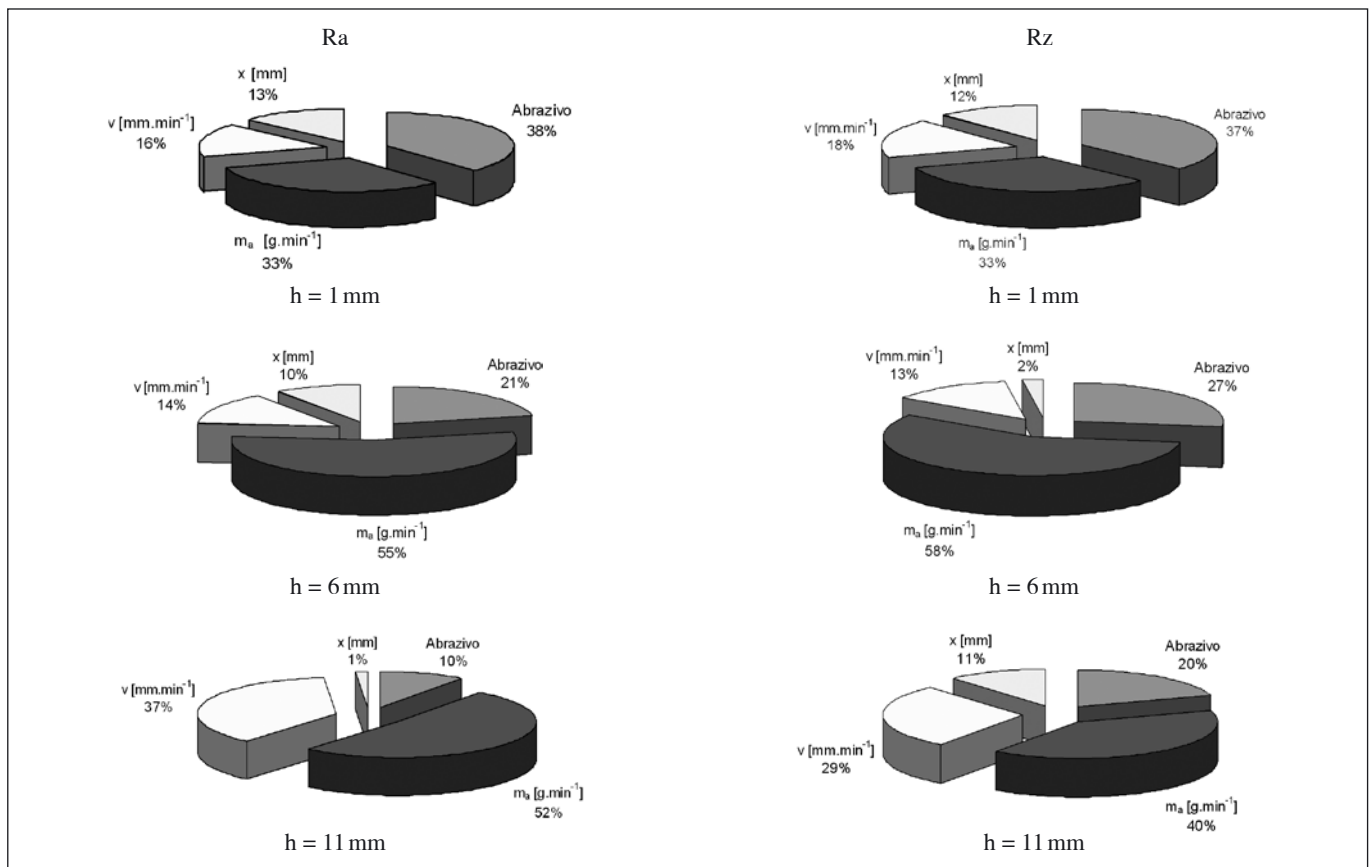
Obr. 4 Experimentálna závislosť a)  $Ra$  a b)  $Rz$  od zmeny kombinácií faktorov a od hĺbky

delenia technológiou AWJ. Tlak vody bol vytváraný čerpadlom Stream Line SL II od firmy Ingersoll Rand. Ako technologická hlavica bola použitá hlavica firmy Ingersoll Rand AUTOLINE™. Všetky vzorky boli vyrobené s konštantným nastavením nasledujúcich faktorov: tlak čerpadla  $p = 350$  MPa, MESH 80. Vzorky boli vyrobené z drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  boli vykonané na mobilnom prístroji SURFTEST – 301 v hĺbke 1 mm, 6 mm a 11 mm. Pre zjednodušené hodnotenie súboru nameraných hodnôt boli zostrojené experimentálne závislosti charakterizujúce priebeh drsnosti pri jednotlivých kombináciách faktorov v troch hĺbkach  $h = 1$  mm,  $h = 6$  mm,  $h = 11$  mm. Z experimentálnych závislostí obr. 4 vidno, že stredná hodnota odchýlok profilu v rozsahu základnej dĺžky  $l$ ,  $Ra$  a  $Rz$  vykazuje slabú závislosť od zmeny kombinácií sledovaných faktorov v hĺbke  $h_1$ . S nárastom hĺbky  $h_6$  a  $h_{11}$  prudko stúpa charakteristika  $Ra$  a  $Rz$ , ktorá je spôsobená hlavne faktorom – hmotnostný tok abraziva.

### 4 PREDBEŽNÁ ANALÝZA NAMERANÝCH DÁT A REGRESNÁ DIAGNOSTIKA

Normalita rozloženia súboru opakovaných meraní parametrov profilu  $Ra$  a  $Rz$  bola testovaná pomocou parametrického Shapiro – Wilksomho testovacieho kritéria s použitím výpočtového systému STATISTICA, kde výsledkom bola hodnota  $W$  a hodnota  $p$ , čo je dosiahnutá hladina pravdepodobnosti, teda pravdepodobnosť, že výberová hodnota odhadu testovaného parametra bude aspoň taká veľká ako pozorovaná hodnota. Z uvedenej analýzy vyplynulo, že všetky opakované merania majú normálne Gaussovo rozdelenie, čo umožnilo využitie parametrického Grubsovho testu odľahlosti meraní a ich homoskedasticity. Pre vyhodnotenie skúmaných závislostí boli zvolené lineárne a linearizované 3D závislosti. Výpočet regresných koeficientov bol realizovaný v programe Excel, Matlab a Statistika. Pre jednotlivé typy regresných závislostí boli vypracované výpočtové programy, založené na metóde najmenších štvorcov a maticových operáciách. Pre posúdenie štatistickej významnosti regresných koeficientov bol použitý Studentov  $t$  – test. Po vykonaní hypotézy o významnosti jednotlivých regresných koeficientov a vylúčením nesignifikovaných faktorov z regresnej analýzy boli získané rovnice, ktoré charakterizujú strednú aritmetickú odchýlku profilu  $Ra$  a najvyššiu výšku profilu  $Rz$  v príslušných meraných hĺbkach  $h = 1, 6, 11$  mm. Percentuálnu významnosť vplyvu jednotlivých faktorov na parametre profilu  $Ra$  a  $Rz$  v experimentálne skúmaných hĺbkach charakterizuje obr. 5. Z obrázku vidno, že delenie AWJ je zložitý proces a vplyv faktorov vo vertikálnom smere nadol s obrobenou plochou nie je rovnaký.

Z hodnôt charakterizujúcich významnosť jednotlivých procesných faktorov AWJ a ich interakcií vidno, že v posudzovanej hĺbke  $h_1$  majú najväčší percentuálny vplyv na parameter profilu drsnosti  $Ra$ ; tvar abraziva 38 % a hmotnostný tok abraziva 33 %. Významnosť rýchlosti posuvu podľa štatistického hodnotenia má hodnotu 16 % a zdvíhu 14 %. Samotná významnosť faktora tvaru abraziva, v ktorom sa bral do úvahy vplyv olivínu a granátu, nasvedčuje tomu, že v priestore prvého kontaktu tzv. iniciačnej zóny je výrazný vplyv tvaru abrazívnych častíc, ktoré sú situované najmä v okrajovej časti prúdu. V hĺbke  $h = 6$  mm sa významnosť faktorov zmenila, kedy dominantný vplyv na parameter profilu drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  má hmotnostný tok abraziva, ktorého významnosť v percentuálnom vyjadrení je rovná 55 %. Druhým v poradí významným faktorom je tvar abraziva, ktorého významnosť oproti posudzovanej hĺbky  $h = 1$  mm poklesla o 17 %. Významnosť rýchlosti posuvu a zdvíhu sa v hĺbke 6 mm výrazne nezmenila. V hĺbke 11 mm bol zistený u faktora – rýchlosti posuvu veľký nárast významnosti o 23 %. Vplyv faktora - zdvíhu v tejto hĺbke je 1 % a možno vysloviť záver, že vplyv zdvíhu, v rozsahu hodnoteného intervalu 2 – 4 mm, so zvyšujúcou sa hrúbkou materiálu klesá. Ak porovnáme vplyv na parametre profilu drsnosti  $Ra$  a  $Rz$  v posudzovanej hĺbke 11 mm, vidieť výrazné rozdiely vplyvu hodnotených faktorov na  $Ra$  a  $Rz$ . Z uvedeného možno usudzovať, že parameter profilu drsnosti  $Ra$  neposkytuje presné informácie o kvalite povrchu so zvyšujúcou



Obr. 5 Vplyv faktorov na parametre  $Ra$  a  $Rz$  v posudzovaných hĺbkach pre materiál hliník pri šírke  $b = 12$  mm

sa hrúbkou deleného materiálu aj potrebné priradiť k tomuto parametru aj iné parametre ako je napríklad práve  $Rz$ ,  $Ra$ . Ako je už známe aj zo štatistiky priemer ako taký je citlivý na extrémne hodnoty a preto nemôže spoľahlivo vypovedať o kvalite povrchu vytvoreného vodným abrazívnym prúdom.

## ZÁVER

Cieľom článku bolo poukázať na to, že okrem zložitosti a prítomnosti množstva stochastických vplyvov v technológii delenia AWJ pre samotné hodnotenie povrchov vytvorených touto technológiou nestačí iba charakteristika parametra profilu drsnosti  $Ra$ , teda iba len výšková charakteristika, pretože môžu existovať dva isté povrchy, ktoré môžu mať rovnaké  $Ra$ , ale z hľadiska ich funkčnosti sú rozdielne [9]. Pretože okrem výškových parametrov, ktoré sú normované, musíme uvažovať aj s parametrami pozdĺžnymi (rozstup) – frekvenčnými a aj uhlami sklonov. Preto podľa názoru autorov by bolo vhodné uvažovať o doplnení stávajúcich normovaných parametrov pre hodnotenie povrchov, najmä o parametre pozdĺžnych deformácií (rozstup výškových nerovností) a priestorové frekvenčné charakteristiky a súčasne taktiež vypracovať normované postupy merania týchto parametrov. Okrem výškovej charakteristiky  $Ra$  boli navrhnuté [10] geometrické parametre pre hodnotenie vytvorených plôch, a to  $Y_{ret}$  a uhol deviácie  $D$ .

## Podakovanie

Článok vznikol za podpory projektu VEGA 1/4157/07 „Nelineárne matematické modelovanie a vibrodiagnostika progresívnych

technologických procesov pri delení ťažkoobrábateľných materiálov pomocou DoE a Taguchiho dizajnu“.

## Literatúra

- [1] Cox, D. R. The theory of the design of experiments. Chapman & Hall/CRC 2000, ISBN 1-58488-195-X.
- [2] Gombár, M. Tvorba štatistického modelu drsnosti obrobeného povrchu s využitím Matlab. In: *Výrobné inžinierstvo*. (s. 14-17) 2006.
- [3] Monka, P. Teoretické vzťahy najvyššej nerovnosti profilu. *Výrobné inžinierstvo*, 2-3/2003, II. ročník, str. 20-21, ISSN 1335-7972-01.
- [4] Lupták, M. Study of the measuring and scanning methods in the processes of the cutting and machining with waterjet. In: *Proc. Metallurgia Junior 05*, Deň doktorandov HF Košice, 2005.
- [5] Mason, R. L., Gunst, R. F., Hess, J. L. *Statistical design and analysis of experiments*. Second edition. Wiley-Interscience. A John Wiley & Sons Publication, New Jersey (2003) ISBN 0-471-37216-1.
- [6] Montgomery, D. C. *Design and analysis of experiments*. 5th edition, Hamilton Printing Company, 2001. ISBN 0-471-31649-0.
- [7] Toutenburg H. *Statistical analysis of designed experiments*. Springer-Verlag New York, Inc. 2002, ISBN 0-387-98789-4.
- [8] Fabian, S. Kvantifikácia vplyvu procesných parametrov na tepelne ovplyvnenú oblasť pri rezaní laserom. In: *Acta Metallurgica Slovaca* roč. 11, mimoriadne č. 1 (2005), s. 78-83. ISSN 1335-1532.
- [9] Bumbálek, B., Odvody, V., Ošťádal, B. *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL 1989.
- [10] Valíček, J., Hloch, S. Povrch generovaný prúdom abrazívneho vodného paprsku. In: *Strojárstvo*. ISSN 1335-2938: X., 2006. 10 - 11.

Ing. Sergej Hloch, PhD., Katedra prevádzky technologických systémov, Fakulta výrobných technológií, TU v Košiciach so sídlom v Prešove, Štúrova 31, 080 01 Prešov, Slovenská republika, tel.: 051/7723504, Fax: 051/7733453, e-mail: hloch.sergej@fvt.sk  
 Ing. Jan Valíček, Ph.D., Institut fyziky, Hornicko geologická fakulta, VŠB Technická Univerzita Ostrava, Tř. 17. listopadu 15/2171, 708 33 Ostrava – Poruba, tel.: +420-59-7323 128, Fax: +420-59-6918 589, e-mail: valicek.jan@vsb.cz

# Jurij Nikolajevič Děnisjuk, druhý ze dvou zakladatelů moderní holografie, zemřel

Objevitel principu reflexní holografie prof. Jurij Nikolajevič Děnisjuk zemřel tiše v neděli 14. května 2006 v Petrohradě ve věku necelých 79 let. Je to druhá osobnost v moderní holografii, která nás opustila v rozmezí jednoho roku. Prvním byl objevitel mimoosového holografického záznamu prof. E.N. Leith, který zemřel náhle 23. prosince 2005 ve věku 78 let (viz nekrolog v tomto časopise JMO 51/1(2006) 24). Dva roky před tím jsme zaznamenali odchod objevitele principu duhového hologramu prof. S.A. Bentona, který se ovšem dožil téměř o dvacet let kratšího věku (viz nekrolog v tomto časopise JMO 49/5 (2004) 157).

Jurij Nikolajevič se narodil 27. července 1927 v Soči. Studoval po druhé světové válce Leningradský institut jemné mechaniky a optiky (LITMO – Leningradskij institut točnoj mechaniki i optiki – dnes: Státní univerzita informačních technologií, jemné mechaniky a optiky) v tehdejší Leningradě a v r. 1954 dokončil školu absolováním fyzikálního inženýrství. Předtím ale musel přežít německou blokádu, během níž se jednou nacházel v tak bídném zdravotním stavu, že ani jeho matka nedoufala v jeho přežití a odepřela mu i tu špatnou stravu, kterou někde stěží získala. On se však zázračně uzdravil a dožil se věku delšího, než je průměrný věk dožití mužů v Rusku nyní.

Stejně jako Leith i Děnisjuk zůstal téměř celý život na jednom místě, v jednom městě. Zatímco však u občanů Spojených států amerických je to značně neobvyklé, u příslušníků tehdejšího Sovětského svazu to zase tak mimořádné není. Jurij Nikolajevič pracoval ve významném a velmi ceněném Státním optickém ústavu S.I. Vavilova (GOI - Gosudarstvennyj optičeskij institut imeni S.I. Vavilova), kde nastoupil aspiranturu v r. 1958. Jeho raná výzkumná práce byla ovlivněna povídkou Hvězdné koráby od známého autora science fiction publikací I.A. Jefremova. V ní dva vědci našli na cizí planetě vyleštěný kovový kotouč, který ukazoval trojrozměrný obraz hlavy humanoida starý sedmdesát milionů let. Děnisjuka to inspirovalo k využití známého Lipmannova stojatého vlnění, jedné z možností barevné fotografie, pro záznam trojrozměrné informace. Své pokusy se záznamem stojatého vlnění do fotografické vrstvy s vysokým rozlišením zahájil v r. 1958 a v r. 1962 publikoval první výsledky týkající se záznamu odrazu vypuklého zrcadla v prestižních Dokladech AN SSSR [1]. Tato práce byla silně pohaněna jedním mladým pracovníkem Ústavu fyzikální problematiky AN SSSR (Institút fizičeskich problem - ředitel P. Kapica). Poněkud později byl ale tento pracovník přinucen svým ředitelem napsat velmi kladné posouzení pro udělení Leninovy ceny Děnisjukovi a jeho jmenování členem korespondentem AV SSSR (Oddělení obecné fyziky a astronomie) v r. 1970 (24. 11. 1970). To vše se ovšem již dělo pod tlakem rozvíjející se holografie v ostatním světě, kdy zejména ve Spojených státech P.J. Van Heerden analyzoval záznam optické informace do pevných látek, což byla vlastně obdoba záznamu Děnisjukova [2].

Další uznání přišlo ze strany bývalého Československa. Při příležitosti 5. mezinárodního kongresu Interkamera 73 (Praha 3. - 5. 4. 1973) byla J.N. Děnisjukovi touto institucí udělena Cena Interkamery 1971. Teprve když v r. 1983 založila Mezinárodní společnost optického inženýrství (SPIE – The International Society for Optical Engineering) cenu Dennise Gabora obdržel ji společně s E.N. Leithem jako první v začínající řadě. Od britské Královské



J. N. Děnisjuk drží svůj holografický portrét

fotografické společnosti (RPS - The Royal Photographic Society) obdržel Děnisjuk v r. 1992 Hoodovu medaili (Hood-Medal). V též roce (11. 6. 1992) byl jmenován řádným akademikem Ruské akademie věd (Rossijskaja akademija nauk). Zdá se, že tento omezený výčet poct J. Děnisjukovi není zdaleka vyčerpávající, ale tento skromný vědec si na vyznamenáních příliš nezakládá a je proto obtížné se dalších dopátrat.

Při začátkách přípravy ICO (International Commission for Optics) Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics 2006 plánovaného na září 2006 v Petrohradě, zemřel E. Leith a přípravný výbor se rozhodl věnovat část konference jeho památce. Potom však ve vrcholících přípravách zemřel i J. Děnisjuk a i jeho památka byla zahrnuta do vzpomínek. Autor tohoto nekrologu byl vyzván jedním ze spoluorganizátorů této sekce Dr. Peterem Chebenem, aby se zúčastnil a přednesl krátkou vzpomínku na setkání s J. Děnisjukem. Převážná část této vzpomínky je přiložena v českém znění k tomuto nekrologu.

## Literatura

- [1] J. N. Děnisjuk: O odrazu optických vlastností předmětu ve vlnovém poli jím rozptýleného záření. Doklady Akad. Nauk SSSR 144/6 (1962) 1275-8 (v ruštině).
- [2] P. J. Van Heerden: Nová optická metoda záznamu a vybavování informace. Applied Optics 2/4 (1963) 387-92 (v angličtině).
- [3] S. F. Johnston: Holographic Visions: A History of New Science. Oxford: Oxford University Press, 2006 (544 stran, 77 fotografií, 15 perokreseb). Stať Pozoruhodné souvislosti a počátky holografie (v angličtině).
- [4] S. A. Benton: Holografie znovuvynalezená. SPIE Proceedings (Chair/Editor H. John Caulfield) Holography: A Tribute to Yuri Denisyuk and Emmett Leith (Orlando 3. - 4. 4. 2002) 4737 (2002) 23-6 (v angličtině).

*Na základě vlastních vzpomínek, použitím nekrologu SPIE (V. Markov a H. J. Caulfield) a využitím historické práce S. F. Johnstona [3] a sborníku [4] zpracoval Miroslav Miler.*

Kontakt: doc. RNDr. Miroslav Miler, DrSc., Ústav fotoniky a elektroniky AV, v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8, tel.: 266 773 430, e-mail: miler@ufe.cz

# Na paměť Emmetta Leithe a Jurije Děnísjuka

Překlad zkráceného znění příspěvku na plenární sekci II: „Na paměť Emmetta Leithe a Jurije Děnísjuka: Objasnění světa holografie“ (In Memory of Emmett Leith and Yuri Denisjuk: Enlightening the World of Holography) na ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics 2006 (Petrohrad 4. – 7. září 2006)

V druhé polovině šedesátých let, kdy v Československu probíhala mírná postupná politická liberalizace, která potom vyvrcholila Pražským jarem 1968 a vstupem vojsk Varšavské smlouvy do Československa téhož roku, se vytvářely různé organizace prohlubující ekonomické vztahy se zahraničím. Před r. 1967 vznikla při Ústředí vědeckých, technických a ekonomických informací (UVTEI) také výstavní a kongresová agentura Interkamera. Jejím účelem bylo pořádat pravidelné výstavy fotografické a filmové techniky spolu s doprovodnými akcemi, v nichž zejména vynikala sympozia o nejnovějších trendech a výsledcích ve vědě a technice v oblasti audiovizuální techniky a tvorby. Tak byly uspořádány výstavy Interkamera 67, 69 a 71 navzdory tehdejšímu politickým přeměnám.

V té době se ukázalo, že holografie bude možná potenciální špičkovou vizuální technikou a Interkamera se chopila příležitosti. Již při kongresu Interkamera 71 bylo několik přednášek o holografii. V rámci kongresu Interkamera 73 byla zařazena jako první sekce o holografii a bylo pozváno několik pracovníků moskevského institutu NIKFI (Naučno-issledovatel'skij kino-foto institut), aby referovali o možnostech holografie v kinematografii (Komar, Sobolev, Mandrosov, Cyrulnikov, Ivanov), ale především pozvala Jurije Děnísjuka, tehdy již doktora věd a člena korespondenta Akademie věd SSSR, aby přednesl přednášku o holografii. Jeho vystoupení na téma Holografie a její využití v obrazové technice [1] bylo zařazeno hned na úvod kongresu a vzbudilo zaslouženou pozornost. Interkamera mu pak udělila svou pamětní medaili za zásadní přínos v oboru holografie. Tutéž pamětní medaili současně obdrželi E. Land (USA) za celoživotní práci v oboru fotochemie a užité fotografie a A. Wilkening (NDR) za úsilí o mezinárodní spolupráci v UNIATEC (International Union of Technical Cinematograph Associations).

Pracovníci Interkamery mě požádali, abych se J. Děnísjukovi věnoval přes víkend. Povožil jsem ho autem v okolí Prahy a navštívil s ním dva známé raně středověké královské hrady Karlštejn a Křivoklát. Přitom jsem se s ním sblížil i osobně. Vzpomínám si, že jsem mu nějak naznačil, že v nastalém procesu tzv. politické normalizace nemám na různých ustlání a stávám se postupně občanem druhé kategorie. Velmi se zajímal, jak mi může pomoci a nabídl, že mi napíše předmluvu ke knížce o holografii [2], kterou jsem měl již tehdy v tisku. To také hned udělal a na druhý den mi předmluvu přinesl. Později se také zasadil o to, aby knížka byla přeložena do ruštiny a vydána v SSSR. Knížka také vyšla i v němčině ve Spolkové republice Německo.

Na cestě po okolí Prahy jsem také poznal dobrotu povahy Jurije Nikolajeviče. Když viděl na mém autě zavazadlovou zahrádku a v autě gumové popruhy, nabádal mě k velké opatrnosti při jejich používání. Jemu se stal v této souvislosti nějaký úraz.

Když byl Jurij Nikolajevič pozván na oběd s tehdejšími předse- dou Akademie věd akademikem Bohumilem Kvasilem, přimluvil se, abych se jej také zúčastnil a nešetřil na mou adresu chválou. U mých nejbližších nadřízených ovšem toto privilegium zúčastnit se oběda s předsedou Akademie věd bylo potom přijato s nevolí a moje postavení se spíše zhoršilo.

Jurij Nikolajevič také souhlasil s tím, že mi během pobytu v Praze odpoví na otázky pro rozhovor do Československého časopisu pro fyziku [3]. Mne zajímala především otázka, do jaké míry byla jeho průkopnická metoda ovlivněna pracemi D. Gabora. Jurij Nikolajevič mě ujistil, že nijak, že svou hypotézu o záznamu vlnoplochy do lipmannovské struktury objevil zcela nezávisle na jakýchkoliv předchozích pracích D. Gabora a teprve až po vybudování teorie a experimentálním ověření se s jeho pracemi seznámil.

Jurij Nikolajevič mě hodně vyprávěl o dlouhém a těžkém období blokády Leningradu Němci během druhé světové války, které prožil jako školák. Tehdejšímu utrpením svým a svých nejbližších byl velmi poznamenán.

Domnívám se, že návštěva Československa v r. 1963 byla jedna z jeho prvních cest do zahraničí, ne-li cestou vůbec první.

Povzbuzena úspěchem zařazení holografické sekce do kongresu Interkamera 73 uspořádala tato agentura hned příští rok v říjnu 1974 samostatně I. mezinárodní symposium o holografii. Dvě třetiny z přítomných přes 160 účastníků však byli tuzemští odborníci, většina ostatních byla z okolních států středovýchodní Evropy, byli účastní i 4 pracovníci ze Spolkové republiky Německo a z Akademie věd SSSR se zúčastnila delegace 7 pracovníků vedená opět J. Děnísjukem. Ten měl přednášku na téma O zobrazovacích vlastnostech intenzitních běžících vln při záznamu dynamických objemových hologramů [4]. Jeho přítomnost byla opět velmi cenná, já jsem se ale již do jeho okolí moc nedostal.

Také další symposium o aplikované holografii bylo uspořádáno Interkamerou v prosinci roku 1976. Byla sice opět přítomna delegace z SSSR vedená J. Děnísjukem, ale jinak to byla spíše domácí akce. Z ostatních zahraničních účastníků stojí za zmínku přítomnost Pal Gregusse z Budapešti. J. Děnísjuk měl opět úvodní referát na téma O některých vlastnostech aspektogramu vzhledem k zadání syntézy kompozitních hologramů [5]. Tím ovšem aktivita Interkamery v oblasti speciálních symposií o holografii skončila, ačkoliv původně bylo plánováno další symposium v roce 1978. Některé přednášky na holografická témata se ovšem dále objevovaly v dalších mezinárodních kongresech Interkamery.

Na Jurije Nikolajeviče mám nezapomenutelné vzpomínky. Vryl se mi do paměti jako skromný, ale veliký vědec.

## L i t e r a t u r a

- [1] J. N. Děnísjuk: Holografie a její využití v zobrazovací technice. Sborník Interkamera 73 – 5. mezinárodní kongres Interkamera (Praha 3. - 5. 4. 1973), UVTEI Interkamera 1973, 15-27 (v ruštině).
- [2] M. Miler: Holografie (teoretické a experimentální základy a její použití). SNTL Praha 1974, 9-10.
- [3] S členem-korespondentem AV SSSR J.N. Denisjukem o holografii. (Otázky kladl M. Miler.) Čs. čas. fys. **A23** (1973) 524-25.
- [4] J. N. Děnísjuk: O zobrazovacích vlastnostech běžících intenzitních vln při záznamu dynamických objemových hologramů. Sborník Interkamera – Symposium o aplikované holografii (Praha 22. – 24. 10. 1974), UVTEI Interkamera Praha 1974, 17-20 (v ruštině).
- [5] J.N. Děnísjuk: O některých vlastnostech aspektogramu ve vztahu k úloze syntézy kompozitních hologramů. Sborník Interkamera – Symposium o aplikované holografii (Praha 7. – 9. 12. 1976), UVTEI Interkamera Praha 1976, 3-11 (v ruštině).



Rok 2007 přináší novou koncepci pořádání veletrhů a výstav v PVA Letňany. V květnu 2006 se veletržní správa ABF, a.s. stala součástí rodiny firem SPGROUP. Vstup kapitálově silného partnera umožnil zásadní přiblížení k strategickému cíli – postavení nového výstaviště evropských parametrů v Praze Letňanech u konečné stanice metra C, která bude zprovozněna v roce 2008. Proto již v tomto roce byl rozšířen počet a tématická šíře akcí pořádaných veletržní správou ABF – majitelem PVA Letňany. Mezi nové projekty patří průmyslově zaměřené veletrhy **FOR INDUSTRY** – veletrh strojírenských technologií a **FOR SURFACE** – veletrh strojů, zařízení a technologií pro povrchové úpravy, které se uskuteční v termínu **od 11. do 13. dubna**. Pražský veletržní areál je osvědčenou adresou pro úspěšnou prezentaci a reprezentativní nabídku v oblasti strojů, zařízení, nástrojů a komponentů pro strojírenství, povrchové úpravy a metalurgii. Technické podmínky umožňují představení strojů v provozu. Řada významným firem již konkretizuje své expozice, a proto se můžeme těšit, že prostory PVA Letňany budou důležitým místem pro setkání branže výrobců a dodavatelů se zaměřením na průmyslové technologie oborů, které se vzájemně dobře doplňují.

Přípravu veletrhů FOR INDUSTRY a FOR SURFACE zajišťuje vzájemná spolupráce se špičkovými specialisty z odborných svazů, sdružení, cechů, vysokých škol a s významnými výrobci a dovozci.

Česká společnost pro povrchové úpravy přijala funkci hlavního odborného garanta veletrhu FOR SURFACE. Odborný garant SVÚOM s.r.o. připravuje jako doprovodný program prezentaci nových norem v oblasti životního prostředí vztahujících se na provozy povrchových úprav. Obor žárového zinkování je zaštitěn spoluprací s Asociací českých a slovenských zinkoven, která jako odborný garant bude uživatelům protikorozní ochrany nabízet služby v oblasti techniky, technologie a ekologie.

Mediální kampaň veletrhů FOR INDUSTRY a FOR SURFACE zahrnuje propagaci ve více než 60 odborných titulech a webech. Návštěvníci veletrhů budou osloveni billboardy na hlavních dálničních tazích a přímé pozvání s čestnou vstupenkou direct mailem obdrží na 20.000 obchodníků a odborníků. Vystavovatelé mohou své technologické novinky přihlásit do soutěže o nejlepší exponát veletrhu, jejíž výsledky budou slavnostně vyhlášeny 11. 4. 2007 u příležitosti zahájení veletrhů.

Podrobné informace pro vystavovatele a návštěvníky jsou zveřejněny na [www.forindustry.cz](http://www.forindustry.cz)

Na spolupráci s Vámi se těší Ing. Hana Pokorná a Ing. Regina Matoušková – OT Průmysl.

# Světově největší CeBIT v Hannoveru

Veletržní společnost Deutsche Messe AG, Hannover každoročně organizuje mezinárodní veletrhy a konference CeBIT na různých místech světa. Největší a nejzajímavější z nich **CeBIT Hannover 2007** se bude konat ve dnech 15. až 21. března, také letos ve všech 27 výstavních halách za účasti 6200 vystavovatelů z oborů informačních, mediálních, telekomunikačních technologií a spotřební elektroniky. Přes 3000 podniků bude ze zahraničí, mezi nimi nejméně 20 firem z České republiky.

Veletrhy CeBIT jsou přední obchodní událostí digitálního světa, ukazují směry trhu a rozvoje techniky. Média a sítě splývají, uplatnění informačních a telekomunikačních technologií (ICT) optimalizuje obchodní činnost a digitální životní styl otevírá obchodu nové perspektivy. Podle tiskové zprávy veletržní společnosti na loňský CeBIT Hannover přijelo 434 000 návštěvníků, 104 200 jich bylo ze zahraničí, z toho z Evropy 70 000. Za ní následovala Asie se 25 300 hosty.

Letos hlavními představiteli trhu ICT budou firmy: IBM, Microsoft, Samsung, Toshiba, Sharp a SAP. Většina zahraničních podniků je přihlášena z Tchaj-wanu, Číny, Jižní Koreji a USA. Vedle Německa budou nejvíce zastoupeny národy evropského kontinentu: Nizozemí, Velká Británie, Rusko, Itálie, Francie, Turecko, Švédsko a Švýcarsko.

Partnerskou zemí veletrhu CeBIT 2007 bude Rusko. V Hannoveru se očekává více než 100 ruských vystavovatelů. Plánují čtyři reprezentativní společné stánky věnované softwaru, telekomunikacím, outsourcingu, výzkumu a vývoji. Speciální „Ruská okružní cesta“ ukáže na veletrhu stěžejní oblasti informačních technologií partnerské země. Tato vrcholná mezinárodní událost ICT má podpořit spolupráci Německa s Ruskem.

Veletrhu CeBIT 2007 se již tradičně účastní i řada firem z České republiky. Největší zastoupení je v oblasti komunikací a internetu, telematických služeb a navigace, vybavení pro digitální sítě a bezpečnostních antivirových technologií. Kromě zkušených předáků, pro které je CeBIT již pravidelnou marketingovou aktivitou, jako jsou např. 2N Telekomunikace Praha, Level Náchod či Grisoft Brno, si na letošním ročníku odbudou některé české firmy naopak svou hannoverskou veletržní premiéru.

Mimo samostatných vystavovatelů se s nabídkou českých firem bude možné seznámit i v rámci společné expozice, organizované v hale 8 sdružením CzechICT Alliance, jehož tématem je letos atraktivní a v rámci oblasti ICT velmi aktuální téma – Outsourcing. Czech ICT Alliance, oficiální exportní společnost České agentury

na podporu obchodu CzechTrade, národní proexportní agentury Ministerstva průmyslu a obchodu ČR, organizuje na veletrhu CeBIT národní den českého ICT. V rámci společného stánku tématu Outsourcing IT v hale 8, organizovaného CzechICT Alliance, se veletrhu dále účastní asi 6 českých firem. Účast českých vystavovatelů na veletrhu CeBIT 2007 je oficiální účastí České republiky s finanční podporou Ministerstva průmyslu a obchodu ČR, které bude rovněž na veletrhu zastoupeno.

Z novinek českých firem lze uvést několik ukázek:

- *2N Telekomunikace, a.s.* v hale 13 bude prezentovat doplňkové zařízení pro prostředí integrovaných komunikačních služeb pod názvem Ateus Mobility Extension, které umožňuje připojit mobilní telefon koncového uživatele k jakékoliv pobočkové ústředně jako standardní kancelářskou linku. Díky tomuto připojení lze využívat veškeré funkce ústředny, a to i v případě, že uživatelé pracují mimo kancelář.
- *eCallCzech, s.r.o.* v hale 11 byla založena loni v souvislosti s plánovaným zařazením tísňového satelitního systému pro motoristy, schváleného Evropským parlamentem. Může být aktivován automaticky při spuštění airbagu, nebo mechanicky pomocí tísňového tlačítka. V případě nehody, kdy se vozidlo dostane do střetu s cizím předmětem či překážkou, automaticky vytočí tísňovou mezinárodní linku 112, zabezpečující komunikaci mezi řidičem a operačním centrem tísňového volání, a zároveň zašle satelitní údaje o poloze vozidla.
- *Level, s.r.o.* v hale 11 představí unikátní systém GSM autoalarm GB 060 315 C pro zabezpečení vozu, lokalizaci a navigaci s možností dálkového dohledu samotným uživatelem i bezpečnostní agenturou. Sdružuje funkce autoalarmu, GSM komunikátoru, GSM i GPS lokátoru a GPS navigátoru. Nabízí funkce vysoce účinného tichého autoalarmu ovládaného bezkontaktní identifikační kartou, přenos alarmových zpráv a signalizaci na mobilní telefon i možnost lokalizace vozu, a to bez nutnosti jiných placených služeb.

Další zajímavé informace lze najít na internetových stránkách [www.cebit.de](http://www.cebit.de) a [www.cebit.com](http://www.cebit.com). Zájemci o návštěvu veletrhu si mohou zakoupit v předprodeji vstupenky a katalogy za zvýhodněné ceny u výhradního zastoupení Deutsche Messe AG Hannover v ČR, Ing. Eva Václavíková, Myslbekova 7, 169 00 Praha 6, tel./fax: 220 510 057, e-mail: [info@hf-czechrepublic.com](mailto:info@hf-czechrepublic.com).

(jpe)

## Prezentace firem a odborné přednášky na veletrhu OPTA 2007 pavilon V, sobota 24. 2. 2007

10.00 h	Firma JZO sp. Z o.o. Polsko – přednášející Michal Razik Název: Moderní brýlové čočky vyráběné firmou JZO Polsko	15.00 h	Firma Rodenstock ČR s.r.o. – přednášející Libor Pivoňka Název: Impression Mono - první individuální jednoohnisková brýlová čočka na světě
11.00 h	Firma Essilor Optika spol. s.r.o. – přednášející PhDr. Ján Poldauf – Název: Nové výrobky firmy Essilor.	16.00 h	Přestávka V této době probíhá módní přehlídka brýlových obrub Osmany Laffita Eyewear na stánku společnosti Mr. Gain, stánek č. 014
12.00 h	Firma Carl Zeiss s.r.o. – přednášející Martin Suder Název: Nové produkty firmy Carl Zeiss.	17.00 h	Firma Novartis s.r.o. CIBA Vision - přednášející Tomáš Haberland Název: Korekce zraku a torické kontaktní čočky
13.00 h	pan Doc. MUDr. Milan Anton, CSc. – přednášející Název: Refrakční vady a jejich výskyt v populaci.		
14.00 h	Firma TouchWARE s.r.o. – přednášející Bc. Jan Verner a Ing. Václav Valenta Název: Informační systémy pro řízení očních optik		

Martin Strátecký



# MACH

# '07

6. mezinárodní veletrh strojů, zařízení a komponentů pro strojírenství

Souběžně proběhnou veletrhy:

**FINET** povrchové úpravy

**METAL** hutnictví a slévárství

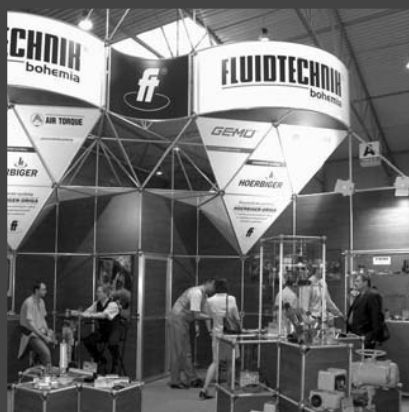
**WAREC** nakládání s odpady, recyklace, čištění

**INTERCHEM** chemická výroba, plasty

## STROJEXPO

### 11. - 13. 4. 2007

### Praha - PVA Letňany



**TERINVEST** spol. s r. o., Legerova 15, 120 00 Praha 2, tel.: +420 224 263 152, 143  
fax: +420 224 263 148, [www.strojexpo.cz](http://www.strojexpo.cz)

**TERINVEST**

[www.terinvest.com](http://www.terinvest.com)

# CONTENTS

---

## **Utilization of two- and three-dimensional optical analysis of the human eye optic disc in glaucoma diagnostics**

(F. Pluháček, J. Pospíšil, T. Kuběna)..... 31  
Changes of the blind spot (optic disc) of the human eye retina are the first symptoms of glaucoma. Their detection and suitable numerical representation can be performed on the basis of evaluation of two- or three-dimensional data, which are obtained by a suitable optical scanning of the optic disc. This article provides the description of two concrete methods: the newly proposed method of image analysis of color digital images of the optic disc for detection of color and brightness glaucomatous changes within the optic disc and the known method of the laser scanning tomography for observation of the topographical changes of the optic disc. The main part of this article comprises comparison of diagnostic usability of the relevant numerical parameters, which are characteristic for the above-mentioned methods. For this purpose, both methods were applied to the statistical set of 480 healthy and glaucomatous eyes.

**Optometry study in 2006** (J. Wagner, F. Pluháček) ..... 35

**Trade fair OPTA in Brno** (V. Malíšek)..... 36

## **Polarisation optical reflectometer for fiber sensors with distributed parameters**

(M. Hlaváč, J. Jasenek, J. Červeňová)..... 37  
In this article we describe the fiber optics reflectometer that we are actually developing at our workplace. The device integrates some nonconventional technologies. Principles of integrated photonic technologies are explained here. Reflectometer will be deployed as a sensor for distributed sensing of physical fields along the optical fiber. Key details of device implementation are disclosed here according to fiber optics, electronics, and thermodynamics.

## **The modification of Gaertner L119 ellipsometer and its use for thin-film structures study**

(M. Lesňák, J. Luňáček, A. Talík, P. Hlubina, J. Pištora)..... 40  
This article deals with modification and renovation of the ellipsometer Gaertner L119 and its using for thin-film structures study. The measurement process is fully automatized. The device works at constant wavelength in PCSA null regime and the data are obtained for various angles of incidence. The system was tested on a set of SiO<sub>2</sub> thin-films prepared on Si single crystal wafers by thermal oxidation at 1200°C. The thicknesses obtained from experiment were compared with the results obtained by using of Yamaguchi type spectral ellipsometric system as well as with the data determined from white-light interferometry and spectral reflectometry.

**Keywords:** Ellipsometry, thin films.

**OCULUS: Advanced technology for opticians and ophthalmologists** (J. Šandera) ..... 42

**Actualities in photovoltaics** (M. Libra, V. Poulek) ..... 43

In September 2006 „21<sup>st</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition“ was organized in Dresden. Approximately 2000 participants and 385 exhibitors was registered. This paper speaks about some actualities from this exhibition.

## **Evaluation of the modulation transfer function of a digital video-camera by means of the power spectral density of a reflection random chart and its image**

(J. Pospíšil, P. Jakubík, F. Pluháček)..... 45  
A possible optimal way of measurement and computer evaluation of the locally-shift invariant modulation transfer function of a given digital video-camera in its photographic regime is described in this article. Such a way is based on exploitation of the power spectral density of a static two-dimensional reflection random chart, incoherently illuminated by the white light, and its digital electro-optical image. This chart simulates the white-noise distribution. For its production and for evaluation of the image-data, the specially developed computer programs were exploited under framework of the computer tool MATLAB 6.5. The chosen evaluational procedure follows from the presented spectral transfer equations containing the squared modulation transfer function which was then smoothed needfully in addition. Some obtained results are presented graphically under the pixel scale of relative spatial frequencies and also evaluated in view of the utilized different camera pixel resolutions and image gathering quality levels. They demonstrate the possibility of the exploited evaluational way to compare the image quality of the digital video-camera under chosen imaging conditions already mentioned.

## **Aluminium surface quality statistical evaluation at abrasive waterjet cutting**

(S. Hloch, J. Valíček) ..... 51  
Article deals with stastical evaluation of aluminium surface quality created by means of abrasive waterjet. It was evaluated the influence of the factors on the surface quality in 1, 6 and 11 mm depth. According statistical evaluation of the surface quality by means of factor analysis, results that for the evaluation of the quality average roughness is insufficient.

**Yuri Nikolaevich Denisyuk, the second one from two founders of modern holography, passed away** (M. Miler) ..... 55

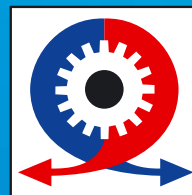
**In Memory of Emmett Leith and Yuri Denisyuk** (M. Miler) ... 56

**You are invited to PVA Letnany fair FOR INDUSTRY and FOR SURFACE** ..... 57

**Worldwide largest CeBIT in Hannover** (jpe)..... 58

**Trade fair OPTA 2007 presents companies and specialized lectures** (M. Střítecký)..... 58

# Přihlaste se do 15. 3. 2007!



MSV 2007

49. mezinárodní  
strojírenský  
veletrh



4. mezinárodní  
veletrh dopravy  
a logistiky

## 1.–5. 10. 2007 Brno – Výstaviště

Veletrhy Brno, a.s.  
Výstaviště 1  
647 00 Brno  
Tel.: +420 541 152 926  
Fax: +420 541 153 044  
E-mail: [msv@bvz.cz](mailto:msv@bvz.cz)  
[www.bvz.cz/msv](http://www.bvz.cz/msv)

Central European  
Exhibition Centre



BVV



Veletrhy  
Brno

## MSV + Transport a Logistika 2007 Technologie pro průmysl, dopravu i logistiku

**49. mezinárodní strojírenský veletrh v Brně představí novinky a trendy v devíti klíčovém průmyslových oborech včetně kovoobráběcích a tvářecích strojů. Souběžně s ním se po roční přestávce uskuteční 4. mezinárodní veletrh Transport a Logistika.**

Největší technologický veletrh ve střední Evropě je vyhledáván jako křižovatka odborníků a stěžejní místo pro představení inovací. Pravidelně se jej účastní více než dva tisíce vystavovatelů, mezi nimi téměř 800 zahraničních firem především z Německa, Slovenska, Itálie a Rakouska. Během pěti dnů si výstavní expozice prohlédne sto tisíc návštěvníků, podle průzkumu z 90 procent odborníků. Podíl zahraničních návštěvníků v posledních letech roste a loni překročil 13 procent.

### MSV - svět průmyslu pro profesionály - opět v říjnu

MSV je portálem novinek, inovací a klíčových trendů ve strojírenství i dalších průmyslových oborech. Struktura letošního ročníku pokrývá v devíti specializovaných oborových celcích všechny klíčové průmyslové oblasti od těžby nerostů až po ekotechniku a nezapomíná ani na důležitou sféru výzkumu a vývoje.

Letos se Mezinárodní strojírenský veletrh uskuteční opět v prvním říjnovém týdnu. Důvodem je konání světového veletrhu obrábění EMO Hannover, který proběhne v tradičním termínu MSV - od 17. do 22. září 2007. Pořadatelé tak vycházejí vstříc vystavovatelům a návštěvníkům, kteří se chtějí zúčastnit obou veletrhů.

### Prezentace obráběcích strojů bez omezení

Dobrou zprávou pro vystavovatele obráběcích strojů je rozhodnutí Generálního komisariátu EMO umožnit účastníkům EMO Hannover vystavovat v roce 2007 stroje a zařízení i na jiných veletrzích v Evropě.

### V synergii s dopravou a logistikou

Bez logistických procesů, které snižují náklady a zvyšují konkurenceschopnost, si moderní výrobu a obchod již nedokážeme představit. S komplexní nabídkou výrobků, technologií a služeb pro efektivní tok zboží se návštěvníci brněnského výstaviště seznamují vždy v lichých letech v době konání MSV.

### Víc než jen expozice

Přidanou hodnotou veletrhů je kvalitní doprovodný program přitažlivý pro širokou odbornou veřejnost. Mezi několika desítkami konferencí a seminářů připravovaných na letošní ročník nebudou chybět osvědčené akce Celostátní setkání elektrotechniků nebo Logistická konference, nejlepší exponáty opět budou soutěžit o Zlaté medaile.

### iKariéra na MSV

Reprízy se dočká také projekt iKariéra - nabídka pracovních příležitostí ve strojírenství a elektrotechnice při MSV. Loňské veletržní burzy práce se zúčastnilo šestnáct významných firem, které první ročník pořádaný při MSV hodnotily pozitivně. Druhý ročník veletrhu iKariéra mezinárodní studentská organizace IAESTE uspořádá v termínu 3. - 4. 10. 2007.

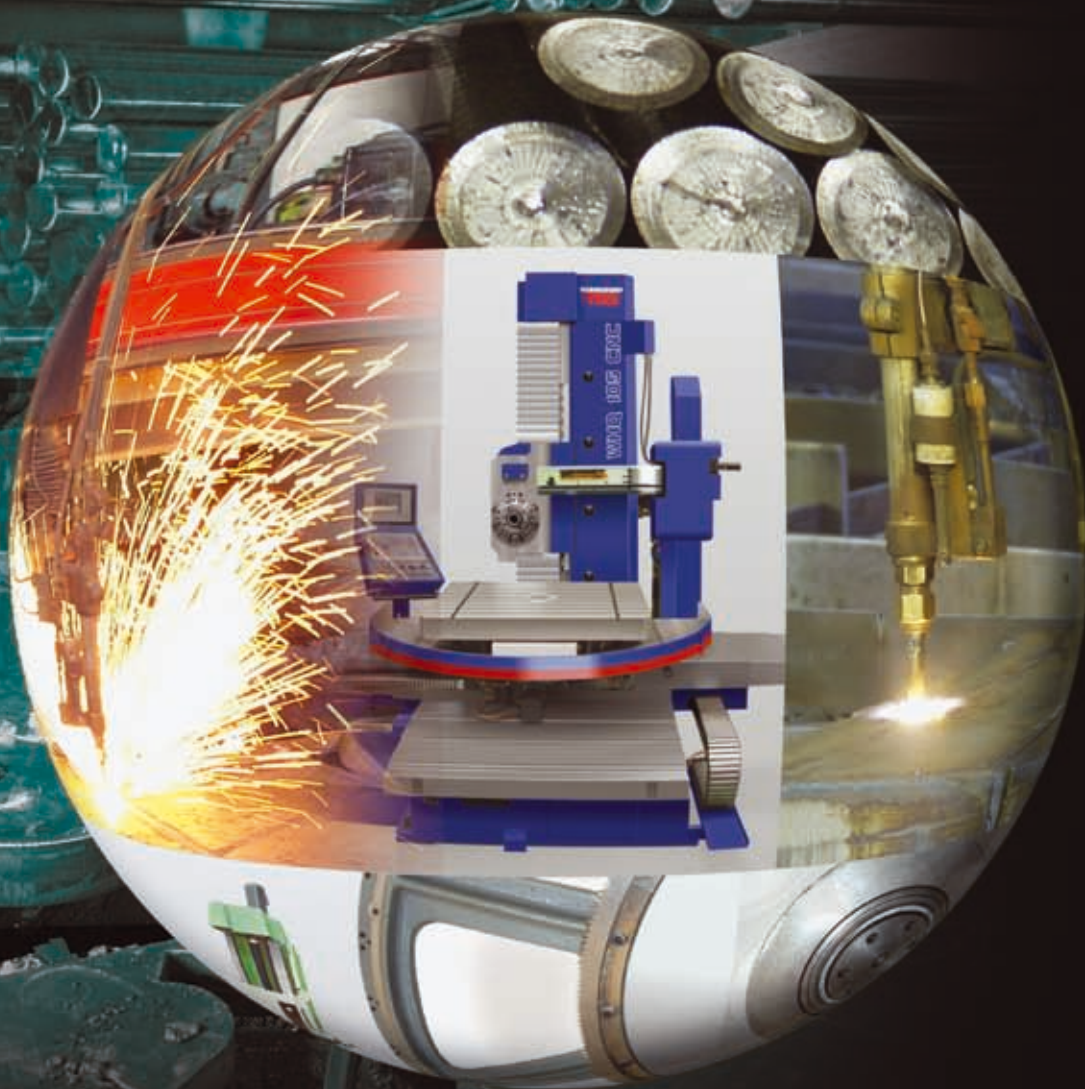
**Uzávěrka přihlášek na 49. mezinárodní strojírenský veletrh a 4. mezinárodní veletrh Transport a Logistika je k datu 15. března 2007.**

VELETRH STROJÍRENSKÝCH TECHNOLOGIÍ

# industry for surface

VELETRH STROJŮ,  
ZAŘÍZENÍ A TECHNOLOGIÍ  
PRO POVRCHOVÉ ÚPRAVY

HLAVNÍ ODBORNÝ GARANT  
**Česká společnost  
pro povrchové úpravy**



**11 - 13. 4. 2007**

**PRAŽSKÝ VELETRŽNÍ AREÁL LETŇANY**



industry  
for surface

ABF, a. s., veletržní správa, Václavské náměstí 29, 111 21 Praha 1

pracoviště: Mimoňská 645, 190 00 Praha 9 - Prosek, fax: + 420 222 891 199  
tel.: 222 891 264-6, e-mail: forindustry@abf.cz, www.abf.cz