

## REDAKČNÍ RADA

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

**Členové:** RNDr. Ing. Ján BARTL, CSc., ÚM SAV, Bratislava, doc. Dr. RNDr. Zdeněk BOUCHAL, UP, Olomouc, Ing. Igor BREZI-NA, Bratislava, RNDr. Jan DUPÁK, CSc., ÚPT AV ČR, Brno, prof. Ing. Pavol HORŇÁK, DrSc., STU, Bratislava, Ing. Libor HOVOR-KA, H & H hodinářská s.r.o., Nové Město nad Metují, prof. RNDr. Mi-roslav 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., Předsednictvo SAV, Bratislava, RNDr. Pavel KLENOVSKÝ, Český metrologický institut, Brno, RNDr. Josef KRÁSA, CSc., FZÚ AV ČR, Praha, Ing. Jiří KR-ŠEK, VUT, Brno, RNDr. Vojtěch KŘESÁLEK, CSc., UTB, Zlín, Ing. Jan KÚR, 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, a.s., Přerov, doc. Ing. Petr LOUDA, CSc., TU, Liberec, Ing. Vladimír MATELA, Meopta-optika, a.s., Přerov, prof. RNDr. Jan PEŘINA, DrSc., UP, Olomouc, prof. Ing. Jaromír PIŠTO-RA, CSc., VŠB - TU, Ostrava, prof. RNDr. Ing. Jaroslav POSPÍŠIL, DrSc., UP, Olomouc, Jan ŘÍDKÝ, CSc., FZÚ AV ČR, Praha, RNDr. Dagmar SENDEŘÁKOVÁ, CSc., 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 Univer- sity, U. K.; Paul RAUSNITZ, TCI New York, U. S. A.; Gisbert O. SCHAUER, Sylvania Lighting International, Erlangen, Germany; 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 za spoluúčasti The International Society for Optical Engineering (SPIE/CS) v Nakla- datelství Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky.

**Odpoovědný 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: pelcova@optn.wpol.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 příspěv- ků odpovídají autoři.

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

**Rozšiřuje** vydavatel, KNIHKUPECTVÍ - Wellemínová, Ditrichova 13, 120 00 Praha 2, Podniková prodejna Meopta-optika, a.s., Přerov, Ka- belíkova 1, 750 02 Přerov a KNIHKUPECTVÍ ACADEMIA, Václavské nám. 34, 110 00 Praha 1.

**V Slovenské republice je kontaktní místo:** prof. RNDr. Anton Štr- ba, CSc., katedra experimentální fyziky FMFI UK, Mlynská dolina F2/148, SK - 842 48 Bratislava, tel.: 00421 7 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.etc.sk **Tiskne** TYPoServis Holešov, Masarykova 650, 769 01 Holešov, tel.: 573 398 746, e-mail: typoservis@iol.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 2005

# JEMNÁ MECHANIKA A OPTIKA

VĚDECKO-TECHNICKÝ ČASOPIS  
ROČNÍK 50

2/2005

## OBSAH

**Objektivní reprezentace a diagnostická interpretace glaukomových změn papily zrakového nervu s využitím obrazové analýzy** (F. Pluháček, J. Pospíšil) ..... 35

**Využití Shack-Hartmannova senzoru v očním lékařství** (V. Kollárová) ..... 42

**Profesor Delong osmdesátiletý** (B. Lencová, L. Frank) ... 45

**Optimalizace optiky elektronové svářečky** (P. Jánský, B. Lencová, J. Zlámal) ..... 46

**Výpočet aberačních koeficientů regresí a jejich využití při výpočtu proudové hustoty svazků** (M. Oral) ..... 49

**Nízkovoltový prozařovací elektronový mikroskop** (P. Štěpán) ..... 52

**Návrh a realizace dvourozměrných rotačně symetrických transparentních struktur určených pro testování, kalibraci a srovnávací měření realizované pomocí digitálního rotačního mikrofotometru** (J. Hrdý) ..... 53

**Prostředky obrazové analýzy pro klasifikaci dendritických struktur** (J. Vařenka, R. Kubínek) ..... 58

**Nejvýznamnější technické veletrhy konané v 1. pololetí 2005 (jpe)** ..... 62

**Profesor JAROSLAV POSPÍŠIL sedmdesátiletý** (Redakce) ..... 65

**Světový CeBIT v Hannoveru (jpe)** ..... 65

**Dioptra vyrábí nejen brýlové čočky** ..... 66

**OCULUS - Váš spolehlivý dlouholetý partner** ..... 67

**Technický slovník naučný, 7. svazek, R-Š** ..... 67

**Technická a spotřební řemesla na veletrhu (jpe)** ..... 68

Obsah časopisu Jemná mechanika a optika je uveden na internetu: <http://www.meopta.cz/jmo>

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:** Milošlav VYCHODIL - Meopta-optika, a.s., Přerov (Czech Rep.)

**Members:** Ján BARTL - Inst. of Measurement Science Slovak Academy of Sciences, Bratislava (Slovak Rep.), Zdeněk BOUČHAL - 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.), Ing. Libor HOVORKA, H & H hodinářská s.r.o., Nové Město nad Metují, 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 - Presidium of the Slovak Academy of Science, 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 KŘESÁLEK - Tomas Bata Univ. in Zlín (Czech Rep.), Ing. Jan KUR, 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 LOŠTÁK - Meopta-optika, a.s., Přerov (Czech Rep.), Petr LOUDA - Tech. Univ., Liberec (Czech Rep.), Vladimír MATELA - Meopta-optika, a.s., Přerov (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 SENDERÁKOVÁ - 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.; Gisbert O. SCHAUER, Sylvania Lighting International, Erlangen, Germany; 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.

**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: pelclova@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, BOOKSTORE - Wellemínová, Ditrich street 13, CZ-120 00 Praha 2, Company Sales shop of Meopta-optika, a.s., 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 7 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: typoservis@iol.cz

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

Papers are reviewed.

© FINE MECHANICS AND OPTICS 2005

# FINE MECHANICS AND OPTICS

SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL  
VOLUME 50 2/2005

## CONTENTS

<b>Objective representation and diagnostic interpretation of glaucomatous changes of the optic disc using image analysis</b> (F. Pluháček, J. Pospíšil) .....	35
<b>Shack-Hartmann sensor application in ophthalmology</b> (V. Kollárová) .....	42
<b>Professor Delong in his eighties</b> (B. Lencová, L. Frank) .....	45
<b>Optimizations of optics of an electron-beam welding machine</b> (P. Jánský, B. Lencová, J. Zlámal) .....	46
<b>Computation of aberration coefficients by fitting and their use for calculation of current density in beams</b> (M. Oral) .....	49
<b>Low-voltage transmission electron microscope</b> (P. Štěpán) .....	52
<b>Design and Realization Two-dimensional Rotarily Symmetrical Transparent Structures Utilized for Testing, Calibration and Comparative Measuring Realized by Means of the Digital Rotational Microphotometer</b> (J. Hrdý) .....	53
<b>The tools of digital image analysis for classification of dendritic structures</b> (J. Vařenka, R. Kubínek) .....	58
<b>The most significant technical fairs hold in the first half year 2005</b> (jpe) .....	62
<b>Professor Jaroslav Pospíšil septuagenary</b> (Editorial board) .....	65
<b>World CeBIT in Hannover</b> (jpe) .....	65
<b>Dioptra produces not only spectacle lenses</b> (jpe) .....	66
<b>OCULUS - Your solid confirmed partner</b> .....	67
<b>Technical thesaurus, Vol. 7, R-Š</b> .....	67
<b>Technical and consumer trades in the fair</b> (jpe) .....	68

You can also find the contents of the Journal on Internet:  
<http://www.Meopta.cz/jmo>

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

# Objektivní reprezentace a diagnostická interpretace glaukomových změn papily zrakového nervu s využitím obrazové analýzy

*Jedním z typických symptomů glaukomu je vznik a progresse nabledlé oblasti uvnitř papily zrakového nervu na lidském očním pozadí. Tyto změny je možné objektivně detekovat a vhodně numericky reprezentovat ve formě tzv. charakteristického vektoru navrženým a v článku popsáním postupem počítačové obrazové analýzy barevných digitálních snímků očního pozadí. Dále jsou prezentovány dva nové postupy pro následné zpracování získaných číselných dat, které využívají jednak analytickou aproximaci hustot pravděpodobnosti jedné vybrané složky charakteristického vektoru a jednak komplexní vyhodnocení celého charakteristického vektoru pomocí vhodné umělé neuronové sítě. Jejich výsledkem je finální objektivní automatická diagnostická klasifikace vyšetřovaných očí do třech skupin s různým rizikem výskytu glaukomu. Na závěr je uveden návrh objektivního postupu pro stanovení stupně glaukomového poškození postiženého oka. Všechny popisované metody jsou v článku ověřeny a srovnány s využitím souboru 480 barevných digitálních snímků zdravých a glaukomových papil.*

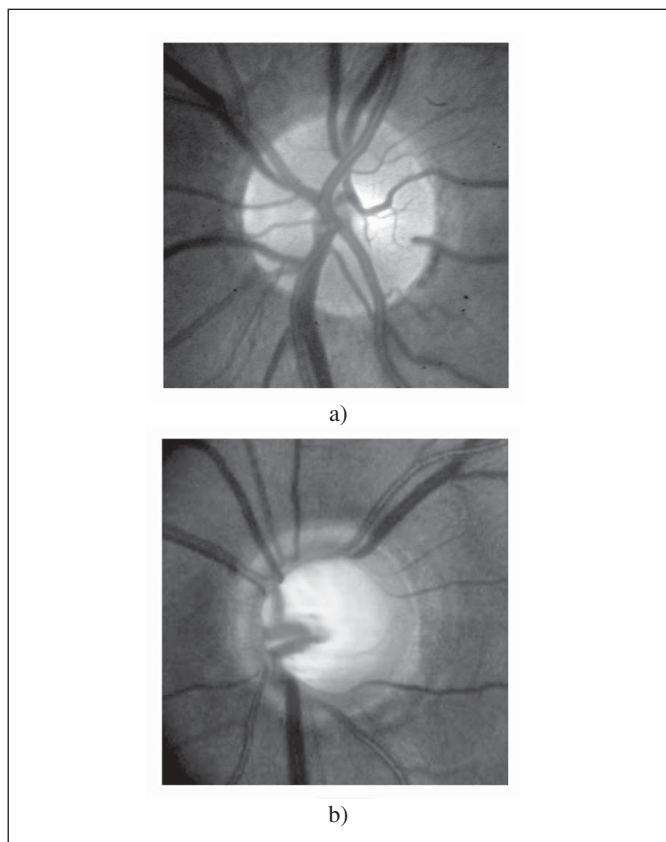
## 1. ÚVOD

Mezi typické příznaky glaukomu (zeleného zákalu) patří vznik a progresse charakteristických změn na očním pozadí, zejména v oblasti papily zrakového nervu [1-7]. Papila (optický disk) je místem očního pozadí, do kterého se sbíhají nervová vlákna světlocitlivých buněk sítnice a odkud vycházejí za oko ve formě zrakového nervu. Přibližně uprostřed papily se nachází prohlubeň (tzv. exkavace), kterou prochází cévy vyživující sítnici. Dno exkavace obvykle obsahuje nabledlou oblast (tzv. nablednutí), reprezentující

část papily s částečnou nebo úplnou absencí nervových vláken. Pro glaukomem postižené oči je příznačné zvětšení exkavace a jejího nablednutí (viz obr. 1). V praxi rozšířené subjektivní vyhodnocení těchto změn jeví obecně nízkou reprodukovatelnost a značnou závislost na zkušenostech vyšetřujícího lékaře. Objektivně lze velikost exkavace měřit například známými metodami stereosnímku nebo laserové skenovací tomografie, viz například publikace [8-13], které se zakládají na vytvoření a analýze trojrozměrné mapy papily. K objektivnímu studiu nablednutí lze též efektivně využít postupy obrazové analýzy barevných snímků příslušné oblasti očního pozadí. Vzhledem k faktu, že velikost nablednutí nežádoucně závisí na velikosti papily, je vhodné uvažovat relativní velikost této oblasti, definovanou například jako poměr velikosti reprezentační oblasti nablednutí a reprezentační oblasti papily na snímku vyšetřovaného oka a označenou jako P/D (pallor to disc) poměr. Současné metody analyzující oblast nablednutí se soustřeďují především na studium časové progresse její velikosti [14]. Tento článek prezentuje nový postup pro detekci a objektivní číselný popis relativní velikosti reprezentační oblasti nablednutí formou P/D poměrů na barevných digitálních snímcích papily. Dále se zabývá návrhem, experimentálním ověřením a srovnáním diagnostických metod pro následné objektivní automatické vyhodnocení zmíněných číselných dat.

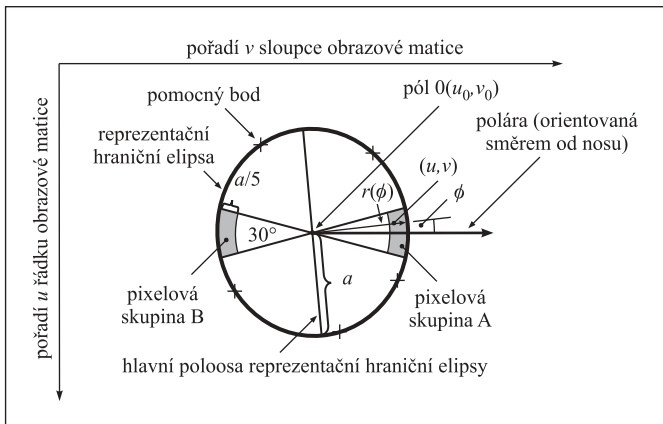
## 2. NUMERICKÁ REPREZENTACE OBLASTI NABLEDNUTÍ

Vzhledem ke geometrickým a optickým vlastnostem očního pozadí je nutné provádět jeho snímání ve stejném směru, v jakém dopadá potřebný osvětlovací svazek. Tento postup umožnila použitá fundus kamera DFK 98 [15], sestavená z vhodné upraveného fotografického systému Retinofot Carl Zeiss Jena 201 a propojeného pomocí barevné CCD videokamery prostřednictvím vhodné grafické karty s osobním počítačem. Snímána byla oblast papily a jejího nejbližšího okolí o přibližné skutečné velikosti 4,4 mm x 5,8 mm. Získané barevné (RGB) snímky v použitém bitmapovém grafickém formátu JPG mají velikost 576 x 768 pixelů. Jasové hodnoty každého z odpovídajících třech barevných kanálů (složek) snímku [tj. červený (R), zelený (G) a modrý (B) kanál] byly kvantovány do 256 diskretních úrovní a reprezentovány celými čísly od 0 do 255. Přitom hodnota 0 reprezentovala minimální jas a hodnota 255 reprezentovala maximální jas každého barevného kanálu. Během snímání bylo popsání snímacího zařízení orientováno tak, že řádky výsledné obrazové matice odpovídaly horizontálnímu směru.



Obr. 1 Snímek papily a) zdravého oka a b) oka postiženého glaukomem se zanedbatelně malou a s výrazně rozsáhlou exkavací a oblastí nablednutí

Reprezentační oblast papily, potřebnou pro určení P/D poměru, je možné s dostatečnou přesností vymežit pomocí vhodné reprezentační hraniční elipsy (obvykle o malé excentricitě), určené pěti pomocnými body (viz obr. 2), které jsou manuálně s pomocí myši a klávesnice počítače vyznačeny na použitém barevném digitálním snímku zkušeným operátorem. Za účelem přehlednější orientace na snímku se jeví vhodné definovat polární souřadnou soustavu s pólem 0 ve středu zmíněné reprezentační hraniční elipsy a s polárou orientovanou horizontálně ve směru od nosu (obr. 2). Úhly v této souřadné soustavě jsou uvažovány ve směru pohybu hodinových ručiček v případě pravého oka a proti směru pohybu hodinových ručiček v případě levého oka.



Obr. 2 Příklad reprezentační hraniční elipsy, uvažované kartézské a polární souřadné soustavy a referenčních pixelových skupin A a B

V následujících krocích, vedoucích k objektivnímu vymezení reprezentační oblasti nablednutí, byla využita pouze zelená (G) barevná složka digitálního snímku. Protože uvažovaný jas  $G$  snímku nežádoucně závisí na použité hodnotě osvětlení očního pozadí během snímání, je nutné jej vhodně normalizovat. Za tímto účelem byly definovány dvě referenční skupiny pixelů A a B, viz obr. 2. Bod snímku  $(u,v)$ , nacházející se na průsečíku  $u$ -tého řádku a  $v$ -tého sloupce obrazové matice, patří do těchto skupin o empiricky vybrané šířce  $a/5$ , pokud vyhovuje nerovností

$$r(\phi) - \frac{a}{5} \leq \sqrt{(u-u_0)^2 + (v-v_0)^2} \leq r(\phi), \quad (1)$$

kde  $-15^\circ \leq \phi \leq 15^\circ$  v případě pixelové skupiny A nebo  $165^\circ \leq \phi \leq 195^\circ$  v případě pixelové skupiny B. Bod  $(u_0, v_0)$  reprezentuje pozici pólu 0 výše definované polární souřadné soustavy,  $a$  je referenční velikost hlavní poloosy reprezentační hraniční elipsy,  $\phi$  představuje orientovaný úhel mezi polohovým vektorem pixelu  $(u,v)$  a polárou,  $r(\phi)$  je vzájemná vzdálenost pólu 0 a bodu hraniční elipsy o úhlové souřadnici  $\phi$ . Vzhledem k tomu, že jasové hodnoty oblastí optického disku odpovídající zmíněným pixelovým skupinám A, B nejsou prakticky ovlivněny vývojem glaukomu, mohou být použity ke stanovení referenčních jasových hodnot  $G_A$  a  $G_B$  vhodných pro již zmíněnou normalizaci jasu  $G$ . Tyto hodnoty jsou definovány jako jasové hodnoty zelené barevné složky snímku s nejvyšší četností výskytu ve skupinách pixelů A a B. Mimoto může být poloha každé pixelové skupiny zastoupena průměrnými hodnotami  $\bar{u}_A, \bar{v}_A$  a  $\bar{u}_B, \bar{v}_B$  řádkových a sloupcových indexů jejich pixelů. Pro výpočet požadovaného normalizovaného jasu  $G'_n(u,v)$  každého bodu  $(u,v)$  reprezentační oblasti papily byla navržena vhodná relace

$$G'_n(u,v) = \frac{2G(u,v)}{G_A + G_B}. \quad (2)$$

Hodnoty  $G_A$  a  $G_B$  se obecně navzájem liší z důvodu nežádoucích změn jasu v periferii papily ve směru poláry. Tento jev byl

efektivně kompenzován účelně definovanou a experimentálně ověřenou jasovou transformací

$$G'_n(u,v) = G_n(u,v) - G_{An} - \frac{G_{Bn} - G_{An}}{\bar{v}_B - \bar{v}_A} (v - \bar{v}_A) \quad (3)$$

normalizovaného jasu  $G_n(u,v)$  v pixelu  $(u,v)$  na novou hodnotu  $G'_n(u,v)$ . Uvedené znaky  $G_{An}$  a  $G_{Bn}$  představují hodnoty  $G_A$  a  $G_B$  normalizované podle relace (2). Reprezační oblast nablednutí je definována jako oblast snímku uvnitř reprezentační hraniční elipsy, kde je normalizovaná transformovaná hodnota  $G'_n$  větší nebo rovna vhodné zvolené prahové hodnotě  $p$ . V této práci je dále uvažována empiricky stanovená rovnost  $p = 0,2$ .

Relativní velikost nalezené reprezentační oblasti nablednutí byla konvenčně numericky popsána charakteristickým vektorem ( $P/D_T, P/D_I, P/D_{II}, P/D_{III}, P/D_{IV}$ ). Jeho uvedené jednotlivé složky označují po řadě P/D poměry pro celou reprezentační oblast papily a pro její 4 kvadranty očíslované I, II, III, IV s rozsahy vrcholových úhlů  $(-45^\circ, 45^\circ)$ ,  $(45^\circ, 135^\circ)$ ,  $(135^\circ, 225^\circ)$ . Uvedená definice charakteristického vektoru umožňuje nezávislý popis obvykle rozdílné progresse uvažovaného glaukomového příznaku v jednotlivých částech papily.

### 3. STATISTICKÁ ANALÝZA CHARAKTERISTICKÉHO VEKTORU

Ve spolupráci s očním lékařem bylo pořízeno 240 snímků papil 120 normálních zdravých osob a 240 snímků papil 120 osob s tzv. glaukomem s otevřeným duhovko-rohovkovým úhlem (od každé vyšetřované osoby byly snímány obě oči). Glaukom s otevřeným duhovko-rohovkovým úhlem, podrobněji diskutovaný například v publikacích [1-2, 4-6], představuje častější a obtížnější diagnostikovatelnou formu glaukomu. Přitom požadovaná lékařská diagnóza byla stanovena spolupracujícím oftalmologem na základě nezávislého měření nitroočního tlaku, očního zorného pole, zjištění velikosti exkavace užitím laserového skenovacího tomografu a subjektivního pozorování tloušťky vrstvy nervových vláken na sítnici. Věkový rozsah vyšetřovaných zdravých osob byl od 14 do 76 let se střední hodnotou 46 let a se směrodatnou odchylkou 13 let. Vyšetřované osoby s glaukomem měly věk od 10 do 82 let se střední hodnotou 51 let a se směrodatnou odchylkou 16 let. Pro každý z uvedených snímků byl výše popsaným způsobem stanoven charakteristický vektor.

#### 3.1 Směrodatné odchylky složek charakteristického vektoru

Použité subjektivní manuální vymezení reprezentační eliptické hranice papily pro daný snímek je ovlivněno variabilitou, která může být popsána jednotlivými směrodatnými odchylkami výše definovaných a měřených komponent charakteristického vektoru. Pro stanovení odhadu těchto odchylek bylo náhodně vybráno 40 zdravých a 40 glaukomových snímků papily z výše zmíněného celého souboru snímků. Pro každý z těchto celkem 80 vybraných snímků bylo postupně desetkrát provedeno manuální vymezení reprezentační eliptické hranice papily (celkem tedy bylo provedeno 800 ohraničení papily) a také stanovení všech odpovídajících dílčích P/D poměrů. Získané dílčí P/D poměry byly pro každý vybraný snímek statisticky zpracovány a byly určeny jednotlivé přiřazené směrodatné odchylky  $\sigma_s$ ,  $s \in \{T, I, II, III, IV\}$ , jejich měření. Jde vlastně o průměrné hodnoty směrodatných odchylek vztažených k jednotlivým P/D poměrům. Provedené výpočty vedly k hodnotám  $\sigma_T = 0,008$ ,  $\sigma_I = 0,02$ ,  $\sigma_{II} = 0,01$ ,  $\sigma_{III} = 0,007$ ,  $\sigma_{IV} = 0,01$ .

#### 3.2 Závislost charakteristického vektoru na věku

Vzhledem ke značnému věkovému rozsahu snímaných osob bylo nutné zjistit případný vliv jejich věku na hodnoty charakteristického vektoru. Pro snímky papil zdravých očí byly metodou lineární regrese [16-18] stanoveny relace:

$$\begin{aligned}
P/D_T &= -5,6 \cdot 10^{-5} \cdot v\check{e}k + 0,1, & C_T &= -0,1 \cdot 10^{-1}, \\
P/D_I &= -5,7 \cdot 10^{-4} \cdot v\check{e}k + 0,2, & C_I &= -0,6 \cdot 10^{-1}, \\
P/D_{II} &= 9,3 \cdot 10^{-5} \cdot v\check{e}k + 0,9 \cdot 10^{-1}, & C_{II} &= 0,1 \cdot 10^{-1}, \\
P/D_{III} &= -1,4 \cdot 10^{-4} \cdot v\check{e}k + 0,3 \cdot 10^{-1}, & C_{III} &= -0,4 \cdot 10^{-1}, \\
P/D_{IV} &= 3,1 \cdot 10^{-4} \cdot v\check{e}k + 0,6 \cdot 10^{-1}, & C_{IV} &= 0,6 \cdot 10^{-1}.
\end{aligned} \quad (4)$$

Snímky papil glaukomových očí vedly při stejné analytické metodě k výrazům:

$$\begin{aligned}
P/D_T &= -1,7 \cdot 10^{-3} \cdot v\check{e}k + 0,3, & C_T &= -0,3, \\
P/D_I &= -3,3 \cdot 10^{-3} \cdot v\check{e}k + 0,5, & C_I &= -0,4, \\
P/D_{II} &= -1,2 \cdot 10^{-3} \cdot v\check{e}k + 0,3, & C_{II} &= -0,2, \\
P/D_{III} &= -1,2 \cdot 10^{-3} \cdot v\check{e}k + 0,2, & C_{III} &= -0,2, \\
P/D_{IV} &= 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot v\check{e}k + 0,3, & C_{IV} &= -0,2.
\end{aligned} \quad (5)$$

Parametry  $C_T, C_I, C_{II}, C_{III}$  a  $C_{IV}$  představují příslušné korelační koeficienty. Zavedená proměnná veličina  $v\check{e}k$  udává stáří vyšetřované osoby v rocích. Ze získaných výsledků vyplývá, že zmíněná věková závislost byla pro uvažovaný soubor vyšetřovaných osob nevýznamná.

### 3.3 Vliv glaukomu na hodnoty charakteristického vektoru

Vliv glaukomu na hodnoty dané složky charakteristického vektoru (tj. na hodnoty daného P/D poměru) lze posoudit na základě normované vzdálenosti [19-21]

$$\rho = \frac{|\bar{t}_h - \bar{t}_g|}{\left[ \frac{\sigma_h^2 + \sigma_g^2}{2} \right]^{1/2}} \quad (6)$$

středních hodnot  $\bar{t}_h$  a  $\bar{t}_g$  statistických rozdělení této složky stanovených pro výše uvedený soubor snímků zdravých a glaukomových papil. Další zavedené parametry  $\sigma_h$  a  $\sigma_g$  představují přírůžné směrodatné odchylky zmíněných statistických rozdělení daného P/D poměru. Z definice (6) je zřejmé, že veličina  $\rho$  roste s rostoucím rozdílem  $|\bar{t}_h - \bar{t}_g|$  a klesá s rostoucími hodnotami  $\sigma_h, \sigma_g$ . Hodnoty  $\bar{t}_h, \bar{t}_g, \sigma_h$  a  $\sigma_g$ , vztahující se k jednotlivým složkám charakteristického vektoru, jsou prezentovány v tab. 1 spolu s odpovídajícími hodnotami  $\rho$ . Větším hodnotám normované vzdálenosti  $\rho$  je mož-

Tab. 1 Střední hodnoty  $\bar{t}_h, \bar{t}_g$ , přiřazené směrodatné odchylky  $\sigma_h, \sigma_g$  a odpovídající normované vzdálenosti  $\rho$  středních hodnot statistických rozdělení  $P/D_T, P/D_I, P/D_{II}, P/D_{III}$  a  $P/D_{IV}$  pro vyhodnocené snímky papil zdravých a glaukomových očí

P/D poměr	Střední hodnota		Směrodatná odchylka		$\rho$
	zdravé oči	glaukomové oči	zdravé oči	glaukomové oči	
$P/D_T$	0,10	0,24	0,07	0,09	1,74
$P/D_I$	0,20	0,38	0,13	0,12	1,44
$P/D_{II}$	0,09	0,28	0,09	0,12	1,79
$P/D_{III}$	0,02	0,11	0,04	0,09	1,29
$P/D_{IV}$	0,07	0,21	0,07	0,12	1,43

né přisoudit větší závislost odpovídajícího P/D poměru na výskytu glaukomu v oku. V souladu s tímto tvrzením se podle tab. 1 pro diagnostické účely jeví nejvýhodnější poměry  $P/D_{II}$  a  $P/D_T$ . Vzhledem k uvedeně skutečnosti a s přihlédnutím k větší přesnosti ve stanovení poměru  $P/D_T$  ( $\sigma_T = 0,008$ ) oproti  $P/D_{II}$  ( $\sigma_{II} = 0,01$ ) a se zřetelem k faktu, že poměr  $P/D_T$  nese informaci o celé papile, byla v následujícím textu kromě komplexního vyhodnocení charakteristického vektoru věnována pozornost také samostatnému diagnostickému vyhodnocení  $P/D_T$  poměru.

## 4. DIAGNOSTICKÁ INTERPRETACE SLOŽEK CHARAKTERISTICKÉHO VEKTORU

### 4.1 Diagnostické vyhodnocení $P/D_T$ poměru

Hustoty pravděpodobnosti  $p_h$  a  $p_g$  experimentálně získaných statistických rozdělení hodnot  $P/D_T$  pro výše zmíněných 240 zdravých a 240 glaukomových snímků papil je možné aproximovat experimentálně ověřenými vztahy

$$p_h(P/D_T) = N_h \exp[-\beta_{h1}(P/D_T - \beta_{h2})^3], \quad P/D_T \in \langle 0,1 \rangle, \quad (7)$$

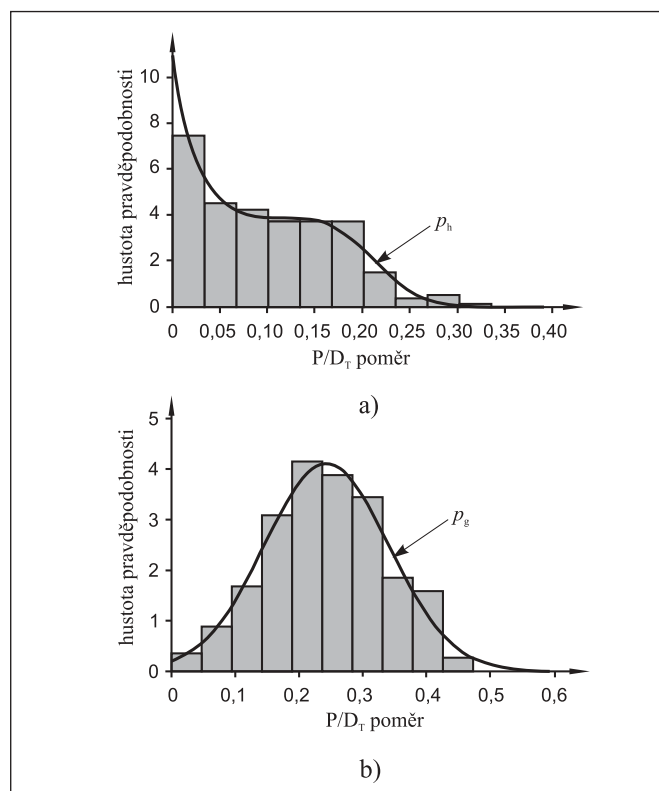
$$p_g(P/D_T) = N_g \exp[-\beta_{g1}(P/D_T - \beta_{g2})^2], \quad P/D_T \in \langle 0,1 \rangle, \quad (8)$$

kde

$$N_h = 1 / \int_0^1 \exp[-\beta_{h1}(x - \beta_{h2})^3] dx, \quad (9)$$

$$N_g = 1 / \int_0^1 \exp[-\beta_{g1}(x - \beta_{g2})^2] dx \quad (10)$$

jsou reálné normovací konstanty a  $\beta_{h1}, \beta_{h2}, \beta_{g1}, \beta_{g2}$  (souhrnně označované  $\beta_{h1,2}$  a  $\beta_{g1,2}$ ) představují vhodné reálné parametry. Hledané funkce (7) a (8) byly metodou nejmenších čtverců [16-18] proloženy sestrojenými histogramy  $P/D_T$  poměrů snímků zdravých a glaukomových očí. Pro konstrukci obou potřebných histogramů



Obr. 3 Výsledné histogramy statistického rozdělení  $P/D_T$  poměrů a) zdravých a b) glaukomových očí s proloženými křivkami hustoty pravděpodobnosti  $p_h(P/D_T)$  a  $p_g(P/D_T)$  danými výrazy (7), (8)

bylo použito 10 třídních intervalů. Příslušnými numerickými výpočty získané odhady hledaných parametrů  $\beta_{h1,2}$ ,  $\beta_{g1,2}$  a jejich směrodatných odchylek  $\sigma_{h1}$ ,  $\sigma_{h2}$ ,  $\sigma_{g1}$ ,  $\sigma_{g2}$  (zkráceně vyjádřených výrazy  $\sigma_{h1,2}$  a  $\sigma_{g1,2}$ ) jsou uvedeny v tab. 2. Nalezené hustoty pravděpodobnosti (7) a (8) byly testovány  $\chi^2$ -testem nejlepší shody [16-18]. Obě testované funkce nebyly provedeným testem zamítnuty při zvolených hladinách významnosti menších než 22 % v případě  $p_h$  a menších než 42 % v případě  $p_g$ . Získané výsledné histogramy  $P/D_T$  poměrů zdravých a glaukomových očí s odpovídajícími křivkami hustot pravděpodobnosti  $p_h$ ,  $p_g$  jsou prezentovány na obr. 3.

Tab. 2 Metodou nejmenších čtverců získané odhady parametrů  $\beta_{h1,2}$ ,  $\beta_{g1,2}$  a jejich směrodatných odchylek  $\sigma_{h1,2}$ ,  $\sigma_{g1,2}$

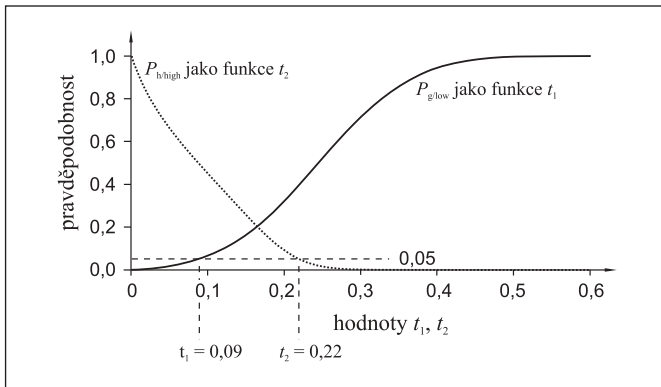
Parametr	Odhad hodnoty	Směrodatná odchylka	Odhad hodnoty
$\beta_{h1}$	$7,0 \times 10^2$	$\rho_{h1}$	$0,6 \times 10^2$
$\beta_{h2}$	$11,4 \times 10^{-2}$	$\rho_{h2}$	$0,4 \times 10^{-2}$
$\beta_{g1}$	$5,2 \times 10^1$	$\rho_{g1}$	$0,4 \times 10^1$
$\beta_{g2}$	$24,3 \times 10^{-2}$	$\rho_{g2}$	$0,4 \times 10^{-2}$

Pro diagnostickou klasifikaci očí byly uvažovány tři diagnostické rizikové skupiny označené jako skupina s nízkým rizikem (low-glaucoma risk class), skupina se středním rizikem (též označovaná jako skupina s podezřením na glaukom, glaucoma-suspected class) a skupina s vysokým rizikem glaukomu (high-glaucoma risk class). Skupina s nízkým glaukomovým rizikem obsahuje oči s  $P/D_T$  poměrem menším než  $t_1$ , do skupiny se středním rizikem výskytu glaukomu patří oči s  $P/D_T$  poměrem ležícím v intervalu  $\langle t_1, t_2 \rangle$  a skupina s vysokým glaukomovým rizikem zahrnuje oči s  $P/D_T$  poměrem větším než  $t_2$ . Přitom rozlišovací hraniční parametry  $t_1$  a  $t_2$ ,  $0 < t_1 < t_2 < 1$ , jsou vhodně zvolené hodnoty  $P/D_T$ . Za těchto podmínek je zdravé oko nežádoucně klasifikováno do skupiny s vysokým glaukomovým rizikem s pravděpodobností

$$P_{h/high} = \int_{t_2}^1 p_h(x) dx, \quad (11)$$

zatím co glaukomové oko je nežádoucně klasifikováno do skupiny s nízkým rizikem výskytu glaukomu s pravděpodobností

$$P_{g/low} = \int_0^{t_1} p_g(x) dx. \quad (12)$$



Obr. 4 Grafické závislosti pravděpodobností  $P_{h/high}$  a  $P_{g/low}$  na parametrech  $t_1$  a  $t_2$  s vyznačenými zvolenými hodnotami rozlišovacích mezí  $t_1 = 0,09$ ,  $t_2 = 0,22$  v případě vyhodnocení  $P/D_T$  poměru s využitím křivek hustoty pravděpodobnosti (7) a (8)

Závislost pravděpodobností (11) a (12) na parametrech  $t_1$  a  $t_2$  ukazuje obr. 4. Konkrétní použité hodnoty  $t_1 = 0,09$ ,  $t_2 = 0,22$  byly zvoleny tak, aby platila pro praktické využití metody přijatelná rovnost  $P_{h/high} = P_{g/low} = 0,05$ .

Se zřetelem k nenulovým hodnotám směrodatných odchylek  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{h1,2}$  a  $\sigma_{g1,2}$  byly uvedené pravděpodobnosti  $P_{h/high}$  a  $P_{g/low}$  stanoveny s odpovídajícími směrodatnými odchylkami  $\sigma_{h/high}$ ,  $\sigma_{g/low}$  o přibližných definicích

$$\sigma_{h/high} \approx \left| \frac{\partial P_{h/high}}{\partial t_2} \right| \sigma_T, \quad (13)$$

$$\sigma_{g/low} \approx \left| \frac{\partial P_{g/low}}{\partial t_1} \right| \sigma_T, \quad (14)$$

vycházejících ze známého zákona šíření chyb, podrobněji diskutovaného například v práci [18]. Provedená numerická analýza ukázala, že vliv  $\sigma_{h1,2}$  a  $\sigma_{g1,2}$  na  $\sigma_{h/high}$ ,  $\sigma_{g/low}$  je zanedbatelný a proto nebyl v definicích (13) a (14) uvažován. Pro výše stanovené hodnoty  $t_1 = 0,09$ ,  $t_2 = 0,22$  platí rovnosti  $\sigma_{h/high} \approx 0,02$ ,  $\sigma_{g/low} \approx 0,01$ .

Pravděpodobnosti  $P_{h/suspected}$  a  $P_{g/suspected}$  klasifikace zdravého a glaukomového oka do skupiny se středním rizikem nyní splňují vztahy

$$P_{h/suspected} = \int_{t_1}^{t_2} p_h(x) dx, \quad (15)$$

$$P_{g/suspected} = \int_{t_1}^{t_2} p_g(x) dx. \quad (16)$$

Odpovídající standardní směrodatné odchylky  $\sigma_{h/suspected}$  a  $\sigma_{g/suspected}$  pro  $P_{h/suspected}$  a  $P_{g/suspected}$  mohou být spočítány na základě vztahů

$$\sigma_{h/suspected} \approx \sigma_T \left[ \left( \frac{\partial P_{h/suspected}}{\partial t_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial P_{h/suspected}}{\partial t_2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (17)$$

$$\sigma_{g/suspected} \approx \sigma_T \left[ \left( \frac{\partial P_{g/suspected}}{\partial t_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial P_{g/suspected}}{\partial t_2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (18)$$

odvozených ze zákona šíření chyb. V případě uvažovaných rovností  $t_1 = 0,09$  a  $t_2 = 0,22$  byly získány konkrétní hodnoty  $P_{h/suspected} = 0,45$ ,  $\sigma_{h/suspected} \approx 0,04$ ,  $P_{g/suspected} = 0,34$  a  $\sigma_{g/suspected} \approx 0,03$ .

## 4.2 Komplexní diagnostické vyhodnocení charakteristického vektoru s využitím neuronové sítě

### 4.2.1 Model použité neuronové sítě

V obecném případě může být umělá neuronová síť pojímána jako matematický transformační systém s  $N$ -rozměrným vektorem  $\underline{x} = (x_1, \dots, x_N)$  vstupních parametrů a s  $M$ -rozměrným vektorem  $\underline{y} = (y_1, \dots, y_M)$  výstupních parametrů, realizující matematické zobrazení  $N$ -rozměrného reálného euklidovského prostoru do  $M$ -rozměrného reálného euklidovského prostoru, viz například publikace [22–24]. Základním elementem každé neuronové sítě je formální neuron, na jehož vstupy jsou přivedeny výstupní informace z jiných neuronů této sítě nebo z vnějších zdrojů. Každý neuron má pouze jeden výstup, přenášející výslednou informaci z tohoto neuronu do dalších elementů (neuronů) nebo do výstupu neuronové sítě. Všechny neurony jedné sítě jsou zpravidla uspořádány do  $L$  vrstev, přičemž každý neuron v nižší vrstvě je připojen ke každému neuronu ve vrstvě nad ním. Neurony v téže vrstvě nejsou navzájem propojeny. Vstupy neuronů v nejnižší vrstvě (označované obvykle jako první nebo vstupní vrstva) tvoří reálné vstupy neuronové sítě a výstupy neuronů nejvyšší vrstvy (obvykle označené jako

$L$ -tá nebo výstupní vrstva) představují reálné výstupy neuronové sítě. V souladu s pracemi [22-24] může být matematicky formální model  $k$ -tého neuronu v  $i$ -té vrstvě reprezentován rovnicí

$$x_{k,i} = 1 / \left[ 1 + \exp \left( - \sum_{j=1}^{N_{i-1}} w_{i-1,j,k} x_{j,i-1} - \theta_{k,i} \right) \right], \quad (19)$$

kde  $x_{k,i}$  je výstup  $k$ -tého neuronu  $i$ -té vrstvy,  $x_{k,0} = x_k$  představuje  $k$ -tý vstup celé neuronové sítě,  $x_{k,L} = y_k$  tvoří  $k$ -tý výstup celé neuronové sítě,  $w_{i,j,k}$  označuje váhu připojení  $j$ -tého neuronu v  $i$ -té vrstvě s  $k$ -tým neuronem ve vrstvě  $(i+1)$  a  $w_{0,j,k}$  je váha připojení  $j$ -tého vstupu neuronové sítě s  $k$ -tým neuronem v první vrstvě. Dále  $N_i$  označuje počet neuronů v  $i$ -té vrstvě,  $N_0 = N$  udává počet vstupů neuronové sítě (také nazývaný dimenze vstupu),  $N_L = M$  je počet neuronů ve výstupní vrstvě (označovaný jako dimenze výstupu) a  $\theta_{k,i}$  reprezentuje práh  $k$ -tého neuronu  $i$ -té vrstvy. To znamená, že výstupní signál každého neuronu v  $i$ -té vrstvě představuje současně vstup všech neuronů ve vrstvě  $(i+1)$ . Ze vztahu (19) vyplývá, že výstupní hodnota každého neuronu (a tedy i každého výstupu neuronové sítě) leží v intervalu  $(0,1)$ .

Hodnoty již uvedených prahů a vah uvažovaných neuronů v neuronové síti je možné stanovit aplikací vhodného tzv. učebního algoritmu. V následujícím textu je uvažován obvyklý algoritmus zpětného šíření [22-24]. Pro jeho realizaci je třeba sestavit tzv. učební soubor, který obsahuje vhodně vybrané vstupní vektory  $\underline{x}^{(c)} = (x_1^{(c)}, \dots, x_N^{(c)})$ ,  $c = 1, \dots, C$ , neuronové sítě a k nim odpovídající požadované (ideální) výstupy neuronové sítě  $\underline{d}^{(c)} = (d_1^{(c)}, \dots, d_M^{(c)})$ . Zavedený parametr  $C$  udává rozsah (počet prvků) učebního souboru. V souladu s tímto algoritmem jsou hodnoty prahů a vah jednotlivých neuronů iterativně měněny tak, aby minimalizovaly účelně definovanou chybovou funkci neuronové sítě

$$E_{\underline{x}^{(1)}, \underline{x}^{(2)}, \dots, \underline{x}^{(C)}; \underline{d}^{(1)}, \underline{d}^{(2)}, \dots, \underline{d}^{(C)}}(\underline{w}, \underline{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M (y_m^{(c)} - d_m^{(c)})^2, \quad (20)$$

kteřá vystihuje rozdíl mezi reálnými výstupními vektory  $\underline{y}^{(c)} = (y_1^{(c)}, \dots, y_M^{(c)})$  neuronové sítě odpovídající daným vstupním vektorům  $\underline{x}^{(c)}$  a požadovanými (ideálními) výstupními vektory  $\underline{d}^{(c)}$ . Uvedené veličiny  $\underline{w}$  a  $\underline{\theta}$  reprezentují vektory zahrnující všechny váhy a všechny prahy všech neuronů v neuronové síti. V  $l$ -tém kroku uvažovaného učebního procesu jsou postupně hodnoty vah a prahů změněny z aktuálních hodnot  $\underline{w}(l)$ ,  $\underline{\theta}(l)$  na nové hodnoty  $\underline{w}(l+1)$  a  $\underline{\theta}(l+1)$  v souladu se vztahy

$$\underline{w}(l+1) = \underline{w}(l) - \eta_1 \underline{g}_w + \alpha_1 [\underline{w}(l) - \underline{w}(l-1)], \quad (21)$$

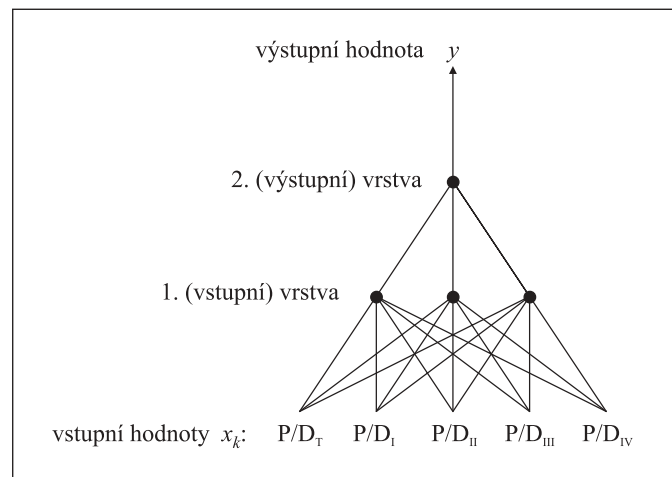
$$\underline{\theta}(l+1) = \underline{\theta}(l) - \eta_2 \underline{g}_\theta + \alpha_2 [\underline{\theta}(l) - \underline{\theta}(l-1)], \quad (22)$$

kde  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  jsou reálné učební parametry, obvykle volené v rozsahu  $(0,1)$ ,  $l = 1, 2, \dots$ . Složky vektorů  $\underline{g}_w$  a  $\underline{g}_\theta$  reprezentují parciální derivace chybové funkce (20) podle vah a prahů jednotlivých neuronů. Hodnoty složek počátečních vektorů  $\underline{w}(0)$ ,  $\underline{\theta}(0)$  a  $\underline{w}(1)$ ,  $\underline{\theta}(1)$  by měly být dostatečně malé, například náhodně zvolené z intervalu  $(-0,3; +0,3)$ . Informaci o průběhu učení podává grafická závislost hodnot chybové funkce (20) na počtu provedených iterací, označovaná jako učební křivka. Učební proces je ukončen, když chybová funkce (20) splňuje vhodné kritérium (obvykle bývá požadováno dosažení dostatečně malých jejích hodnot nebo dostatečně malých jejích změn mezi dvěma po sobě následujícími iteracemi) nebo při dosažení zvoleného počtu iterací. Po ukončení učení může být neuronová síť s hodnotami prahů a vah stanovenými provedeným učebním procesem (a obvykle označovanými jako naučené hodnoty) testována [22-24]. Testování spočívá v aplikaci výrazu (20) na vhodný testovací soubor obsahující vstupní vektory neuronové sítě, které nebyly použity v učebním souboru, a jim odpovídající požadované (ideální) výstupy neuronové sítě. Přitom rozsahy (počty prvků) učebního a testovacího souboru se musí

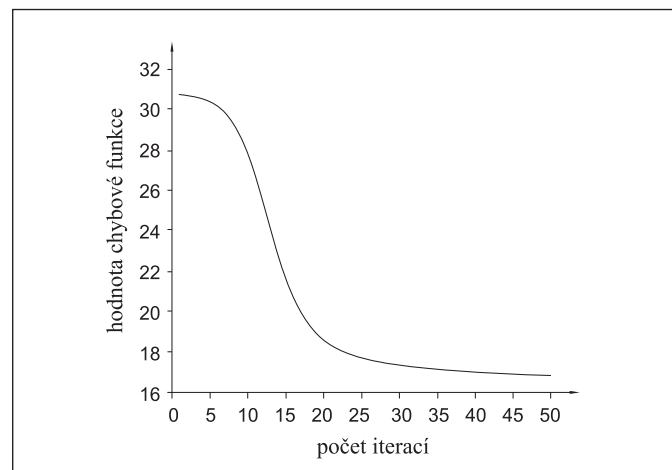
shodovat. Testovaná neuronová síť je akceptována, je-li rozdíl  $\Delta E$  chybových funkcí pro testovací a učební soubor přijatelně malý.

V následujícím textu je uvažována neuronová síť s empiricky stanovenými parametry  $L = 2$ ,  $N = N_0 = 5$ ,  $N_i = 3$ ,  $M = N_L = 1$  a se vstupním vektorem  $\underline{x} = (P/D_T, P/D_I, P/D_{II}, P/D_{III}, P/D_{IV})$ . Její strukturální schéma ukazuje obr. 5. Pro stanovení hodnot prahů a vah byl použit výše popsaný učební algoritmus zpětného šíření. Použitý učební soubor obsahoval 240 vstupních vektorů sestavených z odpovídajících P/D poměrů vybraných 120 zdravých a 120 glaukomových snímků papil s požadovanými (ideálními) výstupy rovnými minimální a maximální možné hodnotě 0 a 1. Při učení bylo realizováno 50 iterací s empiricky stanovenými hodnotami učebních parametrů  $\eta_1 = \eta_2 = 0,1$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,005$ . Závislost chybové funkce (20) na počtu iterací provedeného učebního procesu ukazuje obr. 6. Pro následné testování neuronové sítě byl použit testovací soubor zahrnující 240 vstupních vektorů odpovídajících 120 zdravým a 120 glaukomovým snímkům slepé skvrny, které nebyly použity v učebním souboru. V souladu s učebním souborem byla pro vstupní vektory příslušné snímkům zdravých, respektive glaukomových papil přiřazena nulová, respektive jednotková hodnota výstupu neuronové sítě. Získaný rozdíl  $\Delta E \approx 0,18$  chybových funkcí byl akceptovatelně malý.

Na základě určených nenulových jednotlivých směrodatných odchylek  $\sigma_T, \sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$  a  $\sigma_{IV}$  dílčích vstupních parametrů P/D<sub>T</sub>, P/D<sub>I</sub>, P/D<sub>II</sub>, P/D<sub>III</sub>, P/D<sub>IV</sub> neuronové sítě byla s využitím známého zákona šíření chyb [18] numericky odhadnuta odpovídající střední směrodatná odchylka výstupu neuronové sítě  $\sigma_n \approx 0,02$ .



Obr. 5 Strukturální schéma uvažované neuronové sítě pro diagnostické vyhodnocení pětirozměrného charakteristického vektoru P/D poměrů



Obr. 6 Závislost celkové chybové funkce (20) na počtu iterací provedeného učebního procesu

#### 4.2.2 Diagnostické vyhodnocení výstupu y neuronové sítě

Výše popsaná neuronová síť umožňuje transformovat charakteristický vektor na jediný skalární parametr  $y$ . Jeho statistická rozdělení, získaná aplikací této neuronové sítě na soubor všech uvažovaných 240 snímků zdravých a 240 snímků glaukomových papil, prezentuje ve formě odpovídajících histogramů obr. 7. Oči vyšetřované s využitím neuronové sítě byly v analogii s předešlým diagnostickým vyhodnocením  $P/D_T$  poměru klasifikovány do tří diagnostických rizikových skupin označených jako skupina s nízkým rizikem glaukomu, skupina se středním rizikem glaukomu a skupina s vysokým rizikem glaukomu. Skupina s nízkým rizikem glaukomu zahrnuje oči s odpovídajícím výstupem neuronové sítě menším než  $t_1$ , skupina se středním rizikem obsahuje oči s odpovídajícím výstupem neuronové sítě ležícím v intervalu  $(t_1, t_2)$  a do skupiny s vysokým rizikem glaukomu patří oči s příslušnou výstupní hodnotou neuronové sítě větší než  $t_2$ . Zavedené parametrické hodnoty  $t_1$  a  $t_2$ ,  $0 < t_1 < t_2 < 1$ , představují vhodné rozlišovací meze. Za uvedených předpokladů bude zdravé oko nežádoucně klasifikováno do skupiny s vysokým rizikem glaukomu s pravděpodobností

$$P_{h/high} = 1 - D_h(t_2) \quad (23)$$

a glaukomové oko bude nežádoucně klasifikováno do skupiny s nízkým rizikem glaukomu s pravděpodobností

$$P_{g/low} = D_g(t_1). \quad (24)$$

Výše uvedené funkce  $D_h(t)$  a  $D_g(t)$  jsou experimentálně získané statistické distribuční funkce výstupních hodnot  $y_h$  a  $y_g$  neuronové sítě pro snímky zdravých a glaukomových papil. Pravděpodobnosti  $P_{h/suspected}$  a  $P_{g/suspected}$  klasifikace zdravého a glaukomového oka do skupiny se středním rizikem může být spočítána podle relací

$$P_{h/suspected} = D_h(t_2) - D_h(t_1), \quad (25)$$

$$P_{g/suspected} = D_g(t_2) - D_g(t_1). \quad (26)$$

Pro praktické využití by hodnoty  $P_{h/high}$  a  $P_{g/low}$  měly být nízké, například rovny 0,05. Tento požadavek je splněn při akceptovaných hodnotách  $t_1 = 0,13$ ,  $t_2 = 0,63$ , viz obr. 8. Za těchto předpokladů platí rovnosti  $P_{h/suspected} = 0,45$  a  $P_{g/suspected} = 0,34$ . Se zřetelem k nenulové střední směrodatné odchylce  $\sigma_n$  výstupu neuronové sítě byly uvedené pravděpodobnosti  $P_{h/high}$ ,  $P_{g/low}$ ,  $P_{h/suspected}$ ,  $P_{g/suspected}$  stanoveny s odpovídajícími směrodatnými odchylkami

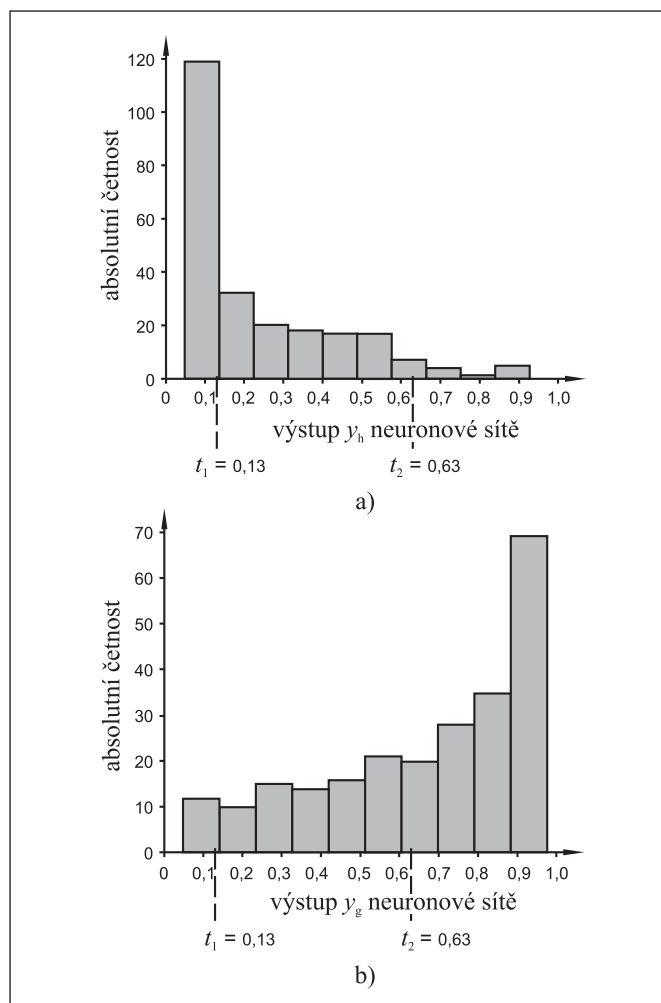
$$\sigma_{h/high} \approx \left| \frac{\partial P_{h/high}}{\partial t_2} \right| \sigma_n, \quad (27)$$

$$\sigma_{g/low} \approx \left| \frac{\partial P_{g/low}}{\partial t_1} \right| \sigma_n, \quad (28)$$

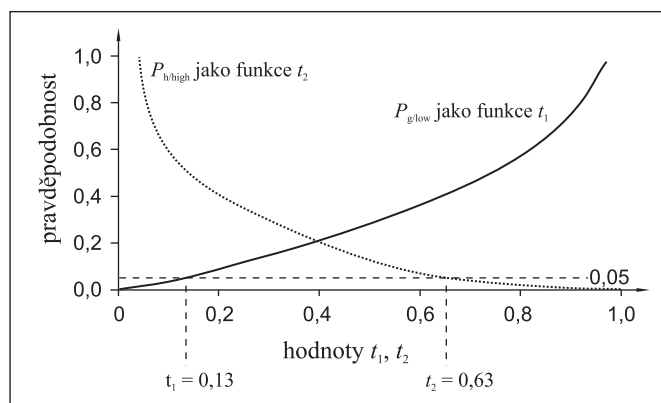
$$\sigma_{h/suspected} \approx \sigma_n \left[ \left( \frac{\partial P_{h/suspected}}{\partial t_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial P_{h/suspected}}{\partial t_2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (29)$$

$$\sigma_{g/suspected} \approx \sigma_n \left[ \left( \frac{\partial P_{g/suspected}}{\partial t_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial P_{g/suspected}}{\partial t_2} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (30)$$

kteří vyplývají se známého a již zmíněného zákona šíření chyb. Pro uvažované rozlišovací hodnoty  $t_1 = 0,13$ ,  $t_2 = 0,63$  byly numerickým výpočtem stanoveny konkrétní hodnoty  $\sigma_{h/high} \approx 0,01$ ,  $\sigma_{g/low} \approx 0,02$ ,  $\sigma_{h/suspected} \approx 0,04$ ,  $\sigma_{g/suspected} \approx 0,02$ .



Obr. 7 Získané histogramy statistického rozdělení výstupů neuronové sítě a)  $y_h$  a b)  $y_g$  v případě snímků zdravých a glaukomových očí



Obr. 8 Grafické závislosti pravděpodobností  $P_{h/high}$  a  $P_{g/low}$  na parametrech  $t_1$  a  $t_2$  s vyznačenými zvolenými hodnotami rozlišovacími mezi  $t_1 = 0,13$ ,  $t_2 = 0,63$  v případě vyhodnocení všech složek charakteristického vektoru s využitím neuronové sítě

#### 4.3 Stanovení míry glaukomového poškození v jednotlivých kvadrantech papily

Stupeň glaukomového poškození papily nemocného oka v jednotlivých jejích kvadrantech může být stanoven srovnáním hodnot  $P/D_s$  poměru,  $s \in \{I, II, III, IV\}$ , s jeho vhodně zvolenými parametrickými hodnotami (kvantily)  $q_{h,s}$  a  $q_{g,s}$ . Požadované parametry  $q_{h,s}$  a  $q_{g,s}$  byly definovány relacemi



$$D_{h,s}(q_{h,s}) = 0,95, \quad (31)$$

$$D_{g,s}(q_{g,s}) = 0,05, \quad (32)$$

kde  $D_{h,s}(P/D_s)$  a  $D_{g,s}(P/D_s)$  jsou experimentální distribuční funkce odpovídajícího  $P/D_s$  poměru, sestavené pro uvažovaný soubor snímků zdravých a glaukomových očí. Konkrétní numerické výpočty vedly k hodnotám uvedeným v tab. 3. Za těchto předpokladů je pravděpodobnost výskytu hodnot  $P/D_s$  glaukomového oka pod hraniční hodnotou  $q_{g,s}$  nebo zdravého oka nad hraniční hodnotou  $q_{h,s}$  menší než 5 %. Proto můžeme v případě oka, u kterého byl například s využitím některé ze dvou předešlých metod diagnostikován glaukom, hodnoty poměru  $P/D_s$  menší než  $q_{g,s}$ , případně větší než  $q_{h,s}$  interpretovat jako žádný nebo velmi malý, případně vysoký stupeň glaukomového poškození odpovídajícího kvadrantu papily. Zbývající hodnoty  $P/D_s$  lze vyhodnotit jako střední stupeň poškození odpovídajícího kvadrantu papily glaukomem. Tato interpretace jednotlivých složek charakteristického vektoru může být přínosem pro případné sledování vzájemné souvislosti glaukomových změn v jednotlivých kvadrantech papily a odpovídajících chorobných změn zorného pole nebo poškození vrstvy nervových vláken v okolní sítnici.

Tab. 3 Hodnoty parametrů  $q_{h,I}$ ,  $q_{h,II}$ ,  $q_{h,III}$ ,  $q_{h,IV}$  a  $q_{g,I}$ ,  $q_{g,II}$ ,  $q_{g,III}$ ,  $q_{g,IV}$ , stanovené v souladu s relacemi (31) a (32)

Kvantil	$q_{h,I}$	$q_{h,II}$	$q_{h,III}$	$q_{h,IV}$	$q_{g,I}$	$q_{g,II}$	$q_{g,III}$	$q_{g,IV}$
Hodnota	0,44	0,26	0,12	0,21	0,15	0,08	0,00	0,02

## 5. ZÁVĚR

Hlavní původní přínos prezentované práce spočívá zejména v návrhu postupu počítačové obrazové analýzy pro objektivní numerickou reprezentaci barevných glaukomových změn uvnitř papily zrakového nervu a metod pro následnou objektivní a automatickou diagnostickou interpretaci získaných dat. V článku popisované postupy staví na analýze barevných digitálních snímků příslušné oblasti očního pozadí, které je možné s výhodou získat pomocí vhodné fundus kamery propojené s počítačem. Jako stěžejní popisný parametr sledovaných projevů glaukomu byl použit tzv. charakteristický vektor ( $P/D_T$ ,  $P/D_I$ ,  $P/D_{II}$ ,  $P/D_{III}$ ,  $P/D_{IV}$ ), vystihující relativní velikost nablednutí jednak v celé papile, jednak v jejích jednotlivých kvadrantech. Všechny provedené úvahy vycházejí z analýzy statistického souboru 480 barevných digitálních snímků papil zdravých očí a očí s glaukomem s otevřeným úhlem.

Diagnostická interpretace charakteristického vektoru je provedena formou klasifikace vyšetřovaných očí do tří skupin s různým rizikem výskytu glaukomu. Definice rizikových skupin vychází jednak ze statistické analýzy analyticky aproximovaných experimentálních hodnot pravděpodobnosti  $p_h$  a  $p_g$  poměru  $P/D_T$ , jednak ze statistického rozboru experimentálních histogramů výstupních hodnot y použité umělé počítačem simulované neuronové sítě, aplikované současně na všechny složky charakteristického vektoru. Pro konkrétní použité hraniční parametry navrhovaných klasifikací lze diagnostikovat oči ze skupiny s nízkým rizikem jako zdravé a oči ve skupině s vysokým rizikem jako nemocné s pravděpodobností mylné diagnózy v obou případech rovné hodnotě 5 %. Pokud vyšetřované oko nelze diagnostikovat s uvedenou přesností, je zařazeno do tzv. suspektní skupiny (skupiny se středním rizikem), do které podle uvedených výsledků spadá v případě obou metod 45 % normálních zdravých a 34 % glaukomových očí. Vzhledem ke skutečnosti, že všechny uvedené odpovídající si klasifikační pravděpodobnosti jsou pro obě uvažované metody shodné, lze obě metody považovat za stejně spolehlivé. Je-li oko diagnostikováno jako glaukomové, je možné podle dalšího navrženého postupu vyhodnotit stupeň poškození jednotlivých

oblastí jeho papily glaukomem na základě srovnání hodnot odpovídajících složek charakteristického vektoru s vhodně stanovenými jejich mezními hodnotami. Dostatečná reprodukovatelnost získaných výsledků, omezená jejich experimentálně stanovenou variabilitou, poskytuje velkou výhodu oproti v praxi běžnému subjektivnímu vyhodnocení glaukomových změn lékařem. Navržené metody tak mohou účinně rozšířit využití v současnosti běžně používaných digitálních fundus kamer bez dalších nákladných investic.

## Literatura

- [1] VESELÝ, L.: Choroby oka. Martin, Osveta 1973.
- [2] ŘEHÁK, S. a kol.: Oční lékařství. Praha, Avicenum 1980.
- [3] NOVER, A.: The Ocular Fundus. Methods of Examination and Typical Findings. Stuttgart, Schattauer 1987.
- [4] NĚSTĚROV, A.: Primární glaukom. Praha, Avicenum 1991.
- [5] SHIELDS, B.: Textbook of Glaucoma. Baltimore, Williams & Wilkins 1992.
- [6] HANUŠ, K. a kol.: Kompendium očního lékařství. Praha, Grada 1997.
- [7] SAUTTER, A. et al: Atlas of the Ocular Fundus. Photographs of Typical Changes in Ocular and Systemic Disease. Munchen, Urban & Schwarzenberg 1997.
- [8] CAPRIOLI, J. et al: Reproducibility of optic disc measurements with computerized analysis of stereoscopic video images. Archives of Ophthalmology, Vol. **104**, 1986, No. 7, pp. 1035 – 1039.
- [9] VARMA, R., SPAETH, G. L.: The par is 2000: A new system for retinal digital image analysis. Ophthalmic Surgery, Vol. **16**, 1988, No. 3, pp. 183–192.
- [10] 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.
- [11] BARTZ-SCHMIDT, K. C. et al: The cumulative normalised rim/disc area ratio curve. Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology, Vol. **234**, 1995, pp. 227–231.
- [12] SHIOIRI, T.: Ophthalmologic Image Processor. U.S. Patent No. 6104828, Washington, U.S. Government 2000.
- [13] PLUHÁČEK, F., POSPÍŠIL, J.: Současné metody počítačové obrazové analýzy sítnice oka se zřetelem k diagnostice glaukomu. Jemná mechanika a optika, roč. **46**, 2001, č. 10, str. 326–334.
- [14] NAGIN, P. – SCHWARTZ, B.: Detection of increased pallor over time. Computerized image analysis in untreated ocular hypertension. Ophthalmology, Vol. **92**, 1985, No. 2, pp. 252 – 261.
- [15] KUBĚNA, T. a kol.: Technika digitální planimetrie terče zrakového nervu. Česká a slovenská oftalmologie, roč. **56**, 2000, č. 3, str. 170–175.
- [16] ŠKRÁŠEK, J., TICHÝ, Z.: Základy aplikované matematiky III. Praha, SNTL 1990.
- [17] NETER, J., WASSERMAN, W., WHITMORE, G. A.: Applied Statistics. Boston, Allyn and Bacon 1993.
- [18] KUBÁČEK, L., KUBÁČKOVÁ, L.: Statistika a metrologie. Olomouc, Nakladatelství UP 2000.
- [19] DAUGMAN, J. G.: Neural image processing strategies applied in real – time pattern recognition. Real – Time Imaging, Vol. **3**, 1997, pp. 157 – 171.
- [20] DAUGMAN, J. G.: Biometric decision landscapes. Technical Report No. TR482, University of Cambridge Computer Laboratory, 1999.
- [21] 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.
- [22] MÜLLER, B., REINHARDT, J., STRICKLAND, M. T.: Neural Networks: An Introduction. Berlin, Springer 1995.
- [23] ŠÍMA, J., NERUDA, R.: Teoretické otázky umělých neuronových sítí. Praha, Matfyzpress 1996.
- [24] HAKL, F., HOLEŇA, M.: Úvod do teorie neuronových sítí. Praha, ČVUT 1998.

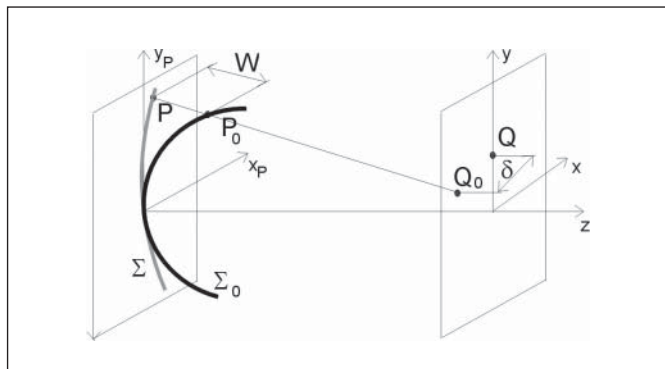
Mgr. František Pluháček, Ph.D., katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého, Tř. 17. listopadu 50, 772 00 Olomouc, tel. 585 634 310; prof. RNDr. Ing. Jaroslav Pospíšil, DrSc., katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého, Tř. 17. listopadu 50, 772 00 Olomouc a Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a FZÚ AV ČR, Tř. 17. listopadu 50a, 772 07 Olomouc, tel. 585 634 283

# Využití Shack-Hartmannova senzoru v očním lékařství

*Shack-Hartmannův senzor nachází významné uplatnění v oblastech analýzy tvaru vlnoplochy – zejména v aktivní a adaptivní optice, kde umožňuje kvantitativní popis vad optického systému. V posledních letech se začal využívat i ke studiu kvality optického systému oka – v aberometrii. Ve článku je zmíněn význam a oblasti využití aberometrie, dále je nastíněno i možné uplatnění adaptivní optiky v očním lékařství.*

## ÚVOD

Podle zákonů paprskové optiky v paraxiálním přiblížení je zobrazení předmětu popsáno Gaussovou zobrazovací rovnicí nebo adekvátně Newtonovou či Guldstrandovou rovnicí. Tyto rovnice se týkají stigmatického zobrazení, které je mimo paraxiální prostor narušeno. Zobrazení totiž více ovlivňují i geometrické a materiálové vlastnosti prostředí, což se projeví zhoršením kvality obrazu bodu. Začínáme mluvit o aberacích optické soustavy. Z hlediska paprskové optiky lze aberace systému vyjádřit dvěma aberačními funkcemi – paprskovou a vlnovou aberací. První popisuje odchylku polohy reálného obrazu  $Q$ , vytvořeného při zobrazení předmětového bodu optickou soustavou, od ideálního obrazu  $Q_0$  – mluvíme o paprskové (geometrické) aberaci  $\delta$ , obr. 1. Druhá reprezentuje odchylku reálné vlnoplochy  $\Sigma$  od ideální vlnoplochy  $\Sigma_0$  ve výstupní pupile systému a označuje se vlnová aberace  $W$ . Mezi paprskovou a vlnovou aberací přitom existuje jednoznačný vztah. Mezi základní vady, které mají i jednoduchou geometrickou interpretaci, patří otvorová (sférická) vada, koma, astigmatismus, zklenutí, zkreslení, defokusace.



Obr. 1 Vlnová aberace  $W$  a paprsková aberace  $\delta$  jsou ve vzájemném vztahu, [2]. Rovina určená souřadnicemi  $x_p, y_p$  představuje výstupní pupilu optického systému

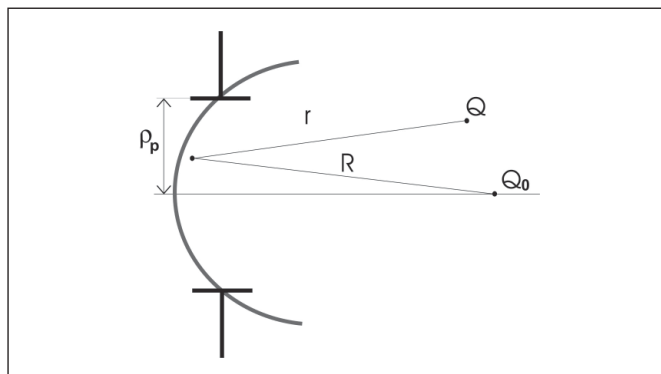
Z hlediska vlnové optiky ovlivňuje kvalitu obrazu dále difrakce světla na objímkách členů optické soustavy. Pojem bodového zobrazení nyní ztrácí smysl. Ideálně je bod zobrazen v difrakční plochu, za přítomnosti aberací se tato plocha deformuje. Komplexní amplituda v bodě pozorování  $Q$  může být podle [1] vyjádřena integrálem

$$U(Q) = \frac{-i}{\lambda R^2} e^{-ikR} \iint P(x_p, y_p) e^{ikr} dx_p dy_p, \quad (1)$$

kde  $P(x_p, y_p)$  je zobecněná pupilová funkce

$$P(x_p, y_p) = P_0(x_p, y_p) e^{ikW(x_p, y_p)}. \quad (2)$$

$P_0(x_p, y_p)$  představuje amplitudovou modulaci (apodizaci) v oblasti výstupní pupily,  $W(x_p, y_p)$  je vlnová aberace,  $x_p, y_p$  jsou souřadnice ve výstupní pupile,  $k = 2\pi/\lambda$  je vlnové číslo,  $\lambda$  vlnová délka,  $r$  je vzdálenost bodu  $Q$  od zvoleného bodu výstupní pupily,  $R$  je vzdálenost osového bodu  $Q_0$  od zvoleného bodu výstupní pupily, obr. 2.



Obr. 2 K výpočtu amplitudy  $U$  v bodě  $Q[x, y, z]$

Aberační funkce  $W(x_p, y_p)$  popisuje odchylky reálné vlnoplochy ve výstupní pupile od referenční. Za referenční vlnoplochu se podle charakteru systému bere kulová vlnoplocha nebo rovinná vlnoplocha. Vzhledem k tomu, že v difrakčním integrálu se v případě kruhové výstupní pupily (jako je tomu i u oka) integruje přes jednotkový kruh, je výhodné zapsat tuto funkci pomocí báze ortogonálních na jednotkovém kruhu. Vhodnou bází tvoří Zernikeho polynomy  $Z_k(x_p, y_p)$ , které lze dokonce ztotožnit s určitými aberacemi. Např. polynom  $Z_3$  popisuje astigmatismus s osou  $\pm 45^\circ$ ,  $Z_4$  defokusaci,  $Z_5$  astigmatismus s osou  $0^\circ$  nebo  $90^\circ$ . Vlnovou aberaci potom můžeme vyjádřit řadou

$$W(x_p, y_p) = \sum_{k=1}^M a_k Z_k(x_p, y_p), \quad (3)$$

kde  $a_k$  jsou tzv. Zernikeho koeficienty, které představují míru jednotlivých aberací,  $M$  je číslo rozvoje.

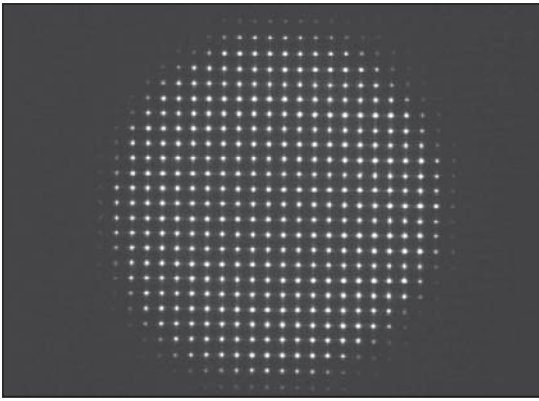
Jednou z oblastí, ve které se s aberační funkcí  $W$  významně pracuje, je adaptivní optika, v oftalmologii potom aberometrie. V obou těchto oblastech našel své místo Shack-Hartmannův senzor.

## SHACK-HARTMANNŮV SENZOR

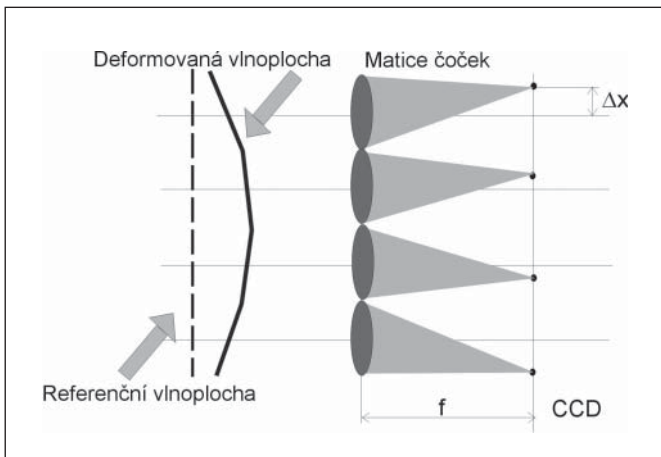
Shack-Hartmannův senzor byl navržen Rolandem Shackem po roce 1970. Umožňuje měřit rozložení fáze v příčné rovině svazku světla, aniž by muselo docházet k interferenci. Navíc je vhodný i pro měření v bílém světle.

Shack-Hartmannův senzor je tvořen maticí identických čoček, v jejichž obrazové ohniskové rovině je umístěn CCD detektor. Principem měření je analýza obrazu bodů formovaných na CCD detektoru, přesněji srovnání reálného obrazu s referenčním, obr. 3. Lokálně lze vlnoplochu dopadající na jednu čočku považovat za rovinnou vlnu, která se zobrazuje v bod  $(x, y)$  v ohniskové rovině. Bereme-li jako referenční rovinnou vlnu, která se zobrazí v ohnisku  $(x, y)$  čočky, můžeme rozložením odchylek  $\Delta x$  a  $\Delta y$ , obr. 4, stanovit lokální směr vlnoplochy,

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \frac{\Delta x}{f}, \quad \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = \frac{\Delta y}{f}, \quad (4)$$



Obr. 3 Referenční obraz Shack-Hartmannova senzoru [8]



Obr. 4 Princip měření vlnové aberace pomocí Shack-Hartmannova senzoru

kde  $\Delta x = x - x_r$ ,  $\Delta y = y - y_r$ ,  $f$  je obrazová ohnisková vzdálenost čočky. Využitím vztahu (3) dostáváme soustavu rovnic

$$\frac{\Delta x}{f} = \sum_{k=1}^M a_k \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial x}, \quad \frac{\Delta y}{f} = \sum_{k=1}^M a_k \frac{\partial Z_k(x, y)}{\partial y}, \quad (5)$$

kterou lze maticově zapsat ve tvaru

$$\Delta = \mathbf{B} \mathbf{A}, \quad (6)$$

kde  $\Delta$  resp.  $\mathbf{A}$  jsou sloupcové vektory reprezentující  $b = 2n \times m$  odchylek bodů ve směru  $x$  a  $y$  resp.  $M$  neznámých koeficientů.  $\mathbf{B}$  je matice  $M \times b$  parciálních derivací Zernikeho polynomů. Výpočtem vektoru  $\mathbf{A}$

$$\mathbf{A} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \Delta, \quad (7)$$

jehož fyzikální význam je míra jednotlivých aberací, lze nakonec stanovit vlnovou aberaci  $W$ .

### SHACK-HARTMANNŮV SENZOR V OČNÍM LÉKAŘSTVÍ

Na lidské oko můžeme pohlížet jako na optický zobrazovací systém, který má navíc schopnost měnit svoji optickou mohutnost. Přitom nedokonalosti oka jsou tak velké, že byly kdysi zhodnoceny Hermannem von Helmholtzem takto: „Kdyby mi chtěl nějaký optik prodat přístroj, který má tolik nedostatků jako lidské oko, domnívám se, že bych byl zcela oprávněn obvinít ho z nedbalosti a vrátit mu přístroj zpět,“ [3].

Základními vadami, které se v oční praxi běžně vyšetřují, jsou v Zernikeho analýze tzv. aberace nižšího řádu - defokusace  $Z_4$  a astigmatismus  $Z_3$  a  $Z_5$ . V posledních letech se v některých oblastech oftalmologie začalo využívat přesnějšího rozboru vlnoplochy. Jedná

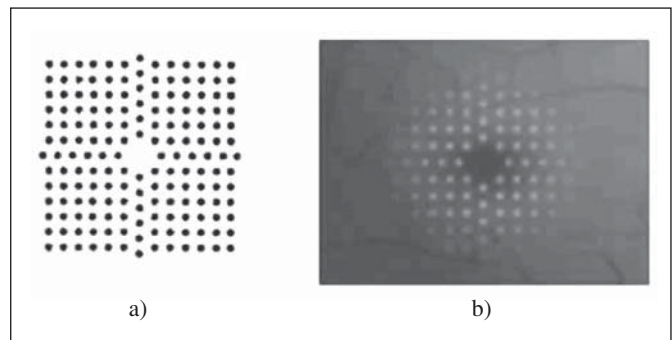
se zejména o oblast refrakční chirurgie rohovky. Dále se zkoumalo množství aberací vyššího řádu u keratokonu, výsledků aberometrie se využívá také v oblasti návrhu speciálních kontaktních čoček.

### ABEROMETRIE

K měření aberačního stavu oka bylo navrženo více metod. Komerčně vyráběné přístroje se nejčastěji opírají o Shack-Hartmannův senzor nebo Tscherningovu aberometrii.

Principem Shack-Hartmannovy aberometrie je vytvořit bodový zdroj na očním pozadí a měřit pak tvar vlnoplochy, vycházející z oka. Do oka je proto směřován úzký svazek, který je systémem oka fokusován na sítnici. Část světla se odráží od sítnice a vytváří tak požadovaný bodový zdroj. Vzhledem k tomu, že ideálně leží sítnice v ohniskové rovině optického systému oka, měla by z oka vycházet rovinná vlnoplocha. Optické aberace ale způsobují její zakřivení, což proměřuje Shack-Hartmannův senzor. Odchytky bodů od jejich referenčních poloh na CCD kameře slouží k výpočtu vlnové aberace oka.

Tscherningova aberometrie je založena na analýze obrazu, který je tvořen na sítnici, obr. 5. Do oka je promítána maska bodů, která je pozorována metodou nepřímé oftalmoskopie. Obdobně jako u Shack-Hartmannovy aberometrie je vyhodnocováno pokřivení této sítě vůči referenčnímu obrazu. Tato metoda sice umožňuje rychlé měření, ale vzhledem k Shack-Hartmannově aberometrii je méně přesná, je potřeba dilatace pupily a má malé rozlišení.



Obr. 5 Tscherningova aberometrie. Do oka je promítána mapa bodů (vlevo), jejichž obraz na sítnici (vpravo) je analyzován [12]

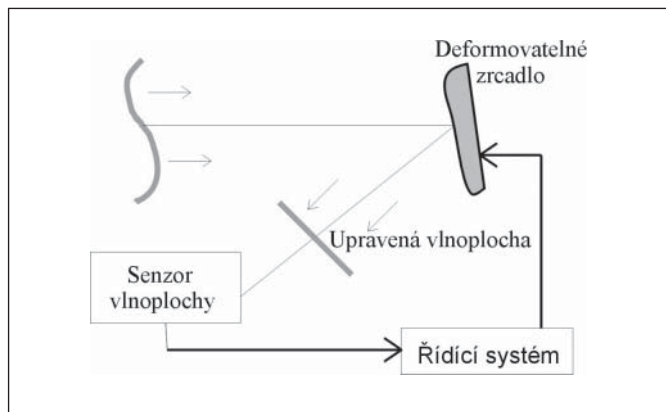
Hlavní uplatnění aberometrie se nachází v refrakční chirurgii - operacích rohovky, jejichž cílem je vytvořit na ploše rohovky aberaci negativní k vadě oka. Tento druh operací se označuje jako wavefront-guided LASIK a k vytvoření požadovaného tvaru rohovky využívá definovaného počtu pulsů excimerového laseru, jejichž počet a umístění závisí na tvaru aberační funkce oka. Podle [4] dnes existují tři firmy, které mají licenci na výrobu zařízení pro provedení refrakční operace. Tato zařízení umožňují korigovat krátkozrakost až do -7 D a astigmatismus do -3D. Pacienti musí být starší 21 let, kontraindikacemi jsou například diabetes, znaky keratokonu, těhotenství nebo autoimunitní onemocnění. Refraktivní operace rohovky nabízejí korekci aberací oka, a to s možností dosáhnout až tzv. supernormálního vidění, tedy výrazného zvýšení zrakové ostrosti. Jsou ale spojeny s rizikem trvalého poškození rohovky, neboť rohovka jako živá biologická tkáň na tento vnější zásah reaguje a z dlouhodobějšího hlediska není zaručen trvalý úspěch. V současné době se proto řeší možnost korekce i vyšších aberací pomocí speciálních kontaktních čoček, které nabízejí neinvazivní zlepšení vidění.

Zdá se, že další uplatnění by Shack-Hartmannův senzor mohl najít i v klinické praxi - v oblastech hodnocení kvality slzného filmu, tvaru keratokonu, případně v diagnostice počínající katarakty. Výzkumem v těchto oblastech se zabývali Larry Thibos a Xin Hong [5].

## ADAPTIVNÍ OPTIKA

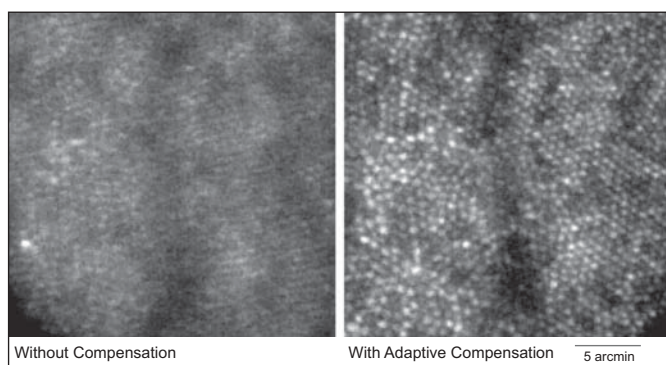
Další oblastí, která je stále spíše v oblasti výzkumu, je vyšetřování a pozorování očního pozadí s využitím principů adaptivní optiky.

Adaptivní optika se zabývá kompenzací náhodných poruch vlnoplochy v reálném čase. Klasický adaptivní optický systém sestává ze tří částí – analyzátoru, korektoru a řídicího systému, obr. 6. Analyzátozem naměřené odchytky vlnoplochy jsou zpracovány řídicím systémem, podle tvaru vlnové aberace je upraven korektor. Tím je dosaženo mnohem lepší rozlišovací schopnosti, neboť jsou částečně kompenzovány aberace.



Obr. 6 Obecné schéma adaptivního systému. Vlnoplocha upravená korektorem je analyzována senzorem a řídicím systémem. Podle potřeby jsou parametry korektoru znovu upraveny

Celková aberace oka není časově stálá, vada oka se navíc mění i s akomodací. Naše vidění to neruší, neboť mozek je schopen menší odchytky kompenzovat. Při pozorování očního pozadí je však obraz narušen, podobně jako je obraz hvězdy narušován fluktuacemi v atmosféře. Zabudování adaptivní korekce proto značně zvyšuje kvalitu sítnicového obrazu, obr. 7. Liang a kol. [6] tak dokázali rozeznat dokonce jednotlivé číčky pro krátkovlnnou, střední vlnovou a dlouhovlnnou oblast. Využili k tomu rovinu 217 čoček Shack-Hartmannova senzoru a deformovatelného zrcadla s 37 ovladatelnými částmi. Podobnými systémy se zabývali Glanc a kol. [7], Roorda a kol. [8] nebo Fernández a kol. [9], kteří navrhovali adaptivní optické systémy pracující na frekvencích 12-70 Hz.



Obr. 7 Obraz sítnice bez a s využitím adaptivní optiky [13]

Dynamiku vlnových aberací oka studoval Hofer a kol. [10]. Jejich výzkum ukázal, že u pupil menších než 4,7 mm lze vhodnou statickou korekcí dosáhnout difrakčně limitovaného zobrazení, zatímco u pupil větších, kterých je třeba k pozorování očního fundu je nutný systém operující na frekvencích 10-40 Hz. Proto by adaptivní korekce mohla najít své místo i v oblasti vyšetřování očního pozadí.

## ZÁVĚR

V posledních letech nachází Shack-Hartmannův senzor své uplatnění i v očním lékařství. Jednou z významných oblastí je aberometrie, kdy velmi přesná znalost aberace oka naměřená tímto senzorem je podkladem pro refraktivní operace rohovky. V oblasti výzkumu zůstává Shack-Hartmannův senzor zabudovaný v adaptivním systému poskytujícím kvalitnější obraz očního pozadí.

## Literatura

- [1] GOODMAN J. W.: Introduction to Fourier Optics, The McGraw-Hill 1996
- [2] HAFERKORN H.: Bewertung optischer Systeme, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1996
- [3] LIANG J., WILLIAMS D. R., MILLER D. T.: Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics, J. Opt. Soc. Am. A (1997), Vol.15, No. 11, 2884-2892
- [4] SCHWIEGERLING J.: Wavefront-guided LASIK, Optics & Photonics News (2004), Vol. 15, No. 2, 26-29
- [5] THIBOS L. N., HONG X.: Clinical applications of the the Shack-Hartmann aberrometer, Optometry and Vision Science (1999), Vol. 76, 817-825
- [6] LIANG J., WILLIAMS D. R.: Aberrations and retinal image quality of the normal human eye, J. Opt. Soc. Am. A (1997), Vol. 14, No. 11, 2873-2883
- [7] GLANC M., GENDRON E.M LACOMBE F.M LAFAILLE D., Le GARGASSON J.- F., LÉNA P.: Towards wide-field retina imaging with adaptive optics, Opt. Comm. (2004), Vol. 230, 225-238
- [8] ROORDA A., ROMERO-BORJA F., DONNELLY III J., QUEENER H., HEBERT TJ., CAMPBELL M. V. W.: Adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy, Optics Express (2002), Vol. 10, No. 9, 405-412
- [9] FERNÁNDEZ E. J., IGLESIAS I., ARTAL P.: Closed-loop adaptive optics in the human eye, Opt. Lett. (2001), Vol. 23, No. 10, 746-748
- [10] HOFER H., ARTAL P., SINGER B., ARAGÓN J. L., WILLIAMS D. R.: Dynamics of the eye's wave aberration, J. Opt. Soc. Am. A (2001), Vol. 18, No. 3, 497-506
- [11] [http://www.opt.uh.edu/research/aroorda/ao\\_res.htm](http://www.opt.uh.edu/research/aroorda/ao_res.htm)
- [12] <http://www.lasikeyecentres.com/Wavefront.aspx>
- [13] [http://cfao.ucolick.org/pubs/presentations/eyedesign/08\\_AO\\_Nathan\\_03.pdf](http://cfao.ucolick.org/pubs/presentations/eyedesign/08_AO_Nathan_03.pdf)

## Profesor Delong osmdesátiletý



29. ledna 2005 oslavil své osmdesátiny prof. Ing. Armin Delong, DrSc. Bezprostředně po skončení války vystudoval brněnskou techniku, kde se ještě jako student pod vedením profesora Aleše Bláhy začal věnovat elektronové mikroskopii. Do povědomí československé vědecké veřejnosti se výrazněji dostal v roce 1958, kdy za stolní prozařovací mikroskop dostal spolu s Ing. Vladimírem Drahošem a Ing. Ladislavem Zobačem zlatou medaili na EXPO

v Bruselu a různé řády a vyznamenání. Od roku 1961 zastával po téměř celých 30 let (pravděpodobně akademický rekord) funkci ředitele Ústavu přístrojové techniky ČSAV. V šedesátých letech se za spoluúčasti Tesly Brno spolu se svými spolupracovníky věnoval vývoji elektronových mikroskopů a difraktografů. K nejdůležitějším projektům konce šedesátých let však patřila dvě unikátní zařízení, a totiž emisní elektronový mikroskop a aparatura pro iontovou implantaci. Obě zařízení přivedla řadu pracovníků k fyzice povrchů a orientovala je na rozvoj analytických metod a jejich přístrojového vybavení, a také na rozvoj ultravakuových technologií. Emisní mikroskop byl pozoruhodný tím, že díky kvalitnímu vakuu u vzorku dovoľoval pozorování difrakčního obrazce pomalých elektronů (LEED) a mikroskopické zobrazení povrchu s kontrastem daným touto difrakcí (LEEM). Publikace překvapující skutečnosti, že velikost difrakčního obrazce je nezávislá na energii difraktujícího svazku, se objevila v prestižním *Nature*. Zařízení pro iontovou implantaci obsahovalo iontový zdroj vlastní konstrukce, hmotnostní separaci pomocí upraveného magnetu pro jadernou magnetickou rezonanci, a ultravakuovou komoru, ve které se nacházel mřížkový systém pro LEED a Augerovu spektroskopii. Také projekt iontové implantace ovlivnil celou generaci fyziků v Brně, a to díky tehdejšímu působení profesora Delonga na Přírodovědecké fakultě MU (v té době UJEP), kde byl do konce roku 1971 tři roky vedoucím katedry fyziky pevných látek. Do ÚPT tak přivedl dosti velkou skupinu tehdy mladých fyziků, kterou někteří starší spolupracovníci žárlivě nazývali „školička“. (Profesuru ale získal až v roce 1978 na VUT v Brně.)

Začátek sedmdesátých let byl silně poznamenán politickým tlakem ke „spolupráci“ s průmyslem. Proto byl v roce 1975 vyroben prototyp ultravakuového rastrovacího elektronového mikroskopu s elektronovou tryskou, využívající studenou autoemisi z wolframového hrotu orientace (310), která vyžadovala tlak  $10^{-8}$  Pa. Tento mikroskop, pod názvem BS350 vyráběný Teslou Brno, dosahoval na svou dobu velmi dobré rozlišení kolem 5 nm. V komoře vzorku se nacházel analyzátor Augerových elektronů, tryska pro iontové čištění vzorku a jako novinka také detektor opatřený monokrystalickým scintilátorem z ytrium-hlinitého granátu. Většina ze zhruba 20 vyrobených kusů nenávratně zmizela v Sovětském svazu. Ve spolupráci s Teslou a pod ještě silnějším politickým tlakem probíhal i vývoj elektronového litografu BS600. V tomto zařízení se uplatnila řada nových a unikátních řešení, jako je použití Schottkyho katody (se zdrojem tvořeným hrotem z wolframového monokrystalu

orientace (100), udržovaným na teplotě kolem 1800 K a pokrytým tenkou vrstvou oxidu zirkonu), formování svazku proměnného obdélníkového průřezu projekcí, rychlý a přesný vychylovací systém. Zároveň bylo třeba vyvinout spolehlivou elektroniku pro litograf s prvními mikroprocesory, odměřovací laserový systém pro manipulator substrátu, zvládnout řadu potřebných technologií, částicovou optiku, a mnoho dalšího. Kritickou částí pak byl počítačový systém pro dodávku expozičních dat, který byl zajišťován sovětskou stranou a který nikdy řádně nefungoval. To byla škoda, neboť ještě nyní litograf spolehlivě pracuje v ÚPT, je řízený běžným osobním počítačem, a používá se k unikátním procesům, zejména k vytváření difraktivních struktur a předloh k nejruznějším hologramům, mimo jiné i pro použití v ochranných prvcích cenin.

Díky spolupráci s TU Clausthal se ve druhé polovině osmdesátých let mohli alespoň někteří pracovníci vrátit k LEEMu. Turbulentní rok 1990 přinesl profesoru Delongovi jak odchod z funkce ředitele, tak i několikaměsíční „povyšení“ do funkce místopředsedy vlády. Změna orientace Akademie přinesla výraznou redukci počtu pracovníků ústavu, a to nejen v dílnách, ale i ve vědeckých odděleních. Rada kolegů skončila na vysokých školách i v průmyslu, někteří i v politice, a velká skupina založila firmu Delong Instruments, která se věnuje výrobě i vývoji vědeckých přístrojů. Do firmy později odešel i profesor Delong, avšak v ústavu si ponechal malý úvazek a členství v oborové radě, a zůstal se svým ústavem ve stálém kontaktu.

Je malým zázrakem, že elektronová mikroskopie v Brně stále prosperuje díky firmám FEI Czech Republic a Tescan, a z Brna je dnes expedováno ročně více mikroskopů než kdy v minulosti. Ke konci svého působení v ÚPT profesor Delong vytvořil prototyp miniaturního nízkovoltového prozařovacího elektronového mikroskopu. Tento přístroj je do té míry novátorský, že se jej doposud podařilo uplatnit jen u hrstky odhodlaných uživatelů, kteří na nich získávají unikátní výsledky. Kromě toho se profesor Delong intenzivně zabývá autoemisními zdroji elektronů. I ve firmě se obklopil skupinkou nadšených mladých spolupracovníků, kteří se nyní jako „školička“ jeví generaci naší. Ústav přístrojové techniky pokračuje ve výzkumu a vývoji vybraných experimentálních metod a přístrojových prvků (například v rastrovací mikroskopii s velmi pomalými elektrony), což je dokumentováno množstvím kvalitních publikací, ale i pravidelnými mezinárodními semináři na Skalském dvoře, na nichž se každý druhý rok schází evropská i mimoevropská elita v oboru elektronové optické přístrojů. Letošní, již devátý seminář, byl profesoru Delongovi k jeho životnímu jubileu věnován. Na semináři byl (budoucí) oslavenec nucen vyslechnout vzpomínky svých postarších bývalých studentů na léta, která se jim jeví jako nesmírně romantická a plná zážitků, a sám přednesl velmi zajímavou přednášku o nejmodernějších typech autoemisních katod.

Profesor Delong je dodnes velmi svěží; denně od ranních hodin, časností pro jiné nedostupných, usedá u pracovního stolu nebo v laboratoři a neúnavně pokračuje ve svém oblíbeném „bádání“. Popřejme mu k tomu ještě mnoho úspěšných let, pevně zdraví, pohodu a dobré lidi kolem.

Bohumila Lencová  
Luděk Frank

# Optimalizace optiky elektronové svářečky

Věnováno prof. Ing. A. Delongovi, DrSc. k jeho osmdesátinám

Článek se zabývá výpočty termoemisní trysky elektronové svářečky s vlásenkovou katodou a optimalizací elektronově optické soustavy svářečky. Popisuje novou metodu výpočtu užitou v programu EOD pro určení vlivu prostorového náboje na emitovaný proud a trajektorie elektronů v elektronové trysce.

## 1. ÚVOD

Elektronová svářečka [1] v Ústavu přístrojové techniky je využívána především pro svařování součástí pro ultravakuumovou techniku. Při užívaném urychlovacím napětí 50 kV je při proudu svazku 20 mA maximální užívaný výkon 1 kW. Cílem tohoto projektu je prozkoumat vliv prostorového náboje (vliv vzájemných odpuzovacích sil mezi nabitými částicemi) v elektronové trysce na výsledný proud a trajektorie elektronů. Na základě výpočtu pak chceme optimalizovat elektronovou trysku (především tvar Wehneltova válce a polohu katody), prozkoumat vliv vad seřízení trysky na svazek a optimalizovat optickou soustavu svářečky. Chceme také elektronovým svazkem provádět mikroobrábění, jako například popisování výrobků, nebo výrobu jemných sít. To předpokládá především další zmenšení průměru svazku a tedy zvýšení proudové hustoty ve svazku. Tím se ale také zvýší vliv prostorového náboje ve svazku.

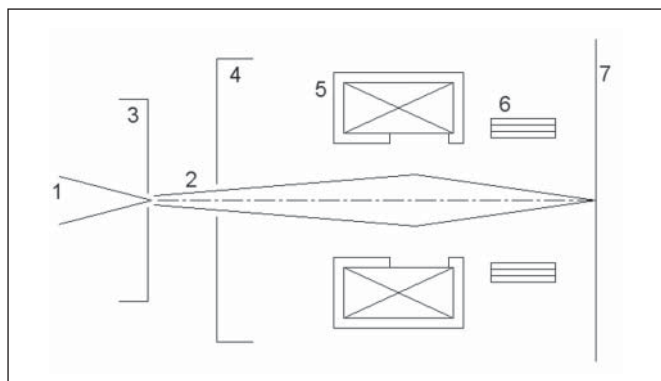
Vývoj numerických metod výpočtů svazků s působením prostorového náboje a výpočtů emise jsme započali teprve před několika málo lety. Díky zvýšení výkonu výpočty provádíme na běžných osobních počítačích. K výpočtům používáme v ÚPT a na VUT program EOD (Electron Optical Design) [2]. Výpočet pole je založen na metodě konečných prvků [3]. Trajektorie testovacích částic jsou určeny z časově náročného několikanásobného trasování [4], při jehož provádění je nutno užít iterační řešení rozložení prostorového náboje. Prostorový náboj má vliv na rozložení potenciálu a tím i na trajektorie částic, které jej vytvářejí. Po každém trasování je proto zpřesňován odhad jeho rozložení. Doba výpočtu poloh trajektorií u svazků s významným vlivem prostorového náboje tak závisí na mnoha faktorech, jako je například počet testovacích částic, požadovaná přesnost výpočtu nebo velikost proudové hustoty v trasovaném svazku. Určení emisního proudu celý výpočet výrazně prodlužuje, neboť se také provádí iteračně, a před každou iterací odhadu proudu je potřeba výpočet pole s prostorovým nábojem opakovat. Výpočty emise jsou časově dosti náročné, na P4-2GHz trvá výpočet zjednodušených testovacích příkladů řádově desítky sekund až minuty, řešení reálné trysky však může trvat i desítky hodin. Program EOD, který užíváme, je průběžně upravován a podle potřeb simulace jsou do něj dodávány další moduly. Navrhované algoritmy výpočtu emisního proudu jsou stále ve vývoji a probíhá jejich testování.

## 2. OPTICKÁ SOUSTAVA SVÁŘEČKY

Schéma optické soustavy svářečky je na obr. 1. Z přímo žhavené wolframové vlásenkové katody na potenciálu -50 kV (1) je emitován elektronový svazek (2). Potenciálem na řídicí elektrodě, Wehneltově válci (3), se určuje velikost emitující oblasti katody a tím i proud elektronového svazku.

Tvar katody, Wehneltova válce a jejich vzájemná poloha mají zásadní vliv na vlastnosti svazku. Svazek je dále urychlován k anodě (4), která je na zemním potenciálu 0 V, stejně jako zbývající část aparatury. Za anodou je pak fokusován do místa svaru magnetickou čočkou (5), prochází vychylovacími cívkami (6) a dopadá na

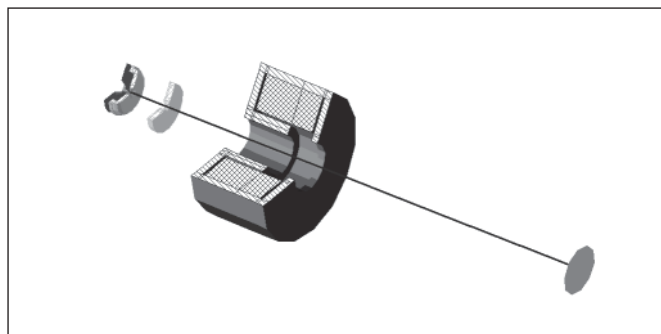
opracovanou součást (7). Mezi anodou a fokusační čočkou prochází svazek centrovacími cívkami, jimiž mohou být korigovány nepřesnosti v mechanickém seřízení trysky.



Obr. 1. Schéma optické soustavy elektronové svářečky: 1) vlásenková katoda, 2) emitovaný elektronový svazek, 3) řídicí elektroda (Wehneltův válec), 4) anoda, 5) fokusační magnetická čočka, 6) vychylovací cívkami, 7) svařovaná součást

## 3. SIMULACE V PROGRAMU EOD

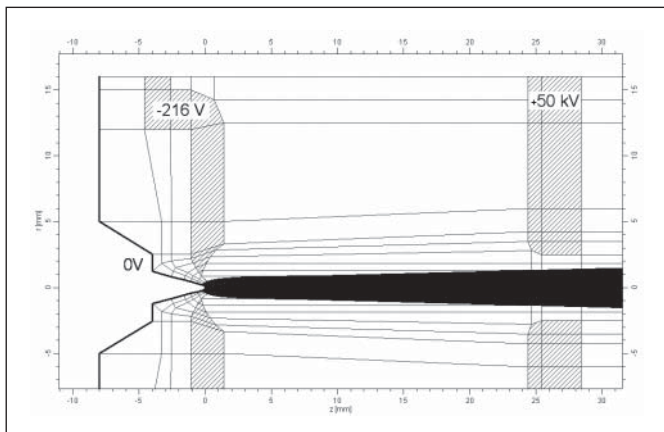
Program EOD umožňuje nejen výpočty svazků s vysokým vlivem prostorového náboje a určování emisního proudu, ale také výpočty s magnetických čoček a deflektorů, včetně nelineárních vlastností magnetických materiálů. Celá optická soustava tak může být simulována jako jeden celek a může být sledován vliv vybraných parametrů na kvalitu svazku. Výpočty emise jsou však vzhledem ke své časové náročnosti a požadavkům na vysokou přesnost výpočtu pole prováděny na modelu detailu katody, který zahrnuje také ještě část Wehneltova válce. Anoda je zde pak nahrazena vhodně zvolenou ekvipotenciálou.



Obr. 2 Zjednodušená optická soustava elektronové svářečky při výpočtu v EOD

#### 4. ELEKTRONOVÁ TRYSKA

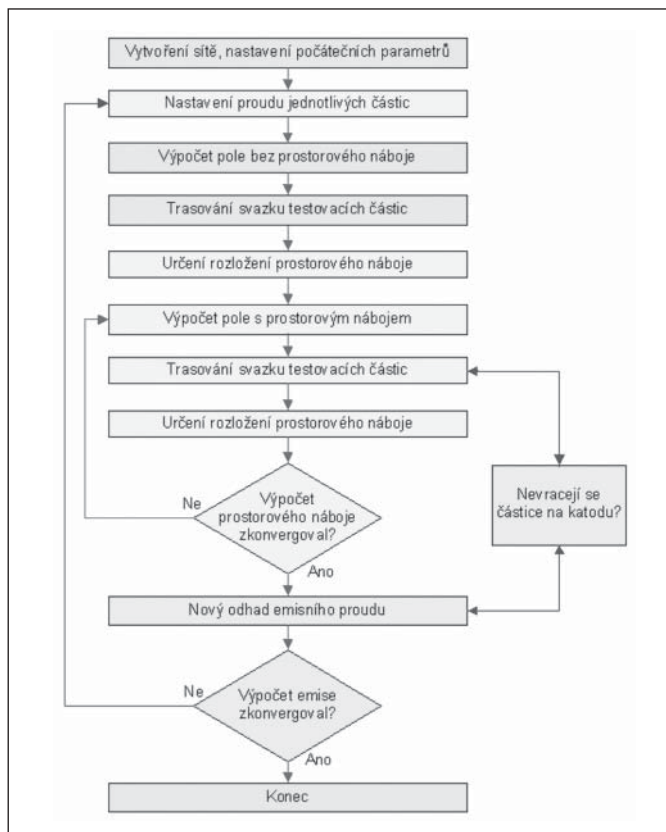
Z katody jsou vlivem extrakčního napětí odsávány elektrony. Velikost proudu je dána teplotou katody, která určuje emisní proudovou hustotu, a omezena vlivem prostorového náboje, který snižuje intenzitu pole na katodě. V EOD je tryska simulována jako 2D rotačně symetrický problém. Katoda je nahrazena komolým kuzelem s kulovým vrchlíkem. Ukázka emisní oblasti s částí Wehneltova válce je na obr. 3. V simulacích obvykle nastavujeme potenciál katody na 0 V a anody na 50 kV, protože chceme, aby kinetické energie elektronů odpovídaly jejich potenciální energii.



Obr. 3 Simulace elektronové trysky, katoda vytvořena z hranice sítě

#### 5. VÝPOČET EMISE

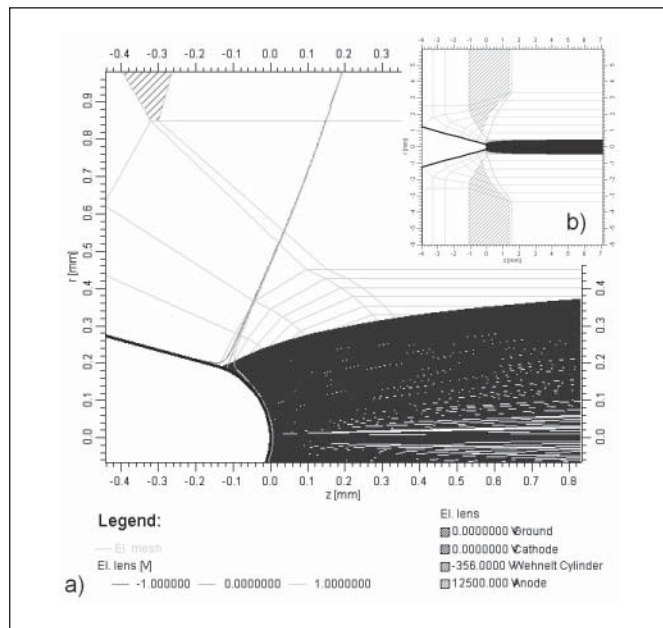
Algoritmus výpočtu emise se skládá z několika kroků (viz obr. 4). Nejprve je vypočteno rozložení potenciálu bez vlivu prostorového náboje. Je nastaven počáteční proud testovacích částic a částice jsou trasovány.



Obr. 4 Schéma výpočtu emise

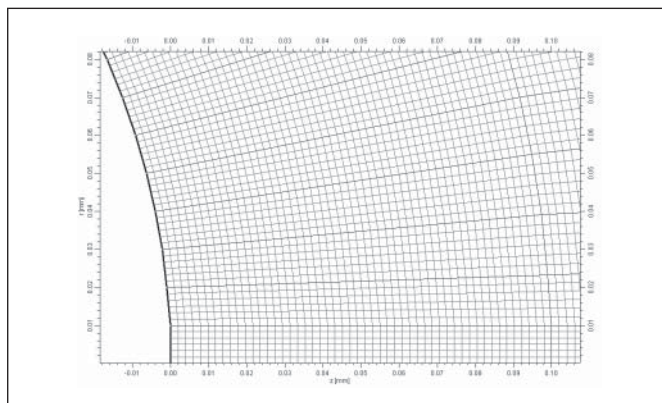
Rozložení prostorového náboje se určuje z poloh trajektorií testovacích částic, z jejich energie a proudu. Částice jsou však prostorovým nábojem ovlivňovány, a proto je výpočet potřeba provést iterativně. Po určení rozložení prostorového náboje je z intenzity pole poblíž katody odhadnut nový proud částic tak, aby byl proud elektronů opouštějících katodu maximální. Celý postup se poté opakuje až do ustálení odhadovaného proudu. Během trasování je potřeba kontrolovat, zda se testovací částice nevracejí na katodu. Pokud se elektrony vrací, byl odhad proudu příliš vysoký. K návratu trajektorií většinou dochází až po několika iteracích výpočtu prostorového náboje.

Pro ilustraci uvádíme výsledky simulace stávající trysky. Obr. 5. znázorňuje detail trysky v blízkosti katody. Při napětí -356 V na Wehneltově válci byl experimentálně naměřen proud 10 mA, výpočtem pak určen proud 12 mA, a to můžeme považovat za velmi dobrý souhlas.



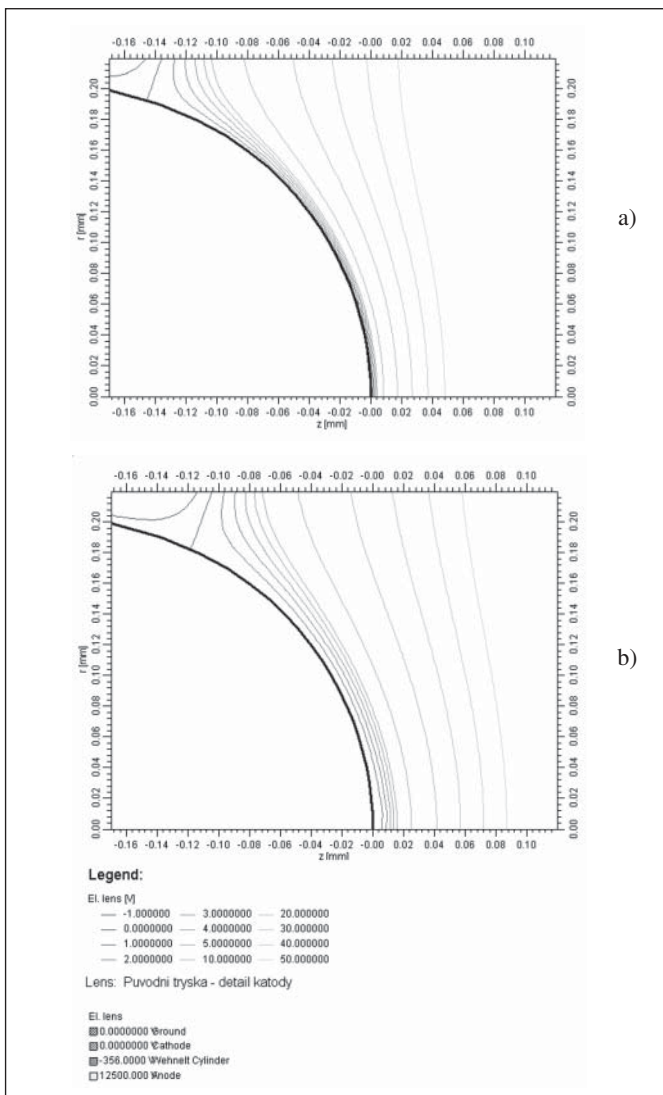
Obr. 5 Výpočet emisního proudu. a) detail povrchu katody se znázorněnými trajektoriemi elektronů při výkonu svářečky cca 500 W (proud elektronů je 10 mA), b) celý model katody, na kterém je emise počítána

Při výpočtu emise limitované prostorovým nábojem velmi záleží, vzhledem k nízkým energiím elektronů v těsné blízkosti katody, na přesnosti výpočtu pole a rozložení prostorového náboje. Na obr. 6 je znázorněn detail jemné sítě použité při výpočtu. Povrch katody je vytvořen z levé hranice sítě a jeho tvar je aproximován mnoha přímými úseky.



Obr. 6 Detail sítě v blízkosti katody

Na obr. 7a) jsou pak znázorněny ekvipotenciály v blízkosti katody v případě výpočtu bez prostorového náboje, na obr. 7b) pak po určení emisního proudu. Je vidět, že vlivem prostorového náboje došlo ke změně polohy nulové ekvipotenciály a tím ke zmenšení emitující oblasti. Některé trajektorie na okraji svazku jsou tedy odstraněny až během výpočtu.



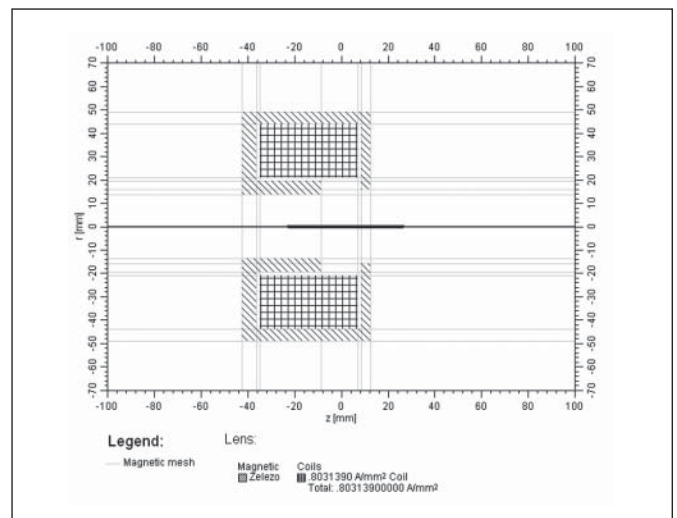
Obr. 7 Vliv prostorového náboje – detail katody: a) ekvipotenciály v blízkosti hrotu – pole bez prostorového náboje, b) pole s prostorovým nábojem

## 6. OPTIMALIZACE MAGNETICKÉ ČOČKY

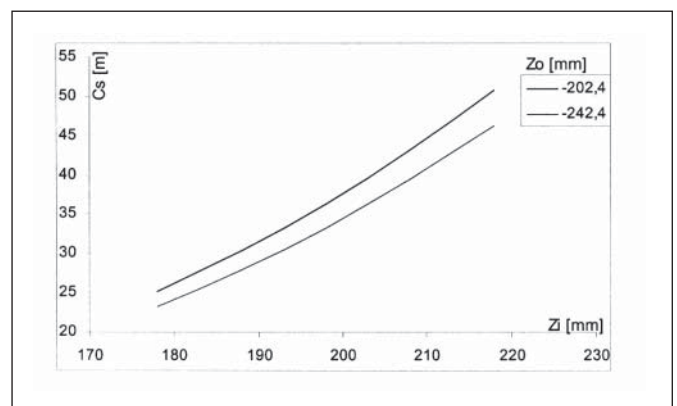
Původní čočka (obr. 8) byla navržena pro velký rozsah pracovních vzdáleností při svařování. Pro mikroobrábění bude potřeba čočku přepočítat a upravit pro jiný rozsah pracovních vzdáleností, aby bylo dosaženo menších optických vad. Obr. 9 ukazuje závislost koeficientu sférické vady Cs v závislosti na poloze obrazu v komoře svářečky ( $z = 200$  je střed komory) pro předměty ve vzdálenostech  $-202,4$  mm a  $-242,4$  mm, což odpovídá odhadovaným polohám křižků pro minimální a maximální výkon svářečky.

Ing. Pavel Jánský, e-mail: jansky@isibrno.cz, doc. RNDr. Bohumila Lencová, CSc. e-mail: bohunka@isibrno.cz, Ústav přístrojové techniky AV ČR, Královopolská 147, 612 64 Brno, www.isibrno.cz, tel.: 541 514 294

Ing. Jakub Zlámal, e-mail: zlamal@fme.vutbr.cz, Ústav fyzikálního inženýrství, FSI VUT v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, physics.fme.vutbr.cz, tel.: 541 142 832



Obr. 8 Magnetická fokusační čočka



Obr. 9 Závislost sférické vady magnetické fokusační čočky na poloze obrazu ( $Z_i = 200$  mm odpovídá středu komory) pro dvě polohy

## 7. ZÁVĚR

Bylo započato s optimalizací optické soustavy elektronové svářečky. Byly navrženy a testovány nové algoritmy výpočtu emise, potřebné pro určení vlastností termoemisních elektronových trysek a proudových profilů elektronových svazků.

Problematika je řešena v rámci grantu programu podpory cíleného výzkumu AV ČR pod č. S2065015 (řešitel J. Dupák).

## Literatura

- [1] Dupák, J., Vlček, I., Zobač, M.: Electron gun for computer-controlled welding of small components. Vacuum 62, 159-164, 2001.
- [2] Lencová, B., Zlámal, J.: New CAD program for the design in electron optics Proc. EUREM 2000, Brno, Vol. I, 101-102.
- [3] Lencová, B. and Wisselink, G.: Program packages ELD, version 3.70. User manuals, Brno, April 2002.
- [4] Jánský, P., Lencová, B., Zlámal, J.: Calculations of Intensive Electron Source, Proc. MC 2003 Dresden, 22-23.



# Výpočet aberačních koeficientů regresí a jejich využití při výpočtu proudové hustoty svazků

Věnováno prof. Ing. A. Delongovi, DrSc. k jeho osmdesátinám.

Článek popisuje postup výpočtu aberačních koeficientů regresí. Podmínkou k výpočtu je dostupnost analytického vyjádření optických vad, které se využívá nejen při samotné regresí, ale i následně pro rychlý výpočet poloh částic za optickým systémem, například pro získání profilů svazků. Metoda je ilustrována na výpočtu proudové hustoty ve vychýleném svazku iontů.

## 1 ÚVOD

V částicové optice se charakterizují vady zobrazení podobně, jako ve světelné optice. Posuzují se jako odchylky trajektorií (paprsků) od ideálního gaussovského (paraxiálního) zobrazení. Pokud značíme spodním indexem  $o$  veličiny v předmětové rovině, čárkami směrnice, můžeme paraxiální zobrazení do roviny  $z$  popsat vztahem:

$$\begin{pmatrix} x(z) \\ x'(z) \end{pmatrix} = \mathbf{T} \begin{pmatrix} x_o \\ x'_o \end{pmatrix}, \quad (1)$$

kde  $x$  značí výchylku kolmo na optickou osu,  $\mathbf{T}$  je přenosová matice soustavy.

Také v částicové optice rozlišujeme vady geometrické (např. sférickou) a chromatické. Odchylky od paraxiální polohy částice za čočkou je možné popsat algebraickými výrazy, v nichž vystupují souřadnice, směrnice a energie částice před čočkou v rovině  $z = z_o$ . Koeficienty, které vystupují v těchto výrazech, jsou *aberační koeficienty*. U magnetických čoček dochází k natočení obrazu a některé mohou být i anizotropní, proto je vhodné pro jejich popis použít komplexní čísla. Polohu částice v předmětu charakterizujeme komplexní souřadnicí v předmětové rovině  $\beta_o = x_o + iy_o$  a její směrnici  $\alpha_o = x'_o + iy'_o$ . Pro rotačně souměrné čočky je komplexní souřadnice  $w(z) = x(z) + iy(z)$ ,  $\bar{w}(z) = x(z) - iy(z)$  v rovině  $z$  za čočkou i se započtením paraxiálních členů vyjádřena takto [1-5]:

$$w(z)e^{-i\Theta} = S\alpha_o^2\bar{\alpha}_o + K_L\alpha_o\beta_o\bar{\alpha}_o + \frac{1}{2}K_L\alpha_o^2\bar{\beta}_o + F\alpha_o\beta_o\bar{\beta}_o + A\beta_o^2\bar{\alpha}_o + D\beta_o^2\bar{\beta}_o + (X\alpha_o + T\beta_o)\Delta E / E_0 \quad (2)$$

Zde je  $\Delta E$  odchylka energie dané částice od střední energie svazku  $E_0$  před čočkou. Veličiny  $T11$  a  $T12$  jsou prvky přenosové matice a popisují paraxiální zobrazení. Aberační koeficienty jsou: koeficient sférické vady ( $S$ ), délky a poloměru komy ( $K_L$ ,  $K_R$ ), zklenutí pole ( $F$ ), astigmatismu ( $A$ ), distorze ( $D$ ), osové chromatické vady ( $X$ ) a chromatické vady zvětšení ( $T$ ). Faktorem  $e^{-i\Theta}$  je zohledněno natočení obrazu v magnetických čočkách (u elektrostatických je  $\Theta = 0$ ). Pro optické prvky bez rotační symetrie (deflektory, jiné vícepólové systémy) platí podobné vztahy. Kromě počátečních poloh v nich navíc vystupují další parametry těchto prvků, jako je např. napětí na vychylovacích deskách nebo proud tekoucí vychylovacími cívkami. V případě rotačně invariantních vychylovacích systémů, dovolujících plynule měnit zvolenou orientaci vychylovacího pole vhodným rozložením napětí nebo proudů na elektrostatickém nebo magnetickém deflektoru, mají koeficienty vad vychýlení stejnou strukturu jako mimosové vady čočky.

Uvedený vztah je platný jak pro elektrostatické, tak pro magnetické čočky. Oba případy se liší tím, že elektrostatické čočky jsou popsány ryze reálnými koeficienty (což představuje celkem devět reálných parametrů), zatímco magnetické čočky mají koeficienty  $K_L$ ,  $A$ ,  $D$ ,  $T$  komplexní (13 nezávislých parametrů a úhel  $\Theta$ ). Reálné a imaginární části koeficientů přísluší izotropním a anizotropním vadám.

Aberační koeficienty se standardně počítají ze známého rozložení pole na optické ose vyhodnocením aberačních integrálů (např. programy Eprop, Prop [6]). Pokud máme k dispozici skutečné trajektorie (polohy) částic (zjištěné např. výpočtem - trasováním), pak je možné z nich určit aberační koeficienty i bez vyhodnocování aberačních integrálů. To je vhodné zejména u velmi obecných systémů, pro které jsou aberační integrály velmi složité nebo dokonce dosud nebyly pro velkou náročnost postupu odvozeny. Z poloh několika částic v dané rovině lze pak aberační koeficienty určit regresí (fitováním).

## 2 VÝPOČET ABERAČNÍCH KOEFICIENTŮ REGRESÍ

Výpočet regresí je možné rozdělit do těchto kroků:

- Vypočteme pole čočky pomocí vhodného programu, např. ELD, MLD [4].
- Stanovíme vhodný soubor počátečních souřadnic, směrnice a energií (celkem  $N$  počátečních podmínek).
- Provedeme trasování, tím získáme souřadnice  $w_n(z)$  za čočkou.
- Provedeme regresí minimalizací součtu čtverců odchylek

$$S = \sum_{n=1}^N \left| w_n(z) - e^{i\Theta} \sum_{k=1}^K c_k f_{kn} \right|^2, \quad (3)$$

kde  $c_k$  jsou jednotlivé aberační koeficienty a  $f_{kn}$  jsou odpovídající členy s  $\alpha_o$ ,  $\beta_o$  a  $\Delta E/E_0$ .

Z podmínky nulovosti derivací  $\partial S / \partial c_k = 0$  a  $\partial S / \partial \Theta = 0$  lze odvodit soustavu tzv. normálních rovnic, z nichž má  $m$ -tá tvar:

$$\sum_{k=1}^K c_k \sum_{n=1}^N \Re \{ f_{kn} \bar{f}_{mn} \} = \sum_{n=1}^N \Re \{ f_{mn} \bar{w}_n(z) e^{-i\Theta} \} \quad (4)$$

a podmínka pro úhel  $\Theta$  vede na:

$$e^{i\Theta} = \frac{\sum_n w_n(z) \sum_k c_k f_{kn}}{\sum_n \left( \sum_k c_k f_{kn} \right)^2} \quad (5)$$

Pro elektrostatické čočky je  $\Theta = 0$  a řešíme tedy pouze soustavu (4). Pro magnetické čočky představují rovnice (4) a (5) self-konzistentní systém, který je možné řešit metodou postupných aproximací. Jako první odhad úhlu, který se použije v první iteraci metody, je aritmetický průměr natočení všech  $N$  trajektorií.

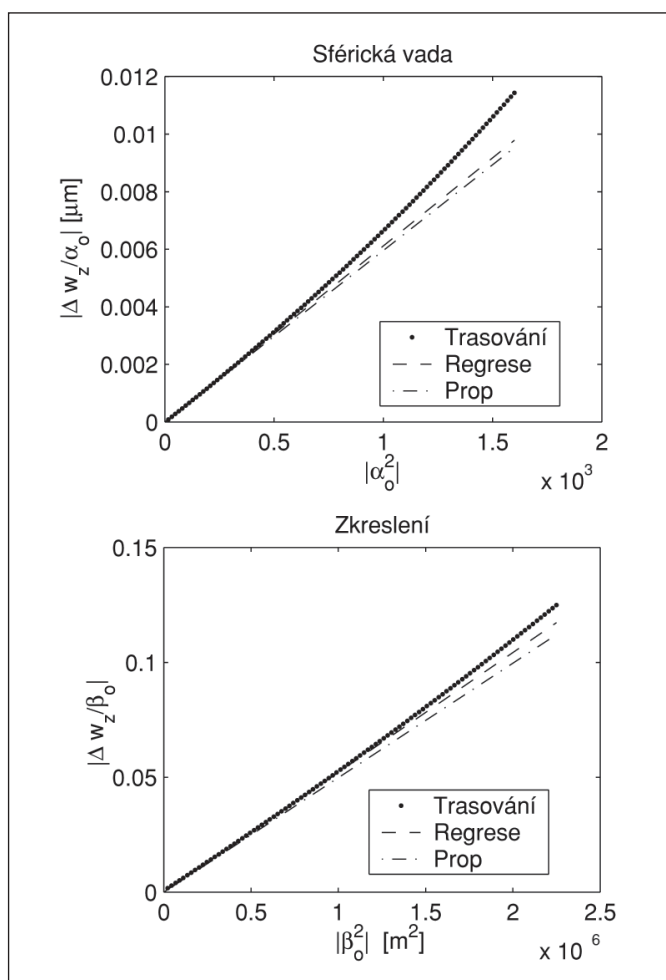
Po získání aberačních koeficientů je možné vztah (2) použít k vyčíslení polohy částice za optickým systémem pro libovolné počáteční podmínky. Je nutné ovšem vzít do úvahy omezený rozsah platnosti vztahu (2) - ten zahrnuje pouze geometrické vady třetího řádu a chromatické vady prvního řádu. Vztah (2) je tedy možné použít tam, kde je nutná velká rychlost výpočtu trajektorií, např. při simulacích proudových hustot částicových sond, které lze stanovit z trajektorií řádově miliard částic.

Při regresi jsou počáteční podmínky voleny tak, že pro každou z veličin je vhodně vybráno jen několik hodnot a jejich vzájemnou kombinací pro každou veličinu s každou je pak dán soubor  $N$  počátečních podmínek. Tak například, pokud je zvoleno 5 hodnot pro každou veličinu, pak  $N = 3125$  částic.

Výpočet trajektorií je prováděn pomocí programu Trasys [5], fitování je implementováno v jazyce Matlab.

### 3 ROZSAH PLATNOST A PŘESNOST VÝRAZŮ PRO VADY

Rozsah platnosti vztahu (2) (geometrické vady 3. řádu, chromatické vady 1. řádu) je dán především rozsahem hodnot poloh, směrnic a energií, které do vztahu dosazujeme. Také vlastním výpočtem aberačních koeficientů regresi je nutné ověřit, zdali se tyto trajektorie nacházejí v prostoru v okolí optické osy, kde je ještě v dobré platnosti aproximace (2). Pokud do rovnice (2) dosadíme  $\Delta E = 0$  a  $\beta_0 = 0$ , pak můžeme z vypočtených trajektorií vynést závislost  $\Delta w/\alpha_0$  na  $\alpha_0^2$  pro vadu  $\Delta w$ . Směrnicí této závislosti je koeficient sférické vady a pro hodnoty  $\alpha_0$ , kde je tato závislost lineární, je vztah (2) dostatečně přesný. Podobné ověření lze provést vnesením při  $\Delta E = 0$  a  $\alpha_0 = 0$ . Obr. 1 znázorňuje uvedené závislosti pro jistou testovací magnetickou čočku [6].



Obr. 1 Znázornění sférické vady a distorze pro testovací magnetickou čočku

### 4 VÝPOČET PROUDOVÉ HUSTOTY SVAZKŮ ČÁSTIC

Zobrazení v rastrovacím mikroskopu a činnost různých zařízení, ve kterých se využívá fokusovaného svazku částic (např. s využitím iontů pro obrábění masek integrovaných obvodů, analyzátorů), ovlivňuje tvar svazku (částicové sondy) a rozložení proudu

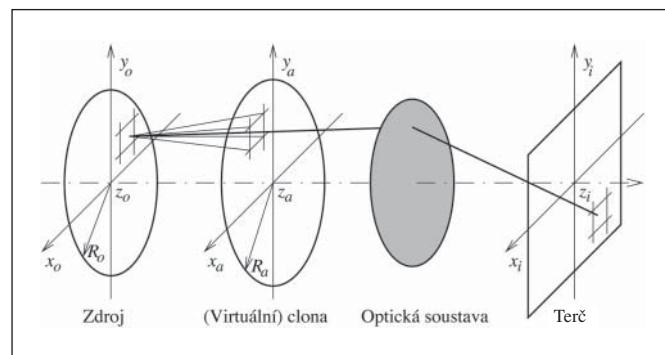
v něm. Veličina, která toto rozložení vystihuje, je proudová hustota. Protože úhel, který svírají částice s optickou osou, jsou obvykle velmi malé (do desítek miliradiánů), stačí sledovat její velikost  $j(x, y)$ .

Byl proto vyvinut program, který simuluje vznik částicové sondy tak, jak k tomu dochází ve skutečnosti, tj. „střílením“ částic ze zdroje s danými parametry přes konkrétní optickou soustavu. Na obr. 4 je schéma simulace. (Obrázek 4 je vytištěn barevně na třetí straně obálky.)

Zdroj částic je charakterizován svým rozdělením, tedy veličinou, která vyjadřuje četnost zastoupení emitovaných částic v daném směru s danou energií a počáteční polohou (místem, odkud částice opustí zdroj). V simulaci je zdroj představován rovinou, ze které jsou testovací částice (ty, ze kterých je pak stanovena proudová hustota) startovány s počátečními polohami, směrnicemi a energiemi odpovídajícími rozdělení, které bychom ve skutečném zařízení v této rovině zjistili. Program tedy nezahrnuje procesy probíhající při emisi částic. Skutečný zdroj je zde nahrazen rovinou s daným rozdělením. Algoritmus programu umožňuje obecně použít jakékoliv rozdělení, v simulacích bylo vyzkoušeno rozdělení Gaussovo, a to jako rozdělení v souřadnicích a energii. Pro rozdělení ve směrnicích bylo použito rovnoměrné rozdělení v určitém intervalu směrnic ve směrech  $x$  a  $y$ . Celkové rozdělení zdroje je uvažováno jako separované ve tvaru

$$g(E, x_0, y_0, x'_0, y'_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_E} \exp\left(-\frac{\Delta E^2}{2\sigma_E^2}\right) \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_{xy}^2} \exp\left(-\frac{x_0^2 + y_0^2}{2\sigma_{xy}^2}\right) \cdot \frac{(z_a - z_0)^2}{\pi R_a^2}, \quad (6)$$

kde  $\Delta E$  je odchylka energie částice od střední energie svazku,  $\sigma_E$  je směrodatná odchylka energiového rozdělení,  $\sigma_{xy}$  je směrodatná odchylka rozdělení v souřadnicích,  $z_0$  a  $z_a$  jsou polohy rovin zdroje a apertury a  $R_a$  je průměr virtuální apertury, který určuje rozsah směrů, do kterých zdroj rovnoměrně emituje částice (obr. 2).



Obr. 2 K výpočtu proudové hustoty

Rovnoměrné rozdělení úhlů je vymezeno aperturou, která může být jen virtuální, tzn. že její funkce je pouze modelová. Optický systém je popsán koeficienty, popisujícími paraxiální chování a vliv optických vad. Výpočet jejich hodnot lze provést uvedeným postupem - regresi. Z vypočtených poloh testovacích částic na vzorku (terči) v dané rovině je pak vyhodnocena proudová hustota. Právě při výpočtu poloh částic na terči je využito velké rychlosti vyplývající z použití analytického vztahu (1).

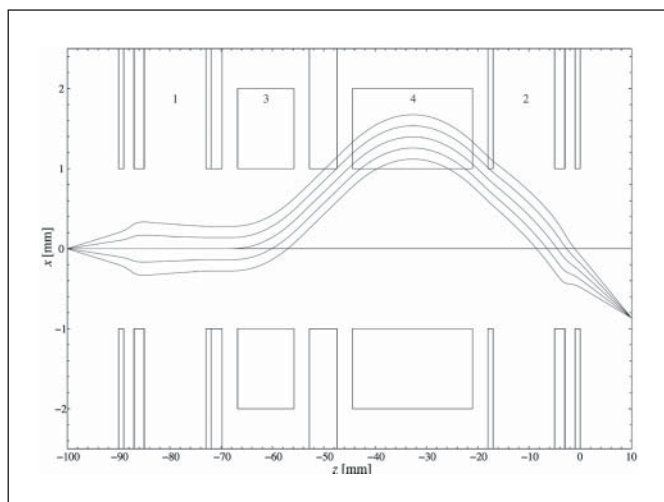
Rovina představující zdroj, virtuální apertura a terč jsou rozděleny na dostatečně malé čtverce. Také vybraný rozsah energií je rozdělen na podintervaly; jejich délky jsou zvoleny podle zastoupení hodnot energií, které je obsaženo v celkovém energiovém spektru zdroje. Střední energie každého podintervalu určuje počáteční energii testovacích částic, střed každého čtverce na zdroji určuje jejich počáteční polohu a spojnice středů čtverců na zdroji se středy čtverců v apertuře určují směrnice. Zkombinováním všech podintervalů a čtverců dostáváme obvykle velké množství částic,

z jejichž četnosti na terči se pak stanoví průměrná proudová hustota v každém čtverci terče. Pokud jsou tyto čtverce dostatečně malé, pak mají průměrné hodnoty blízko ke skutečným lokálním hodnotám proudové hustoty. Intervaly energií, plochy čtverců a výšky v prostorovém úhlu (na obr. 4 naznačeny podlouhlým jehlanem) určují také váhu, kterou se daná částice podílí na celkovém proudu svazku - po vynásobení funkcí hustoty vyčíslené v příslušných hodnotách energie, polohy a směrnice.

Je třeba ovšem podotknout, že tento způsob výpočtu dosud nezahrnuje vlnové vlastnosti částic, takže je omezen prakticky na iontové svazky, u kterým jsou difrakční jevy zanedbatelné v důsledku velkého poměru hmotnosti a náboje iontů.

## 5 DALŠÍ CHARAKTERISTIKY SVAZKU

Program kromě výpočtu profilů poskytuje ještě polohu středu („těžiště“) svazku a další charakteristiky profilu svazku. Data proudové hustoty lze dále snadno importovat a zpracovávat v jiných programech. Kromě prostého vykreslení profilu jako funkce dvou proměnných ve 3D nebo barevně kódovaném grafu (obr. 4), je možné určit také tvar vrstevnic proudové hustoty, které v sobě uzavírají definovaný proud. Takto stanovené vrstevnice pak umožňují podle jejich tvaru např. snadno srovnávat proudové hustoty v různých rovinách a vyhledat případnou optimální polohu vzorku. Je to období postupu při určování poloměru obsahujícího danou část proudu u rotačně souměrných svazků [7]. Vrstevnice obsahující 50 % a 95 % proudu svazku pro uvedené proudové hustoty jsou taktéž na obr. 4. Zobrazené výsledky byly získány z dat asi 6 miliard testovacích částic; výpočet jednoho profilu trvá na počítači s procesorem Athlon na frekvenci 1467 MHz asi 11 minut. Předcházející výpočet aberačních koeficientů byl proveden regresí na údajích o 3125 částicích, trasování bylo provedeno programem Trasys [5] a na stejném počítači trvalo 99 sekund (asi 1 miliarda za rok) Použitým optickým systémem je testovací elektrostatický systém (obr. 3).



Obr. 3 Testovací elektrostatický systém s dvoupatrovým vychylováním použitý v příkladu výpočtu proudové hustoty. Pro ilustraci jsou zobrazeny typické trajektorie 1eV částic. Jsou 10 x zvětšeny v příčném směru. Jejich počáteční úhly jsou shora 2, 1, 0, -1 a -2 mrad. Zdroj částic je umístěn na optické ose v  $z = -100$  mm. První čočka (1) vytváří rovnoběžný svazek, který druhá čočka (2) fokusuje do bodu v poloze  $z = 10$  mm. Dvě patra deflektorů (3) a (4) jsou navržena tak, aby prostřední trajektorie procházela obrazovou hlavní rovinou druhé čočky. Vychylovací napětí na jednotlivých patrech deflektorů jsou shodná velikostí, opačná polaritou. Zobrazené trajektorie jsou pro vychylovací napětí 1 mV

## 6 ZÁVĚR

Popsaná metoda výpočtu aberačních koeficientů regresí byla vyzkoušena na několika optických systémech, včetně kombinovaných systémů s elektrostatickými a magnetickými optickými prvky. Nadále je věnováno úsilí dalšímu vylepšení výpočetního postupu a programů, zejména automatické volbě vhodných počátečních podmínek.

Metoda výpočtu proudové hustoty nedifraktujících svazků částic těží z vysoké rychlosti výpočtu poloh částic za optickým systémem pomocí výrazů pro paraxiální zobrazení a vady. Může být použita jako první krok k získání dalších důležitých parametrů svazku, jako je u systémů s deflektory velikost a tvar částicové sondy (vrstevnice uzavírající danou část proudu), poloha maxima proudové hustoty a středu svazku, který se vlivem optických vad liší od očekávaného vychýlení daného citlivostí deflektoru. V principu lze výpočet rozšířit i na složitější systémy.

Prezentované ilustrační výsledky byly pořízeny výpočty na testovacím elektrostatickém optickém systému, jehož parametry - střední energie svazku a další vlastnosti zdroje částic, napětí na elektrodách čoček a vychylovací napětí - byly poměrově nastaveny tak, aby odpovídaly skutečným iontově optickým systémům.

*Práce vznikla v rámci doktorandského studia pod vedením doc. RNDr. Bohumily Lencové, CSc.*

*Část výzkumu byla provedena za podpory grantu 5RP G5RD-CT-2000-00344.*

*Autor se podílí na řešení grantového projektu GA AV ČR č. KJB2065405.*

## Literatura

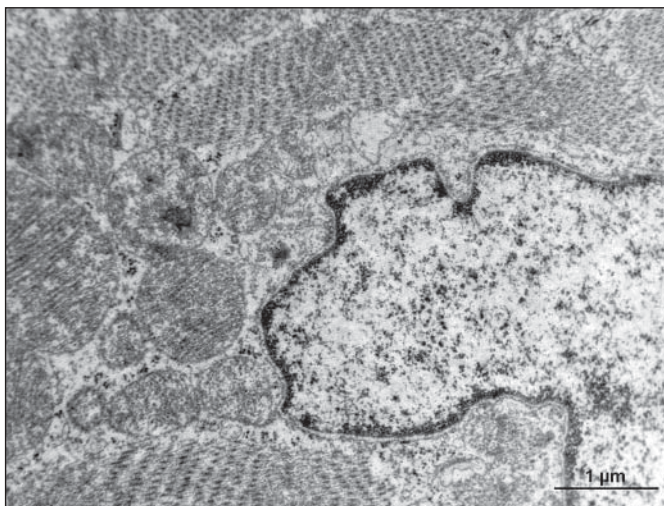
- [1] M. Lenc, B. Lencová: Optické prvky elektronových mikroskopů, Metody analýzy povrchů, ed. L. Eckertová a L. Frank, Academia Praha, 1996, ISBN 80-200-0329-0.
- [2] B. Lencová, M. Lenc: Computation of properties of electrostatic lenses. Optik 97, No. 3 (1994) s. 121-126.
- [3] J. Orloff et al: Handbook of Charged Particle Optics, CRC Press LLC, 1997, ISBN 0-8493-2513-7.
- [4] B. Lencová: Programs for particle optics computation (ELD, Eprop, Prop, Combi), version 3.70 user manuals, Brno 2002
- [5] B. Lencová, Trasys 3.70 user manual, Brno 2002.
- [6] M. Oral, B. Lencová: Calculation of Aberration Coefficients by Ray Tracing, Microscopy and Microanalysis 9 [Sup. 3] - S. 26-27 (2003).
- [7] J. E. Barth, P. Kruit; Addition of different contributions to the charged particle probe size, Optik 101, No. 3 (1996) s. 101-109.

## Nízkovoltový prozařovací elektronový mikroskop

Věnováno prof. Ing. A. Delongovi k jeho osmdesátinám

V elektronových prozařovacích mikroskopech pro studium biologických objektů nebo polymerových struktur se standardně používají elektrony s energií kolem 100 keV. Pozorované tenké vzorky v nich mají velmi nízký kontrast, proto musí být kontrastovány těžkými kovy. Tento postup však může přinést množství artefaktů, neboť v tomto případě již nepozorujeme samotný vzorek, ale těžké atomy, které obklopují struktury ve vzorku a tím je zvýrazňují. Pro mnohé aplikace je tato metoda dává dobré výsledky, avšak s rostoucími nároky na zkoumané objekty, například při studiu kompozitních materiálů, je vhodné pozorovat tyto objekty v co nejméně pozměněném stavu.

Přirozenou cestou ke zvýšení kontrastu je snížení energie elektronů, což má za následek zvětšení počtu interakcí mezi elektrony a zkoumaným vzorkem. Před více než čtyřiceti lety byly uskutečněny pokusy s pozorováním biologických tenkých řezů při energiích 5-15 keV. Tyto pokusy však ztroskotaly na nedostačujícím vakuu, kdy nabíjení různých částí znehodnocovalo kvalitu optiky. Nezanedbatelným problémem byla také na nedostatečná intenzita obrazu, způsobená zdroji elektronů s nízkým jasnem, a neúčinné detekční zařízení (stínítko či fotografická emulze). Počátkem devadesátých let profesor Delong analyzoval, zda je možné v současných podmínkách překlenout uvedené problémy a realizovat nízkovoltový prozařovací mikroskop pro studium převážně lehkých atomů jako H, N, O, C, P, S. Zjistil, že při optimální hodnotě energie elektronů kolem 5 keV to možné je, a zanedlouho byl připraven první prototyp tohoto přístroje. Úkol byl o to těžší, že kromě nízké energie elektronů byla požadována také miniaturizace elektronového mikroskopu tak, aby přístroj mohl být jednoduše instalován do jakékoli místnosti a byl i uživatelsky a cenově dostupný. Klíčovou roli při miniaturizaci přístroje bylo dosaženo použitím čoček s permanentními magnety, které umožňuje zhruba desetinásobné zmenšení optiky mikroskopu a nevyžaduje pro tyto čočky proudové zdroje a chlazení.



Obr. 2 Ultratenký nebarvený řez srdeční tkáně myši (vzorek připravila J. Nebesářová v Parazitologickém ústavu AV ČR)

Mikroskop (obr. 1 je vytištěn barevně na 3. straně obálky) se skládá ze dvou částí: z miniaturního elektronově optického tubusu, který je zakončen luminiscenčním stínítkem z vysoce účinného materiálu YAG (yttrium-hlinitý granát) a z klasického optického mikroskopu, který slouží pouze jako další stupeň zvětšení. Tato kombinace je velmi výhodná právě při použití nízké energie elektronů a YAG stínítka, které je monokrystalické a tudíž prakticky nemá žádnou mikrostrukturu v porovnání s práškovými luminofory. Jako zdroj elektronů je použita Schottkyho katoda, umístěná ve spodní části tubusu. Tato katoda má nejen vysoký jas, ale jedná se i o vysoce koherentní zdroj elektronů s dlouhou životností. Kondenzor a objektiv jsou buzeny polem permanentních magnetů. Jistou nevýhodou jejich použití je, že mikroskop může pracovat pouze kolem jedné, při výrobě dané energie, a pro zaostření obrazu se musí měnit výška vzorku v objektivu. Projekční soustava mikroskopu se skládá z elektrostatických čoček, které se dají konstruovat ve velmi malých rozměrech a spolehlivě fungují pro nízké energie v kvalitním vakuu. Mikroskop dosahuje rozlišovací schopnosti 2,5 nm, což je pro většinu biologických aplikací dostačující. Mikroskop může také pracovat v rastrovacím režimu s detekcí odražených či prošlých elektronů. Obraz v prošlých elektronech je svým kontrastem podobný zobrazení v prozařovacím režimu a umožňuje použít preparáty tloušťky až 60 nm. Režim pro detekci odražených elektronů umožňuje pozorování povrchů tlustých preparátů. Rozlišovací schopnost v obou rastrovacích režimech se pohybuje okolo 2 nm.

Při snížení energie dochází ke zmenšení hloubky průniku elektronů materiálem, a proto je nutné používat preparáty asi 20-30 nm tlusté. V porovnání se standardními přístroji, kde se používají elektrony s energií 100 keV a řezy okolo 80 nm, dosahujeme asi dvacetinásobného kontrastu. Dosažení natolik tenkých řezů se může na první pohled zdát z praktického hlediska jako obtížné, avšak pomocí moderních ultramikrotomů s diamantovými noži můžeme podle typu preparátu dosahovat tloušťky až 20 nm a při použití oscilujícího nože dokonce až 15 nm [1]. V České republice se intenzivněji věnují studiu biologických nebarvených řezů pouze v Parazitologickém ústavu AV ČR v Českých Budějovicích. Většina uživatelů nízkovoltové prozařovací mikroskopie se nachází v zahraničí, kde se již úspěšně osvědčila při studiu virů a v oblasti polymerů, zejména kompozitních materiálů [2], kde by se kontrastovací látka usazovala na hranicích zrn kompozitu a tak změnila vlastnosti materiálu. Právě tyto poslední příklady ukazují, že nízkovoltová mikroskopie nemůže být v některých oblastech nahrazena klasickou prozařovací mikroskopií a že myšlenka mikroskopu pracujícího s energií 5 keV je velkým přínosem [3].

### Literatura

- [1] J. Nebesářová, M. Vancová, Proc. EMC 2004, U. Antwerp. Vol. I, 403.
- [2] L. F. Drummy, J. Yang a D. C. Martin, Ultramicroscopy **99**, 247 (2004).
- [3] G. A. Asmar, M. A. Hanson, A. B. Ward, J. A. Lasalde, R. C. Stevens, C. Potter a P. Kuhn, Microscopy and Microanalysis **10** (Supp 2), 1492, 2004.

# Návrh a realizace dvourozměrných rotačně symetrických transparentních struktur určených pro testování, kalibraci a srovnávací měření realizované pomocí digitálního rotačního mikrofotometru

*Tento příspěvek doplňuje sérii článků a publikací [2-21] věnovaných teorii elektrických a optických náhodných signálů a jejich měření [2-7] se zvláštním zaměřením na analýzu sekundární zrnitosti barevných i černobílých fotografických materiálů na transparentní podložce, jejího mikrofotometrického vyhodnocování [7-9] a návrhu a realizaci (jednorozměrného) digitálního rotačního mikrofotometru (DRMF), včetně navrženého software a prezentace dosažených výsledků [8-21]. Uvedený přístroj byl postupně realizován ve dvou exemplářích, nejdříve jako relativně jednoduché zařízení (univerzální předzesilovač, 8-bitový převodník A/D, externí napájecí zdroje, radiální třecí převod k pohonu rotačního talíře, jednoduchý snímač otáček) [8,10-14] a potom jako dokonalejší měřicí aparatura modulové koncepce („okénkový“ předzesilovač fotoelektrického proudu, 9-bitový převodník A/D, dokonalejší 8-rychlostní axiální pohon rotačního stolku, osm snímacích clonek pro určení polohy rotačního talíře, optické oddělení řídicích a datových signálů mezi PC a měřicí aparaturou, variabilní software) [15-21]. Tento příspěvek se podrobněji věnuje problematice uvedené v názvu článku, která byla pouze stručně popsána ve [20].*

## 1. ÚVOD

Každé nově vyvíjené měřicí zařízení je třeba nejdříve otestovat pomocí vhodných testů, rovněž musí být možno zařízení kalibrovat (týká se především měření náročných na přesnost) a v neposlední řadě musí být stanovena metodika srovnávacích měření (porovnávání výsledků měření při různých nastaveních parametrů těchto měření nebo pro srovnávání různých měřicích aparatur). Hned v úvodu tohoto článku je třeba uvést, že označení rotačně symetrické struktury, které bylo použito v názvu článku a bylo zavedeno pro potřeby tohoto článku, znamená, že každou část (figuru) realizovaného testu je možné vhodně pootočit kolem středu otáčení (testu) tak, aby byla středově souměrná s jinou libovolně zvolenou figurou (stejného tvaru) tohoto testu. Tuto vlastnost má však smysl uvažovat jen pro největší a zároveň nejdůležitější skupinu realizovaných testů, které jsou popsány v kap. 4.

Jako testy rotačního mikrofotometru se obvykle používají geometricky jednoduché rotačně symetrické obrazce na transparentní podložce, u nichž lze měřenou charakteristiku, např. statistický rozptyl optické propustnosti [7,9,13], stanovit přesně i výpočtem. Nutno však připomenout, že bezchybná analýza testovacích obrazců je pouze nutnou (ale nikoliv postačující) podmínkou správné funkce měřicí aparatury.

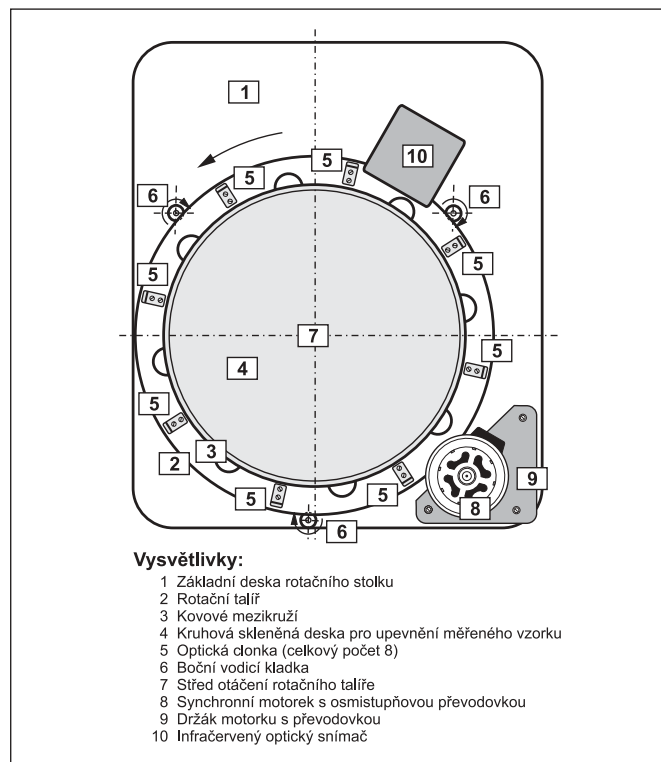
Kalibrace měřicí aparatury se provádí ve statickém režimu (rotační talíř s upevněným vzorkem se neotáčí) s využitím sady speciálních vzorků na transparentní podložce, které jsou určeny pro kalibraci v požadovaném rozsahu optických hustot (nebo optických propustností). Pro zvlášť přesná měření je možné rovněž sestavit korekční křivku měřicí aparatury.

Pro srovnávací měření jsou vhodné náhodné struktury (rovněž na transparentní podložce), jejichž základní parametry můžeme časově ovlivňovat. Nejčastěji se používají pseudonáhodné struktury navržené počítačem (tzv. textury).

## 2. GEOMETRICKÝ TVAR MĚŘENÉHO VZORKU

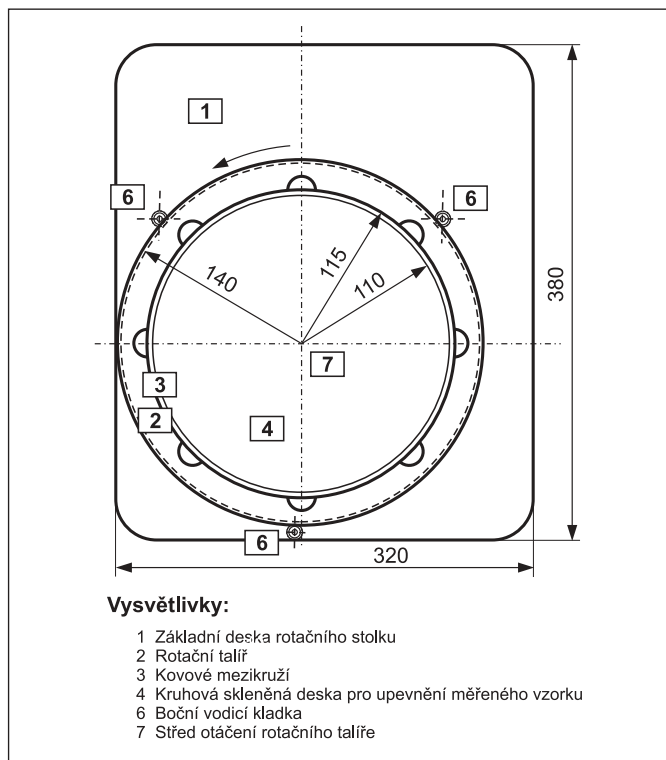
Měřený vzorek se před měřením upevňuje na rotační talíř, který je hlavní částí rotačního stolku digitálního rotačního mikrofotometru (DRMF) a který se při vlastním měření rovnoměrně otáčí vhodně zvolenou úhlovou rychlostí. Náčrtek konečného uspořádání rotačního stolku je na obr. 1, který je nakreslen podle [19]. Základní deska 1 rotačního stolku nese rotační talíř 2, který je tvořen kovovým mezikružím 3, skleněnou kruhovou deskou 4 a osmi optickými clon-

kami 5 (spony sloužící k upevnění vzorku nejsou zakresleny). V základní desce je pod rotačním talířem obdélníkový výřez zajišťující nerušený průchod světelných paprsků (na obrázku rovněž není zakreslen). Rotační talíř je veden třemi bočními kladkami 6 tak, že se může otáčet kolem (volně přístupného) středu otáčení 7. Pohon rotačního talíře zajišťuje synchronní motorek 8 s osmistupňovou převodovkou, která s ním tvoří jeden celek. Motorek je upevněn pomocí držáku motoru 9. Okamžitou polohu rotačního talíře (tj. odpovídající oktant měření) zjišťuje s využitím osmi optických clonek infračervený optický snímač 10.



Obr. 1 Schematický náčrt uspořádání rotačního stolku

Nejdůležitější rozměry rotačního stolku a rotačního talíře jsou vyznačeny na zjednodušeném schematickém náčrtku na obr. 2, který je převzat z [10]. Na tomto obrázku jsou pro přehlednost vynechány optické clonky, motorek s převodovkou a držákem a infračervený optický snímač. Z uvedených rozměrů rotačního talíře jednoznačně vyplývá, že pro dobrou reprodukovatelnost vyhodnocování testovacích obrazců musí mít používané testy (realizované na transparentní podložce) přesně tvar kruhu o průměru 230 mm tak, aby bez vůle přesně zapadly do vybrání v rotačním talíři, přičemž aktivní (využitelná) oblast testu má průměr 220 mm (poloměr  $r = 110$  mm).



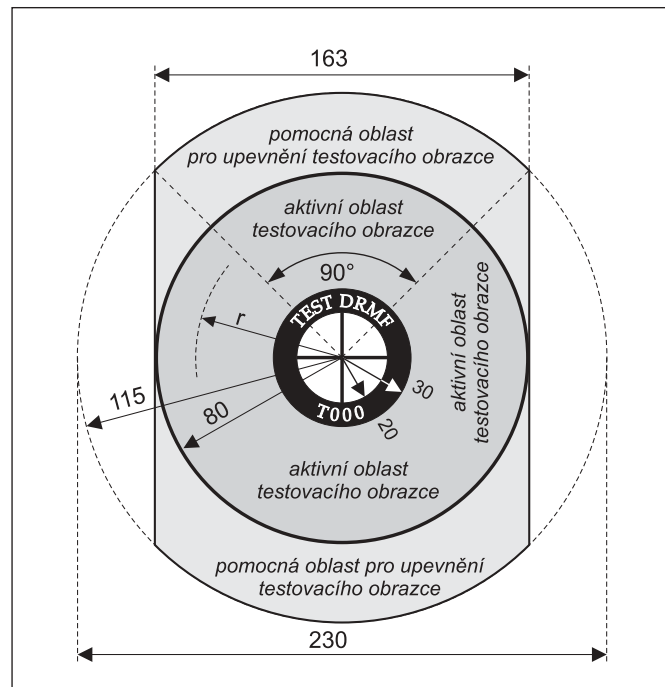
Obr. 2 Hlavní rozměry rotačního stolku a rotačního talíře

Z této skutečnosti vycházela původní technologie výroby nejrůznějších testů pro realizovaný DRMF. Testovací obrazce se narýsovaly v několikrát větším měřítku na kladívkový papír, přefotoografovaly pomocí fotoaparátu s kvalitním objektivem na černobílý film s velkým rozlišením a po jeho vyvolání zvětšily na plochý technický film o rozměru 240 x 300 mm. Po jeho fotochemickém zpracování a vystřížení kruhu o průměru 230 mm byl konečně testovací obrazec připraven k použití. Teprve až rozvoj technologie laserového tisku umožnil jednoduchou výrobu testovacích obrazců nejrůznějších tvarů a číselných charakteristik.

### 3. VÝROBA TESTOVACÍCH OBRAZCŮ NA LASEROVÉ TISKÁRNĚ

Využití počítačového návrhu a tisku testovacích obrazce na laserové tiskárně podstatně zjednodušilo jejich doposud značně komplikovanou a zdlouhavou výrobu. Problémem však byla skutečnost, jak na běžné laserové tiskárně pro tisk formátu A4 (210 x 297 mm), natisknout fólii o požadovaném průměru (230 mm), když navíc tiskárna netiskne až od kraje papíru (fólie). Nejdříve bylo uvažováno o výrobě redukce (230/190 mm), která by umožnila použít testů o menším průměru 190 mm. Nakonec bylo nalezeno jednodušší a levnější řešení spočívající ve změně tvaru testovacích obrazce, přičemž i obrazec nového tvaru si zachovává důležitou vlastnost přesného umístění v otvoru rotačního talíře. Jak je patrné z obr. 3 převzatého z [20], lze testovací obrazce nového tvaru snad-

no tisknout na běžné laserové tiskárně a hlavně na standardní transparentní fólie formátu A4, protože tento obrazec má maximální šířku pouze 163 mm! Určitá nevýhoda spočívající ve zmenšení plochy testovacího obrazce není ve srovnání s možností snadného, rychlého a kvalitního tisku tohoto obrazce nikterak důležitá. Jistě není třeba zdůrazňovat, že šířka snímací štěrbin DRMF je při snímání testovacích obrazců nastavena na velikost alespoň o řád větší, než je velikost tiskového rastru použité laserové tiskárny.



Obr. 3 Nový tvar testovacího obrazce

Nový tvar testovacího obrazce byl odvozen tak, že z požadovaného kruhu o průměru 230 mm byla z každé strany odebrána kruhová úseč takové velikosti, že odpovídající středový úhel je pravý (90°). Tím se šířka testovacího obrazce zmenší na 163 mm. Aby byl nový tvar testovacího obrazce dobře viditelný, je na obr. 3 podbarven světle šedě. Aktivní oblast, která slouží k umístění vlastního testovacího obrazce, je z téhož důvodu podbarvena tmavším odstínem šedi. Tato pracovní oblast má tvar mezikruží o vnějším poloměru 80 mm a vnitřním poloměru 30 mm. Na obrázku je rovněž zakreslena obecná poloha měřicí kruhové dráhy o poloměru  $r$ . Pak platí základní podmínka realizovatelnosti měření

$$30 \text{ mm} < r < 80 \text{ mm} \quad (1)$$

Vnitřní mezikruží (mezi poloměry 30 mm a 20 mm) je vybarveno nejsytější černou barvou, která je v použité laserové tiskárně k dispozici. Obvykle ji můžeme považovat za netransparentní a využít ji při nastavování DRMF. Toto černé mezikruží obsahuje identifikační nápisy (v negativním provedení). Vnitřek tohoto mezikruží (kromě záměrného kříže) můžeme naopak považovat za plochu dokonale transparentní (velikost transparency podložky se při měření nemusí brát v úvahu, protože má na celé ploše testovacího obrazce konstantní velikost).

### 4. REALIZOVANÉ TESTOVACÍ OBRAZCE

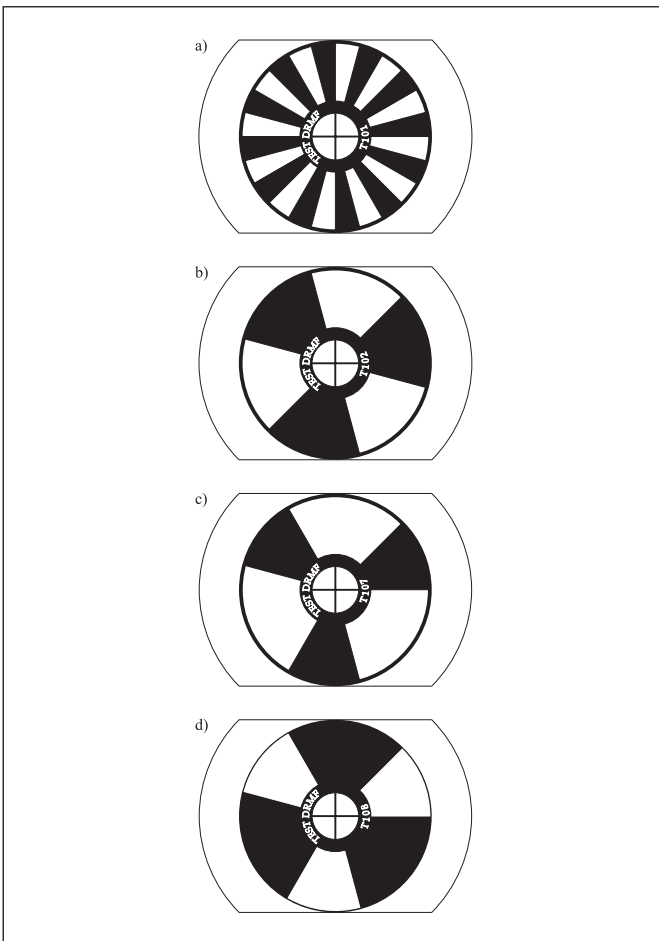
Do této kapitoly jsou zařazeny testovací obrazce, jejichž číselné parametry lze poměrně snadno teoreticky vypočítat. Nejdůležitější číselnou charakteristikou každého testovacího obrazce je statistický rozptyl (disperze)  $\sigma_f^2$  optické propustnosti  $T'$  měřeného vzorku. V tomto článku jsou použity označení a definice veličin podle [1,13].

#### 4.1 Dvoutónové testovací obrazce ve tvaru kruhových výsečí

Jedná se o nejjednodušší testovací obrazce skládající se z bílých a černých výsečí, přičemž statistický rozptyl optické propustnosti  $\sigma_T'^2$  nezávisí na poloměru  $r$  snímací dráhy, ovšem za předpokladu, že snímání se provádí uvnitř aktivní oblasti (1). Jestliže počet bílých výsečí je  $m_1$  a počet černých výsečí je  $m_2$ , měřená dráha na ploše každé bílé výseče je  $s_1$  a na ploše každé černé výseče je  $s_2$ , potom podle [20] pro statistický rozptyl  $\sigma_T'^2$  platí jednoduchý vztah

$$\sigma_T'^2 = \frac{m_1 m_2 s_1 s_2}{(m_1 s_1 + m_2 s_2)^2}. \quad (2)$$

Příklady realizovaných dvoutónových testovacích obrazců ve tvaru kruhových výsečí jsou uvedeny na obr. 4. Všechny realizované testovací obrazce jsou značeny jednotným způsobem tak, že první číslice v trojčísle za písmenem „T“ udává typ testovacího obrazce, zbývající dvě číslice pořadové číslo. Dvoutónové testovací obrazce ve tvaru kruhových výsečí mají první číslici rovnu 1.



Obr. 4 Dvoutónové testovací obrazce ve tvaru kruhových výsečí

Na obr. 4a a 4b jsou z hlediska výpočtu nejjednodušší testovací obrazce, které obsahují stejný počet bílých i černých výsečí ( $m_1 = m_2 = m$ ) a všechny výseče jsou stejně veliké ( $s_1 = s_2 = s$ ). Potom se obecný vztah (2) zjednoduší až na konkrétní číselnou hodnotu

$$\sigma_T'^2 = [\sigma_T'^2]_{T101} = [\sigma_T'^2]_{T102} = 0,250. \quad (3)$$

Tento výsledek je společný pro všechny testovací obrazce se stejným počtem bílých a černých výsečí o stejné velikosti. Zároveň se dá snadno ukázat, že se jedná o maximální velikost disperze optické propustnosti, které se dá dosáhnout u dvoutónového testovacího obrazce.

Na obr. 4c a 4d jsou testovací obrazce se stejným počtem bílých i černých výsečí ( $m_1 = m_2 = m$ ), ale s jejich různou velikostí ( $s_1 \neq s_2$ ). Potom se vztah (2) zjednoduší na tvar

$$\sigma_T'^2 = \frac{s_1 s_2}{(s_1 + s_2)^2}. \quad (4)$$

Pro testovací obrazec na obr. 4c platí, že  $s_1 = 5$  a  $s_2 = 3$ . Potom pro statistický rozptyl optické propustnosti platí  $[\sigma_T'^2]_{T107} = 0,234$ . Obrazec na obr. 4d je barevně komplementární ( $s_1 = 3$  a  $s_2 = 5$ ) a vzhledem k symetrii vztahu (4) má statistický rozptyl stejnou hodnotu  $[\sigma_T'^2]_{T108} = 0,234$ .

#### 4.2 Dvoutónové testovací obrazce s proužky konstantní šířky

Jedná se o poněkud složitější testovací obrazce, které jsou tvořeny černými nebo bílými proužky konstantní šířky umístěnými na bílém (obr. 5a nebo 5c) nebo černém pozadí (obr. 5b). Směr těchto proužků je buďto radiální (obr. 5a nebo 5b) nebo rovnoběžný s některým průměrem testovacího obrazce a tedy i mezi sebou navzájem (obr. 5c). U těchto testovacích obrazců již neplatí, že statistický rozptyl optické propustnosti  $\sigma_T'^2$  nezávisí na poloměru  $r$  snímací dráhy. Stále však musí být splněna podmínka (1). Jestliže použijeme  $n$  černých proužků radiálního směru, každý o konstantní šířce  $d$ , platí pro statistický rozptyl  $\sigma_T'^2$  vztah

$$\sigma_T'^2 = \frac{n\alpha}{2\pi} \left(1 - \frac{n\alpha}{2\pi}\right), \quad (5)$$

kde  $\alpha = 2 \arcsin \frac{d}{2r}$  je středový úhel odpovídající té části měřené kruhové dráhy, která protíná jeden černý proužek. Výraz (5) má smysl jen pro  $1 - \frac{n\alpha}{2\pi} > 0$ . Tato podmínka vyjadřuje požadavek, aby se na měřené kruhové dráze o poloměru  $r$  radiální černé kroužky nepřekrývaly. Pro test s černými radiálními proužky na obr. 5a platí  $n = 12$  a  $d = 15$  mm (měřeno na testu ve skutečné velikosti). Zvolíme-li poloměr měřené kruhové dráhy např.  $r_1 = 75$  mm, dostaneme pro statistický rozptyl optické propustnosti číselnou hodnotu  $[\sigma_T'^2]_{T202/75} = 0,236$ . Dvoutónové testovací obrazce s proužky konstantní šířky mají první číslici v trojčísle rovnu 2. Testovací obrazec na obr. 5b s radiálními bílými kroužky je barevně komplementární s obrazcem na obr. 5a a má proto i stejný statistický rozptyl optické propustnosti  $[\sigma_T'^2]_{T203/75} = 0,236$  při stejném poloměru měřené kruhové dráhy  $r_1 = 75$  mm. Pro poloměr měřené dráhy  $r_2 = 60$  mm např. dostaneme číselné hodnoty  $[\sigma_T'^2]_{T202/60} = [\sigma_T'^2]_{T203/60} = 0,249$ .

Na obr. 5c je nejčastěji používaný případ testovacího obrazce s rovnoběžnými proužky konstantní šířky. Všechny tři černé proužky mají stejnou šířku  $d_1$  a jsou odděleny dvěma bílými proužky o šířce  $d_2$ . Celý obrazec je osově symetrický. Měřenou kruhovou dráhu má smysl vést jenom dvěma různými způsoby.

První způsob spočívá v tom, že měřená dráha protíná střední proužek dvakrát a oba krajní pouze jednou. Je tedy splněna podmínka

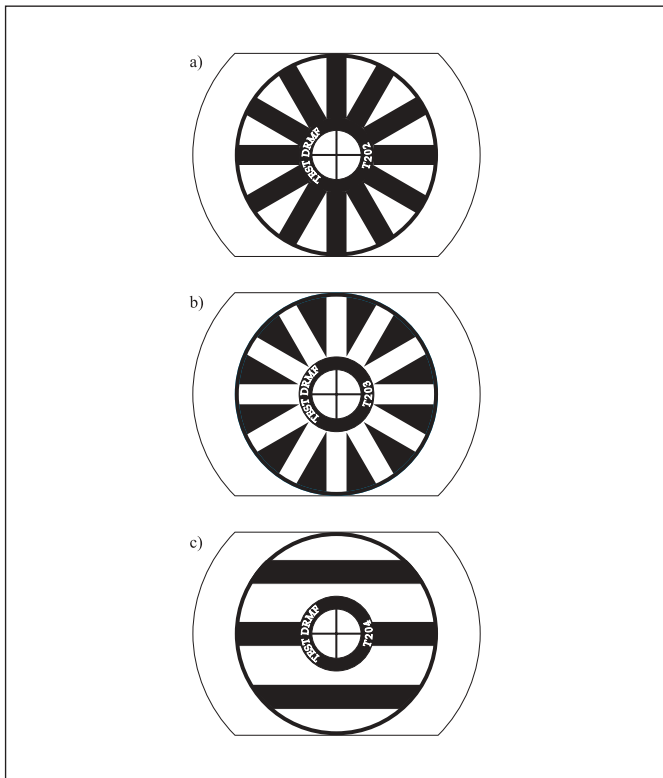
$$\frac{1}{2}d_1 + d_2 < r < \frac{3}{2}d_1 + d_2. \quad (6)$$

Statistický rozptyl  $\sigma_T'^2$  optické propustnosti je v tomto případě dán vztahem

$$\sigma_T'^2 = \frac{\alpha + \beta}{\pi} \left(1 - \frac{\alpha + \beta}{\pi}\right), \quad (7)$$

kde  $\alpha = 2 \arcsin \frac{d_1}{2r}$  je středový úhel odpovídající té části měřené kruhové dráhy, která protíná střední černý proužek,  $\beta = 2 \arccos \frac{d_1 + 2d_2}{2r}$

je středový úhel odpovídající té části měřené kruhové dráhy, která protíná jeden boční černý proužek. Výraz (7) má smysl jen pro  $1 - \frac{\alpha + \beta}{\pi} > 0$ . Tato podmínka opět vyjadřuje požadavek, aby se na měřené kruhové dráze o poloměru  $r$  nepřekrývaly černé (rovnoběžné) proužky. Pro test s černými rovnoběžnými proužky na obr. 5c platí  $d_1 = 20$  mm a  $d_2 = 30$  mm (měřeno opět na testu ve skutečné velikosti). Zvolíme-li poloměr měřené kruhové dráhy např.  $r = 55$  mm, dostaneme pro statistický rozptyl optické propustnosti číselnou hodnotu  $[\sigma_T'^2]_{T_{204/55}} = 0,240$ .



Obr. 5 Dvoutónové testovací obrazce s proužky konstantní šířky

V druhém případě je dráha volena tak, aby každý proužek, včetně obou krajních, protínala dvakrát. Poloměr  $r$  takovéto dráhy vyhovuje podmínce

$$\frac{3}{2}d_1 + d_2 < r < 80 \text{ mm.} \quad (8)$$

Statistický rozptyl  $\sigma_T'^2$  optické propustnosti je v tomto případě dán vztahem

$$\sigma_T'^2 = \frac{\alpha + 2\gamma}{\pi} \left( 1 - \frac{\alpha + 2\gamma}{\pi} \right), \quad (9)$$

kde  $\alpha = 2 \arcsin \frac{d_1}{2r}$  je středový úhel odpovídající té části měřené kruhové dráhy, která protíná střední černý proužek,

$\gamma = \arccos \frac{d_1 + 2d_2}{2r} - \arccos \frac{3d_1 + 2d_2}{2r}$  je zase středový úhel odpovídající té části měřené kruhové dráhy, která protíná jeden jeden boční černý proužek. Výraz (9) má smysl jen pro  $1 - \frac{\alpha + 2\gamma}{\pi} > 0$ .

Tato podmínka opět vyjadřuje požadavek, aby se na měřené kruhové dráze o zvoleném poloměru  $r$  nepřekrývaly černé (rovnoběžné) proužky.

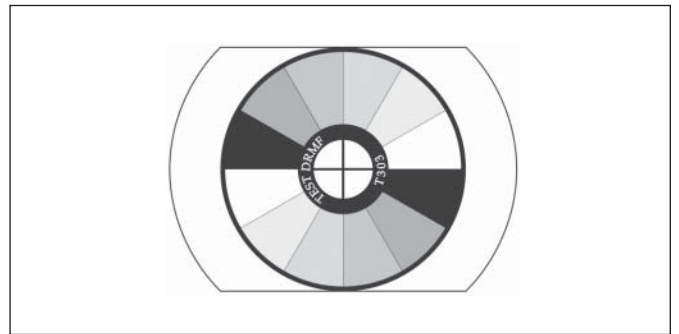
## 5. SPECIÁLNÍ VZORKY URČENÉ PRO KALIBRACI

Speciální vzorky určené pro kalibraci se obvykle dodávají v sadách pokrývajících požadovaný rozsah optických hustot. Jsou u nich kladeny velké požadavky na přesnost a časovou stálost optických vlastností. Proto je nejlepším řešením použití výrobků renomovaných firem, např. japonské firmy FUJI [4]. U všech měření realizovaných na DRMF s využitím dosažitelných kalibračních vzorků byla přesnost dosažených výsledků lepší než 0,4%.

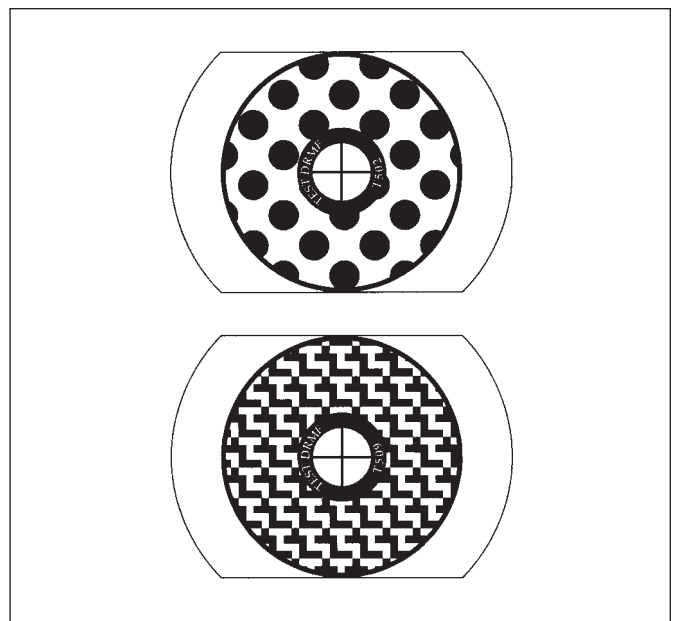
## 6. TESTOVACÍ OBRAZCE URČENÉ PRO SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ

Do této kapitoly jsou zařazeny příklady testovacích obrazců, které jsou sice stále ještě diskrétní a mají jednoduchý tvar, ale jsou již vícetónové (obr. 6) a tudíž k teoretickému výpočtu je nutná kalibrace jednotlivých úrovní (barevných tónů – stupňů šedi), nebo jsou stále ještě dvoutónové (a diskrétní), ale mají natolik komplikovaný tvar, že nejsou již vhodné k teoretickému výpočtu (obr. 7) a nebo mají spojitou (obr. 8) či pseudonáhodnou (obr. 9) změnu optické propustnosti a k teoretickým výpočtům nejsou vhodné vůbec.

Pro všechny typy zde uvedených testovacích obrazců určených pro srovnávací měření platí obdobně jako pro jednoduché testovací obrazce, že šířka snímací štrbiny DRMF je při snímání testovacích obrazců nastavena na velikost alespoň o řád větší, než je velikost tiskového rastru použité laserové tiskárny a že se také dají jednoduše a rychle navrhnout na počítači a vytisknout na běžné laserové tiskárně. Protože však neznáme teoretickou hodnotu jejich disperze  $\sigma_T'^2$ , jsou určeny především pro srovnávací měření.

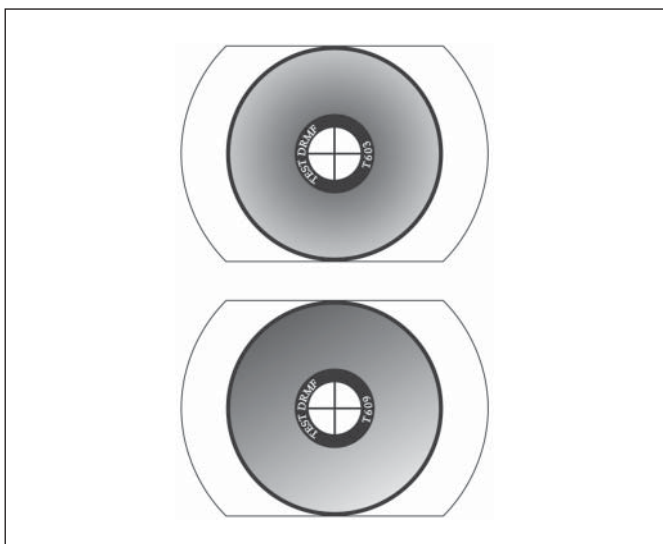


Obr. 6 Vícetónový diskretní testovací obrazec pro srovnávací měření

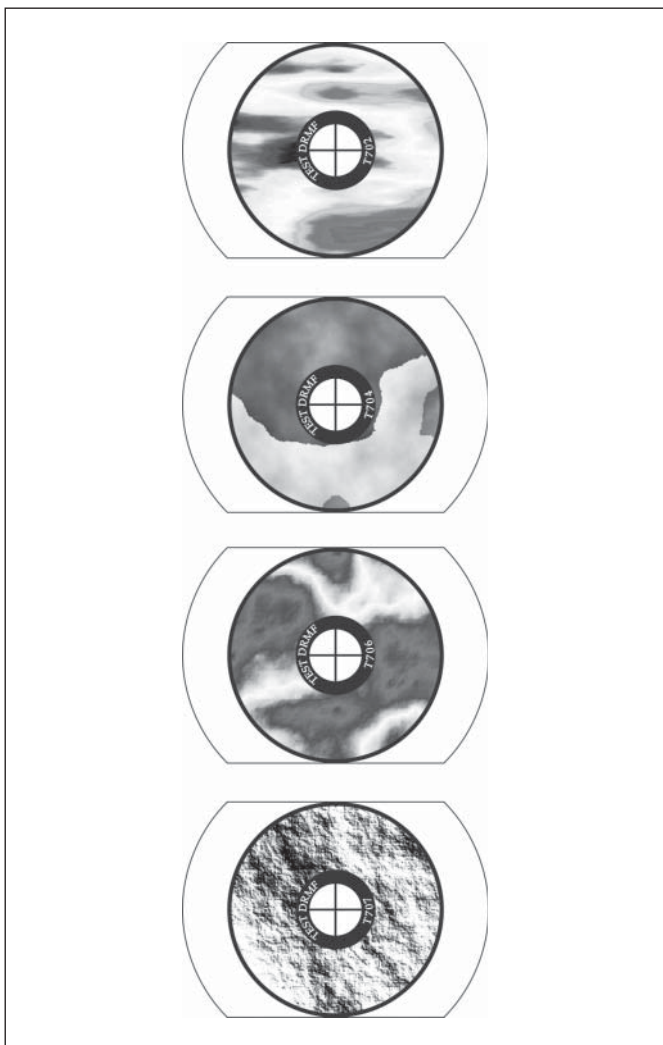


Obr. 7 Diskretní testovací obrazce se složitějším dvoutónovým vzorem pro srovnávací měření





Obr. 8 Testovací obrazce se spojitou změnou tónu pro srovnávací měření



Obr. 9 Testovací obrazce s pseudonáhodnou změnou tónu pro srovnávací měření

## 7. ZÁVĚR

Všechny testovací obrazce popsané v tomto příspěvku jsou původní, byly nakresleny ve vektorově orientovaném grafickém editoru CorelDRAW 9.0 a byly vytištěny na laserové tiskárně OKIPAGE 14ex. Nejdůležitějším přínosem tohoto článku je vyřešení snadné konstrukce a jednoduché výroby (včetně stručného doplňujícího matematického popisu) jednoduchých testovacích rotačně symetrických dvourozměrných struktur na transparentní podložce pro testování digitálního rotačního mikrofotometru (testovací struktury jsou určeny pro zdokonalenou verzi přístroje s modulovou koncepcí a s optickým oddělením řídicích i datových signálů [15-21]).

## Literatura

- [1] POSPÍŠIL, J.: Některé moderní metody měření sekundární zrnitosti vyvolaných fotografických materiálů. In: Sborník V. sympózia „Fotografia Academica 76“, str. 328-342. Pardubice, Vyd. VŠCHT 1976.
- [2] HRDÝ, J.: Elektrický analyzátor náhodných signálů. Diplom. práce, Přírodověd. fak. Univ. Palackého v Olomouci 1977, 90 s.
- [3] POSPÍŠIL, J. – HRDÝ, J.: Elektrické náhodné signály a jejich analýza. Práce SVOČ, Přírodověd. fak. Univ. Palackého v Olomouci 1977, 107 s.
- [4] HRDÝ, J.: Studium problematiky náhodných signálů a jejich analýzy. Rigoróz. práce, Přírodověd. fak. Univ. Palackého v Olomouci 1977, 200 s.
- [5] POSPÍŠIL, J. – HRDÝ, J.: Graficko-numericke a elektrické digitální metoda sumace časových intervalů k zjišťování hodnot distribuční funkce pravděpodobnosti rovinných transparentních náhodných struktur. Jemná mech. a optika **31**, 1986, č. 3, 67-72.
- [6] HRDÝ, J. – POSPÍŠIL, J.: Digitální mikrofotometrický měřič distribuční funkce pravděpodobnosti rovinných transparentních náhodných struktur. Acta Univ. Palacki. Olomuc., Fac. Rer. Nat., Physica **25**, 1986, 221-295.
- [7] POSPÍŠIL, J. – HRDÝ, J.: Šumové aspekty sekundární zrnitosti fotografických materiálů. Jemná mech. a optika, **44**, 1999, č.10, 312-323.
- [8] HRDÝ, J.: Digitální mikrofotometrický granulometr. Práce SVČ, sekce postgraduál. studia, Přírodověd. fak. Univ. Palackého v Olomouci 1999, 44 s.
- [9] POSPÍŠIL, J. – HRDÝ, J.: Principy mikrofotometrických metod měření sekundární zrnitosti fotografických materiálů. Jemná mech. a optika, **45**, 2000, č. 1, 11-19.
- [10] HRDÝ, J. – POSPÍŠIL, J.: Rotationsmikrofotometer - optischer und mechanischer Funktionsteil. Acta Univ. Palacki. Olomuc., Fac. Rer. Nat., Physica **39**, 2000, 195-202.
- [11] HRDÝ, J. – POSPÍŠIL, J.: Rotationsmikrofotometer - elektronischer Funktionsteil. Acta Univ. Palacki. Olomuc., Fac. Rer. Nat., Physica **39**, 2000, 203-234.
- [12] HRDÝ, J.: Rotationsmikrofotometer - Adapter für seriellen Port PC. Acta Univ. Palacki. Olomuc., Fac. Rer. Nat., Physica **39**, 2000, 235-247.
- [13] HRDÝ, J. – POSPÍŠIL, J.: Měření sekundární zrnitosti barevných fotografických materiálů metodou digitálního rotačního mikrofotometru. Jemná mech. a optika, **46**, 2001, č. 3, 75-86.
- [14] HRDÝ, J. – POSPÍŠIL, J.: Equipment for measurement of the granularity of photographic materials. In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Vol. 4356, 2001, s. 420-424.
- [15] HRDÝ, J. – POSPÍŠIL, J.: Digitales Rotationsmikrofotometer - Software 1. Acta Univ. Palacki. Olomuc., Fac. Rer. Nat., Physica **40-41**, 2001-2002, 111-121.
- [16] HRDÝ, J.: Digitales Rotationsmikrofotometer - Software 2. Acta Univ. Palacki. Olomuc., Fac. Rer. Nat., Physica **40-41**, 2001-2002, 123-141.
- [17] HRDÝ, J.: Digitales Rotationsmikrofotometer - Software 3. Acta Univ. Palacki. Olomuc., Fac. Rer. Nat., Physica **40-41**, 2001-2002, 143-153.
- [18] HRDÝ, J. – POSPÍŠIL, J.: Digitální rotační mikrofotometr s optickým oddělením řídicích signálů. Jemná mech. a optika, **46**, 2001, č. 9, 283-296.
- [19] HRDÝ, J. – POSPÍŠIL, J.: Digitální rotační mikrofotometr modulové koncepce. Jemná mech. a optika, **47**, 2002, č. 2, 37-51.
- [20] HRDÝ, J.: Digitální rotační mikrofotometr k měření sekundární zrnitosti barevných fotografických materiálů. Dizert. práce, Přírodověd. fak. Univ. Palackého v Olomouci, 2002, 214 s.
- [21] HRDÝ, J. – POSPÍŠIL, J.: Digital rotational microphotometer of the module conception with optical separation of control signals for measurement of granularity of the colour photographic films. Optik, **114**, 2003, č. 6, 279-288.

# Prostředky obrazové analýzy pro klasifikaci dendritických struktur

*V přírodě se vyskytuje velmi mnoho objektů dendritického charakteru. Mohou to být například listy kapradin nebo půvabné dendritické krystalky sněhových vloček. Dendritickou krystalizací však vykazují za určitých podmínek kovy při krystalizaci, ale i roztoky solí vytvářející charakteristické dendrity při krystalizaci ve viskózním prostředí. Pro studium dendritické krystalizace je vhodné mít prostředky, které dávají možnost třídit obrázky krystalů podle vzájemné podobnosti jejich dendritické struktury. Cílem tohoto shrnutí je představit a přiblížit možnosti jednotlivých způsobů náhledu na dendrity a další postupy hledání klasifikačních příznaků a klasifikace.*

## 1. ÚVOD

Pro vyhodnocení krystalů dendritického typu je vhodné třídit obrázky krystalů podle vzájemné podobnosti dendritické struktury. Cílem tohoto příspěvku je představit a přiblížit možnosti jednotlivých způsobů náhledu na obrázky dendritů a další postupy hledání klasifikačních příznaků a klasifikace. Krystaly jsou fotografovány, případně snímány CCD kamerou přes optický mikroskop, s výjimkou dendritů kovů snímány elektronovým mikroskopem. Obrázky jsou reprezentovány čtvercovou maticí 512 x 512 pixelů s osmibitovou reprezentací jasu.

## 2. METODY

Na obrázky je nahlíženo třemi různými přístupy [1]: spektrální (FFT), statistickým a strukturálním. Existuje mnoho forem dendritických krystalů. Příklady zástupců některých skupin vidíte na následujících obrázcích (obr. 1).

### 2.1. Spektrální přístup

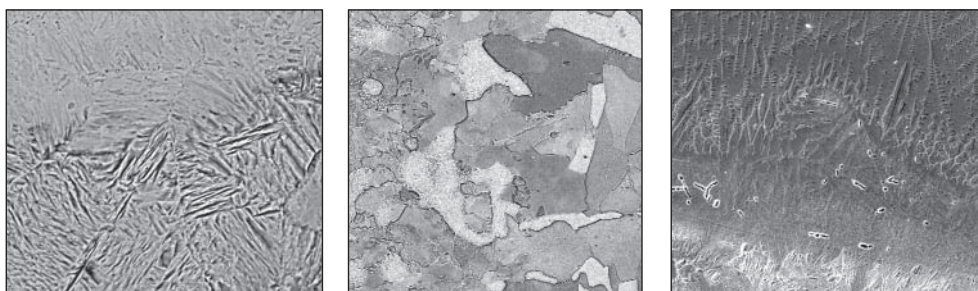
První ze zmiňovaných přístupů, spektrální, je založen na studiu dvojrozměrného Fourierova spektra, jeho filtraci a hodnocení pomocí spektrálních texturních charakteristik.



Chlorid sodný krystalizující v prostředí krevního séra

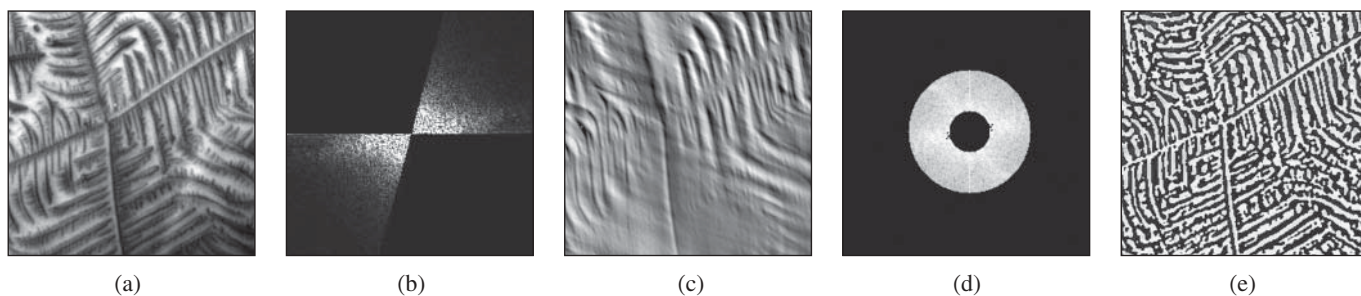


Sněhové vločky



Dendritické krystaly v kovech

Obr. 1 Dendritické krystaly



Obr. 2 Postupy spektrálního přístupu  
 a - původní obrázek, b - Fourierovské spektrum filtrováno motýlkovým filtrem, c - odpovídající obrázek motýlkovému filtru,  
 d - filtr typu „dolní propust“, e - odpovídající obrázek mezikruhovému filtru

Pro tyto účely byly použity spektrální filtry [2], například dolní propusti a tzv. motýlkové filtry pro odstranění šumu a drop-outů. Tyto filtry a jejich vliv na zpracovávaný obrázek jsou schematicky znázorněny na následujících obrázcích (obr. 2.).

hodnocovány v každé z 64 oblastí, do kterých je spektrum rozděleno. Porovnáním výsledků jednotlivých oken je možné usuzovat na typ textury a její změny v různých částech obrázku.

### 2.2. Statistický přístup

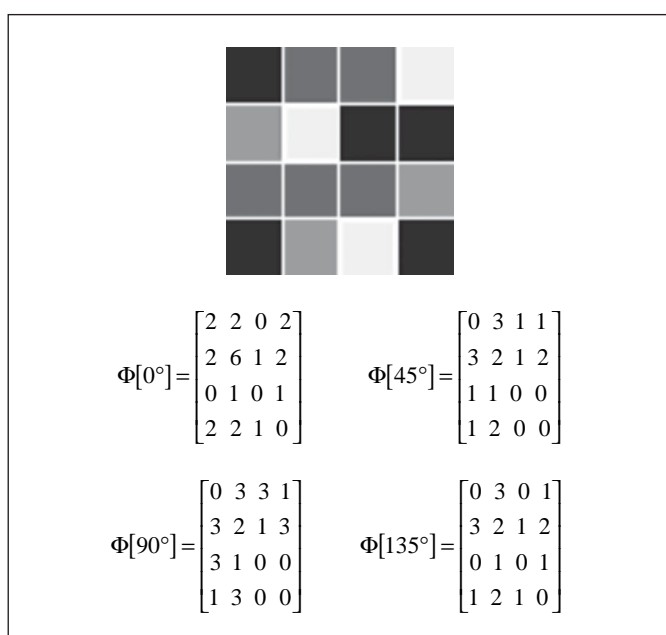
Druhým přístupem je statistický přístup aplikovaný přímo na obrazová data po jejich konverzi do 256 odstínů šedi. Dvojměrné statistické funkce popisují velikost (jas) a polohu daného obrazového bodu (pixelu) v závislosti na jasu okolních obrazových bodů. Matice šedotónových závislostí (GDTM) [6] jsou čtvercovými maticemi četností, popisujícími pravděpodobnost sousedství dvou jasových hodnot v obrázku ve čtyřech různých směrech. Příklad vytvoření takové matice je uveden na následujícím obrázku (obr. 3.)

Z těchto matic je poté vyhodnocováno mnoho číselných parametrů (úhlový moment, korelace, entropie, řádkové a sloupcové závislosti, invariantní momenty, které jsou invariantní vůči translaci, rotaci a měřítku).

### 2.3. Strukturální přístup

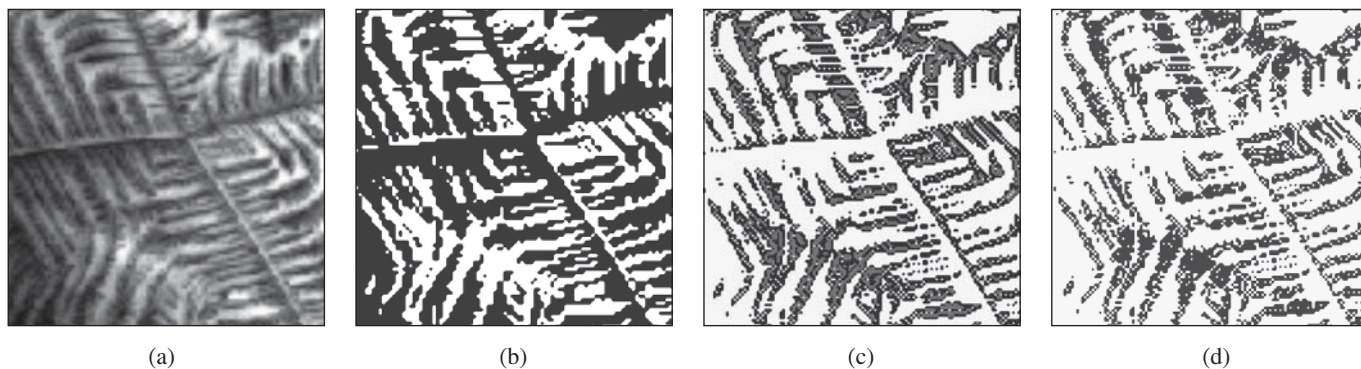
Přímé strukturální hodnocení obrázků vychází z podobných klasifikačních postupů, jakými pracuje lidské oko a mozek a hodnotí strukturu přímo. Jednou z těchto metod je například redukce tvaru rovinných struktur do grafu. Jednou z možností, jak poměrně snadno a rychle zjednodušit popis takových rovinných struktur v obrázku je například získání *skeletu* (*skeletonu*) struktury pomocí různých počítačových algoritmů. Klasickým příkladem je dnes již nepoužívaný „ztenčovací“ algoritmus. Tento postup je jedním z nejdůležitějších algoritmů z celé řady postupů používaných v oblasti zpracování obrázků (např. automatizovaná kontrola plošných spojů, rozpoznávání otisků prstů atd.). Postup skeletonizace snímku krystalu krevního séra je zobrazen na následujícím obrázku (obr. 4).

Pro účely klasifikace pomocí hodnocení směrového rozložení nejvýznamnějších čar v obrázku byla vyzkoušena i metoda Steinerova kompaktní [7], [8] používaná ve stereologii pro hodnocení povrchových trhlin krystalů. Ta se zde využívá pro určování nej-



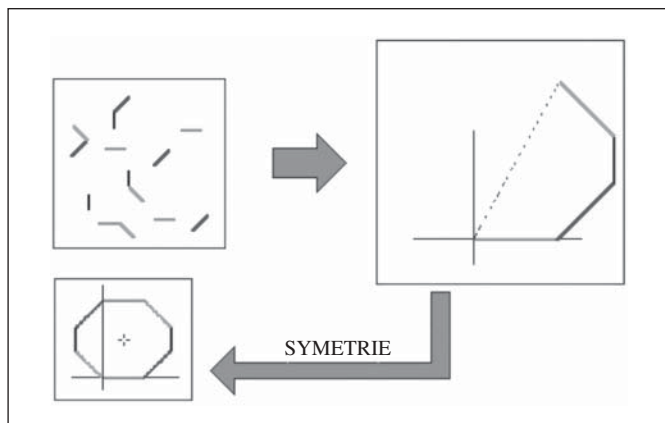
Obr. 3 Obrázek a jeho GTDM matice (zpracování ve čtyřech úrovních šedi)

Z Fourierovských spekter je vyhodnocováno mnoho tzv. spektrálních texturních charakteristik [3], [4], například rozložení energie, relativní orientace maxima energie, isotropie, entropie a různé invariantní momenty a jejich podíly [5]. Tyto momenty jsou vy-



Obr. 4 Postup skeletonizace  
 a – krystalogram, b – jeho binární podoba, c – postup ztenčování, d – výsledek postupu

vhodnější roviny řezu krystalu, protože plošné a směrové rozložení povrchových trhlin přímo koresponduje s vnitřním pnutím krystalu. Znalost vnitřního pnutí je vhodná např. pro konstrukci ultrazvukových sond používajících PZT keramiku. Touto metodou je možné statisticky stanovit nejvhodnější rovinu řezu krystalem. Metoda je založena na aproximaci tvaru povrchových trhlin jejich čárovým modelem. Výslednou směrovou růžici Steinerova kompaktu dostaneme natáčením pomyslné sítě rovnoběžek přes čárový obrázek a počítáme průsečíky přímk s čarami obrázku.



Obr. 5 Steinerův kompaktní a metody jeho konstrukce (skládání úseček se stejnou orientací)

Novou metodou je metoda tzv. „směrové entropie“ [9], která stejně jako klasifikace za pomoci Steinerova kompaktní, používá k vyhodnocování čárových obrázků a jejich směrové růžice (histogramu četností jednotlivých směrů). Tato metoda, jak již bylo zmíněno, vyžaduje konstrukci směrové růžice, graficky hodnotící četnost zastoupení jednotlivých směrů v čárovém obrázku. Samotné měření spočívá ve stanovení entropie, modifikované z původní [10] známé definice:

$$H = - \sum_{i=0}^{N-1} p_i \log p_i, \quad (1)$$

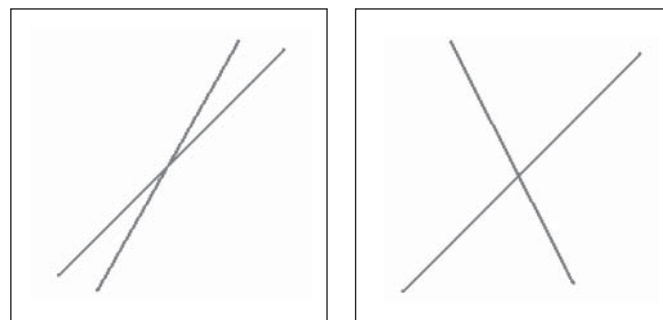
Novou entropii potom můžeme nadefinovat jako:

$$H = - \sum_{i=0}^{N-1} r(\varphi_i) \log r(\varphi_i), \quad (2)$$

pro směrově izotropické obrázky je tato entropie

$$H = - \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{N} \log \frac{1}{N} = \log(N).$$

Tento výsledek ukazuje, že čím více různých směrů sledujeme (více detailů obrázku), tím více nerovností (detailů) vidíme. V případě směrově anizotropických obrázků, kdy je jen jedna hodnota  $R(j_i)$  nenulová (tedy  $r(j_i)$  je rovno jedné jen v jednom případě (jinak vždy nula) dostaneme  $H = 0$ .



Obr. 6 Omezení metody výpočtu směrové entropie bez použití váhovací funkce - toto jsou vzájemně nerozlišitelné čárové obrázky

Omezení této definice však spočívá v tom, že nebere v úvahu relativní rozložení různých směrů. Uvažováním tohoto faktu je nutné zavést váhovací faktor  $k_i$ , jako funkci hodnotící důležitost každého z možných směrů podle úhlu  $\varphi$  a absolutního rozdílu dvou sousedních úhlů  $\varphi_{ij}$ . Tato funkce snižuje vliv směrů sobě blízkých a zvyšuje vliv úhlů „vzdálených“ o  $\pm\pi/2$ . Takovou váhovací funkci může být například  $f(\varphi) = \sin^2 \varphi$ . Výsledný vztah po dosazení bude tedy pro entropii s uvažováním váhovací funkce:

$$H = - \sum_{i=0}^{N-1} k_i r(\varphi_i) \log r(\varphi_i), \quad (3)$$

$$\text{kde } k_i = \sum_{i=0}^{N-1} r(\varphi_i) f(\Delta\varphi_{ij}) \text{ a } f(\varphi) = \sin^2 \varphi$$

Pro anizotropické obrázky dostáváme tedy, stejně jako v předchozím případě,  $H = 0$ . Tato hodnota  $H$  může být považována za měřítko neuspořádanosti obrázku (čar). Entropie  $H$  může nabývat hodnot od 0 do  $\log(N)$ . Je závislá na znalostech, které o obrázku máme - na volbě váhovací funkce  $k_i$ .

Tab. 1 Výsledky výpočtu spektrálních texturních charakteristik pro jednotlivé skupiny (3 skupiny obrázků krystalů krevního séra, sněhových vloček a dendritů v kovech)

	Krystaly NaCl			Sněhové vločky			Dendrity kovů		
	Obr 1	Obr 2	Obr 3	Obr 1	Obr 2	Obr 3	Obr 1	Obr 2	Obr 3
Čtverec vzdálenosti mezi vrcholy	62,7647	37,7464	14,6875	32,4328	37,7463	21,1429	23,14	24,42	25,25
Relativní orientace vrcholů	0,2005	0,0115	0,0603	0,0983	0,587	0,515	0,1748	0,2014	0,1963
Laplacian hlav. vrcholu	-1,71E+08	-4,59E+07	-7,39E+07	-1,72E+08	-1,70E+08	-1,67E+08	-6,14E+07	-6,87E+07	-7,48E+07
Rozložení hlavního vrcholu	1,7647	2,993	2,125	2,3183	1,9432	1,8571	1,69	1,743	1,75
Isotropie výkonového spektra	0,3608	0,4703	0,4792	0,4321	0,3843	0,402	0,2322	0,2673	0,2282
Inerc. moment, kvadrant 1	8,5765	9,0116	9,3056	7,3241	7,4223	7,5731	7,6836	8,3284	8,2836
Inerc. moment, kvadrant 2	6,8327	5,6421	7,429	5,4583	6,5453	5,9949	6,032	5,973	5,595
Poměr momentů (M2/M1)	1,278	1,6597	1,2869	1,3242	1,6524	1,4057	1,5639	1,5578	1,5197
Podíl energie v kvadrantu 1	0,3468	0,3545	0,3738	0,3723	0,3054	0,3139	0,3403	0,3816	0,3398
Podíl energie v kvadrantu 2	0,3604	0,3078	0,3825	0,3204	0,3098	0,331	0,3133	0,3407	0,3039
Podíl nenul. komponent	0,9994	0,9335	0,9999	0,9942	0,9914	0,9943	0,9645	0,9974	0,9963

Tab. 2 Hodnocení vzorků 2D statistickými metodami

	Krystaly NaCl			Sněhové vločky			Dendrity kovů		
	Obr 1	Obr 2	Obr 3	Obr 1	Obr 2	Obr 3	Obr 1	Obr 2	Obr 3
Druhý úhlový moment	0,043	0,069	0,097	0,067	0,074	0,081	0,062	0,073	0,062
Kontrast	1,763	1,296	1,079	1,045	1,237	1,421	1,375	1,315	1,328
Korelace	0,811	0,828	0,813	0,801	0,796	0,819	0,919	0,813	0,905
Rozptyl	184,6	123,4	57,4	251,4	254,7	255,4	252,4	247,1	247,7
Inverzní dif. moment	0,619	0,679	0,717	0,664	0,682	0,731	0,684	0,765	0,694
Střední suma	36,9	30	20,8	33,2	31,9	33,2	34,5	38,4	41,2
Střední rozptyl	645,5	623,7	536,3	694,3	717,3	698,5	647,2	513,4	451,9
Celková entropie	5,739	5,157	4,551	4,594	4,625	4,756	6,184	6,675	7,376
Entropie	5,217	4,701	4,267	4,334	4,555	4,454	4,654	4,809	5,017
Diferenční rozptyl	655	481,6	282,3	487,9	573,4	538,4	734,5	832,4	1120,9
Diferenční entropie	72,3	65,8	60	62,6	63,8	60,4	63,8	64,4	70,2
Měřítka korelace f12	-0,006	-0,005	-0,005	-0,005	-0,006	-0,004	-0,005	-0,004	-0,006
Měřítka korelace f13	0,883	0,893	0,874	0,854	0,864	0,794	0,91	0,875	0,95

Tab. 3 Tabulka směrových entropií

	Krystaly NaCl			Sněhové vločky			Dendrity kovů		
	Obr 1	Obr 2	Obr 3	Obr 1	Obr 2	Obr 3	Obr 1	Obr 2	Obr 3
Entropie klasická	1,175	1,175	1,175	1,176	1,176	1,175	1,176	1,176	1,175
Entropie směrová	1,178	1,177	1,178	1,181	1,182	1,182	1,191	1,193	1,19

Další z možností přímého strukturálního hodnocení dendritických obrázků je vyhodnocování jejich fraktální dimenze. Fraktální dimenze [11] je parametr množiny vyjadřující míru její členitosti. Její použití je účelné především pro reprezentaci objektů komplikovaných tvarů a dějů se složitými průběhy, jaké se často vyskytují v přírodě (tvary stromů, rozmístění hvězd na nebi,...), které nedokážeme analyticky popsat tradičními metodami. Většina geometrických výpočtů se stále provádí pomocí klasické geometrie, ale fraktální postupy jsou ve stále větší míře používány v medicíně, oblasti záznamu a přenosu dat, astronomii, biologii a dalších. Fraktální dimenze jako invariantní parametr však při výpočtu z diskretně reprezentovaného počítačového obrazu ztrácí část své vypovídací hodnoty a dá se tvrdit, že obecně ji není možné z digitalizovaného obrázku přesně určit. Námi použitá metoda Brown je tedy vlastně pouze odhadem fraktální dimenze (viz. obr. 7).

### 3. VÝSLEDKY

Nejpodstatnější část charakteristik získávaných ze spektra obrázků tvoří „spektrální texturní charakteristiky“. Pro každý vzorek dostáváme 1280 číselných údajů (20 charakteristik pro 64 výřezů 32 x 32 obrazových bodů). Každá charakteristika celého obrázku je definována jako aritmetický průměr odpovídajících charakteris-

tik jednotlivých výřezů. V tomto shrnutí je uveden vždy aritmetický průměr charakteristik pro každou skupinu. Výsledky ukazuje následující tabulka 1.

Kompletní tabulku výsledků texturních charakteristik počítaných z matic šedotónových závislostí (GTDM) shrnuje následující tabulka 2.

Všechny obrázky dendritických struktur byly zpracovány postupem pro stanovení směrové entropie s použitím váhovací funkce  $\sin^2$  pro zvýraznění navzájem kolmých úhlů (dendritická krystalizace). Pro každý obrázek byla tímto způsobem vypočítána z jeho směrové růžice klasická a směrová entropie. Charakteristické hodnoty pro jednotlivé skupiny uvádí následující tabulka 3.

Výsledky odhadu fraktální dimenze jsou prozatím ve stádiu zpracování, proto uvedeme pouze příklady obrázků sněhových vloček a jejich fraktální dimenze. Fraktální metody a jejich popis uvedeme v některém z dalších článků. Jak je zřejmé z následujícího obrázku, fraktální dimenze kolísá od 2,4 do 2,6 podle „typu“ sněhové vločky.

Pro testování jednotlivých prostředků diskriminační analýzy aplikovaných na jednotlivé charakteristiky bude možné posoudit, zda-li je daná charakteristika významná pro možnost třídění vzorků do různých skupin.



2,5819



2,4778



2,4751

Obr. 7 Fraktální dimenze pro odlišné typy sněhových vloček

#### 4. ZÁVĚR

Jedním z cílů tohoto příspěvku byl návrh nejuvhodnějších příznaků, které by dále posloužily pro třídění obrázků dendritických struktur. Jako vstup byl záměrně použit optický mikroskop, levný a dostupný přístroj, který dovoluje v dostatečné kvalitě rychle a opakovaně získávat vstupní data. Přínosné se jeví zejména strukturní klasifikační postupy. Množina metod používaných pro klasifikaci by mohla být dále rozšířena o metody zejména strukturní klasifikace obsahu obrázku, včetně metod využívajících ohebného aparátu fuzzy logiky a to buď samostatně nebo v kombinaci se statistickými metodami klasifikace textur. V této oblasti budou ještě realizovány další experimenty.

Výše zmiňované metody klasifikace obrazových dat je možné použít na libovolná obrazová data, pro vyhledávání různých struktur v obrázku, případně i jejich třídění. Významné uplatnění mohou mít tyto metody například při mapování makromolekul a krystalických struktur v biochemii a petrochemii, krystalografii, mineralogii a molekulární biologii. Metody je možné použít na různé typy mikroskopických obrazů (ultrazvukové mamogramy, kolonie rostoucích bakterií nebo virů, vyhodnocování životnosti buněk apod.).

#### Literatura

- [1] GONZALEZ, R.C., WOODS, R.E., Digital Image Processing, Addison-Wesley, 1992.
- [2] HLAVÁČ, V., ŠONKA, M., Počítačové vidění, Grada, 1992, 249 s.
- [3] PARKER, J. R., Algorithms for Image Processing and Computer Vision, John Wiley & Sons, Inc. New York, p. 357-386, 1997.
- [4] D'ASTOUS, F., JERNIGAN, M. E., Texture discrimination based on detailed measures of the power spectrum, In: Pattern Recognition Image Processing, s. 83-86, 1984.
- [5] WANG L., HE, D., Texture features based on texture spectrum, In: Pattern Recognition, Vol. 24, No 5, s. 391-399, Pergamon Press 1991.
- [6] PÖPPL, S. J., HANDELS, H., Mustererkennung 1993, DAGM- Symposium Lübeck, September 1993, Springer-Verlag, 1993, 226 s.
- [7] SAXL, I., RATAJ, J., Anizotropie povrchových trhlin v PZT keramikách, Geofyzikální ústav ČSAV, Praha, in Acta Stereologica 1992, s. 631 – 636.
- [8] SAXL, I., RATAJ, J., Estimation of direction distribution of a planar fibre system, Geofyzikální ústav ČSAV, Praha, Original scientific paper in Acta Stereologica 1993, s. 235 – 239.
- [9] BRES, S.: Contribution a la quantification des criteres de transparence et d'anisotropie par une approche globale. These de doctorat, LISPI, Equipe Reconnaissance de Formes et Vision, INSA Lyon, 1994, 117-88.
- [10] JAIN, A. K.: Fundamentals of Digital Image Processing, Prentice Hall, INC., New York, 1989, 569 s.
- [11] BARNSLEY, M. F.: Fractals everywhere. Academic Press. San Diego, 1989.

Doc. RNDr. Roman Kubínek, CSc., Ing. Jiří Vařenka, katedra experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého, Olomouc, kubinek@optnw.upol.cz, jiri.varenka@seznam.cz

## Nejvýznamnější technické veletrhy konané v 1. pololetí 2005

Ve stručném přehledu je uveden výběr nejzajímavějších mezinárodních technických a s elektrotechnikou souvisejících veletrhů pořádaných v České republice i ve snadno dostupném zahraničí. Veletrhy jsou ideálním místem k získávání technických informací o nejnovějších výrobcích a technologiích, pro navazování nových obchodních kontaktů i k prezentaci vlastní exportní nabídky. Na internetových a e-mailových adresách veletržních správ nebo jejich zástupců je možné se o jednotlivých veletržních akcích podrobněji informovat. Pro ně-

které veletrhy pořádané v Německu si lze zakoupit zlevněné vstupenky a katalogy za koruny, přihlásit se k připravovaným zájezdům nebo si objednat ubytování. Před odjezdem jednotlivců je vhodné si ověřit, zda v termínech nenastala změna nebo nevznikly náhodné chyby v údajích. O některých veletržích budou v tomto našem časopisu i jiném odborném technickém tisku uváděny další a podrobnější informace. Kalendář vybraných technických veletrhů pro celý rok 2005 je uveden také v Ročence ELEKTRO 2005.

Termín	Místo a číslo kontaktní adresy a informační internetová adresa	Název, základní nomenklatura
28. 2. – 3. 3.	Moskva – Expocentr Krasnaja Presnja (1)	<b>AQUA-THERM MOSKVA</b> – 9. mezinárodní veletrh vytápění, větrání, měřicí, sanitární a ekologické techniky, technických zařízení budov (v licenci Reed Messe Wien); <a href="http://www.msi-fairs.com">www.msi-fairs.com</a>
8. – 11. 3.	Lipsko (5)	<b>ENERTEC</b> – mezinárodní odborný veletrh energie; <a href="http://www.energie-leipzig.de">www.energie-leipzig.de</a> <b>TERRATEC</b> – mezinárodní odborný veletrh techniky a služeb pro životní prostředí; <a href="http://www.terratec.de">www.terratec.de</a>
9. – 11. 3.	Moskva – Obchodní centrum (6)	<b>RUSSIA POWER</b> – výstava a konference o nejnovějších energetických zařízeních, přístrojích, automatizaci, informacích a technologiích; <a href="http://www.techtydenik.cz">www.techtydenik.cz</a>
10. – 16. 3.	Mnichov (7)	<b>I.H.M. 2005</b> – 57. mezinárodní veletrh řemesel; <a href="http://www.ihm.de">www.ihm.de</a>
10. – 16. 3.	Hannover (8)	<b>CeBIT</b> – 19. mezinárodní veletrh kancelářské, informační a telekomunikační techniky; <a href="http://www.cebit.de">www.cebit.de</a>

15. – 17. 3.	Stuttgart (9)	<b>EMV 2005 STUTTGART</b> – mezinárodní veletrh o elektromagnetické kompatibilitě s konferencí; <a href="http://www.e-emv.com">www.e-emv.com</a>
15. – 19. 3.	Frankfurt (10)	<b>ISH</b> – mezinárodní odborný veletrh technického zařízení budov a energetiky; <a href="http://www.ish.messefrankfurt.com">www.ish.messefrankfurt.com</a>
16. – 17. 3.	Stuttgart (9)	<b>MESSTECHNIK IN STUTTGART</b> – veletrh měřicí techniky ve výrobě, laboratořích, elektrotechnice a elektronice, komunikační a senzorové technice i životním prostředí; <a href="http://www.messweb.de/stuttgart">www.messweb.de/stuttgart</a>
5. – 8. 4.	Praha – PVA Letňany (11)	<b>AMPER 2005</b> – 13. mezinárodní veletrh elektrotechniky a elektroniky; <a href="http://www.terinvest.com">www.terinvest.com</a>
11. – 15. 4.	Hannover (8)	<b>HANNOVER MESSE</b> – světový vedoucí veletrh technologií, inovací a automatizace, sestaven z deseti samostatných specializovaných veletrhů; <a href="http://www.hannovermesse.de">www.hannovermesse.de</a> <b>Factory Automation + Interkama</b> – výrobní automatizace <b>Motion, Drive &amp; Automation</b> – pohony a automatizace <b>Digital Factory</b> – integrované výrobní procesy <b>MicroTechnology</b> – mikrosystémová technika <b>Research &amp; Technology</b> – výzkum a technologie <b>Energy</b> – energetické hospodářství, energetika a obnovitelné zdroje energie <b>ComVac</b> – stlačený vzduch a vakuová technika <b>SurfaceTechnology mit Powder Coating Europe</b> – úprava povrchů, pokovování a práškové nanášení <b>Subcontracting</b> – dodávky a dohody <b>Industrial Services &amp; Equipment</b> – průmyslový servis a služby
12. – 14. 4.	Mnichov (7)	<b>SEMICON EUROPA 2005</b> – 29. mezinárodní evropský veletrh polovodičů, materiálů a služeb; <a href="http://www.semi.org.de">www.semi.org.de</a>
14. – 15. 4.	Štýrský Hradec (1)	<b>POWER DAYS GRAZ</b> – informační dny o elektrotechnických výrobcích, instalacích a servisu; <a href="http://www.power-days.at">www.power-days.at</a>
14. – 16. 4.	Praha – PVA Letňany (11)	<b>INTEC 2005</b> – 1. mezinárodní veletrh informační a telekomunikační techniky <b>CREATIVE 2005</b> – 1. mezinárodní veletrh zvukové, obrazové a osvětlovací techniky; <a href="http://www.terinvest.com">www.terinvest.com</a>
19. – 21. 4.	Norimberk (9)	<b>SMT/HYBRID/PACKAGING 2005</b> – systémové integrace a mikroelektronika; <a href="http://www.mesago.de">www.mesago.de</a>
19. – 23. 4.	Brno (12)	<b>ELEKTRO 2005</b> – 2. mezinárodní veletrh elektroinstalací, osvětlovací techniky a systémové integrace budov; <a href="http://www.bvv.cz/elektro">www.bvv.cz/elektro</a> <b>IBF</b> – 10. mezinárodní stavební veletrh <b>SHK BRNO 2005</b> – 6. mezinárodní veletrh technických zařízení budov <b>URBIS</b> – fórum investičních příležitostí, technologie a zařízení pro města a obce; <a href="http://www.bvv.cz">www.bvv.cz</a>
21. – 22. 4.	Salcburk (3)	<b>POWER DAYS SALZBURG</b> – informační dny o elektrotechnických výrobcích, instalacích a servisu; <a href="http://www.power-days.at">www.power-days.at</a>
21. – 27. 4.	Düsseldorf (4)	<b>INTERPACK</b> – mezinárodní veletrh balicích strojů, obalových materiálů a technologií; <a href="http://www.interpack.com">www.interpack.com</a>
25. – 29. 4.	Mnichov (7)	<b>IFAT</b> – 14. mezinárodní veletrh ochrany životního prostředí a odpadového hospodářství; <a href="http://www.ifat.de">www.ifat.de</a>
26. – 29. 4.	Vídeň (1)	<b>ENERGIE-RAUM-GEBÄUDE</b> – mezinárodní odborný veletrh technického vybavení budov (AQUA-THERM), energetika, měřicí a regulační technika, klimatizace, instalační a zabezpečovací technika; <a href="http://www.erg-messe.at">www.erg-messe.at</a>
27. – 29. 4.	Vídeň (1)	<b>POWER DAYS WIEN</b> – informační dny o elektrotechnických výrobcích, instalacích a servisu; <a href="http://www.power-days.at">www.power-days.at</a>
10. – 12. 5.	Praha – PVA Letňany (11)	<b>MACH</b> – 4. veletrh strojírenské techniky a technologií <b>FINET</b> – 3. veletrh povrchových úprav a finálních technologií <b>METAL</b> – 12. veletrh metalurgie; <a href="http://www.terinvest.com">www.terinvest.com</a>

11. – 14. 5.	Kyjev – Palác sportu (1)	<b>AQUA-THERM KIEV</b> – 7. mezinárodní veletrh vytápění, větrání, měřicí, sanitární a ekologické techniky, technických zařízení budov (v licenci Reed Messe Wien); <a href="http://www.aqua-therm.kiev.ua">www.aqua-therm.kiev.ua</a>
17. – 20. 5.	Brno (12)	<b>EMBAX PRINT</b> – 23. mezinárodní veletrh obalového, papírenského a tiskařského průmyslu, materiály, stroje, technologie; <a href="http://www.embaxprint.cz">www.embaxprint.cz</a>
24. – 27. 5.	Nitra (13)	<b>EMA 2005</b> – 5. mezinárodní výstava elektrotechniky, měření, regulace a automatizace <b>MSV NITRA 2005</b> – 12. mezinárodní veletrh strojů, nástrojů, zařízení a technologií <a href="http://www.agrokomplex.sk">www.agrokomplex.sk</a>
31. 5. – 3. 6.	Mnichov (7)	<b>TRANSPORT LOGISTIC 2005</b> – 10. mezinárodní odborný veletrh logistiky, telematiky a dopravy; <a href="http://www.transportlogistic.de">www.transportlogistic.de</a>
7. – 9. 6.	Norimberk (9)	<b>PCIM EUROPE 2005</b> – mezinárodní odborný veletrh a konference výkonové elektroniky, automatizace, řízení a pohonů; <a href="http://www.mesago.de">www.mesago.de</a>
7. – 10. 6.	Oslo (1)	<b>NOR-SHIPING</b> – příležitost pro české firmy za finanční podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR; <a href="http://www.ppa.cz">www.ppa.cz</a>
13. – 16. 6.	Mnichov (7)	<b>LASER 2005, WORLD OF PHOTONICS</b> – 17. mezinárodní odborný veletrh inovačních a užitných laserových technologií (jen pro odborníky); <a href="http://www.laser.de">www.laser.de</a>
14. – 16. 6.	Mnichov (7)	<b>FIBERCOMM</b> – mezinárodní veletrh pro optické informační a komunikační technologie (jen pro odborníky); <a href="http://www.fibercom.de">www.fibercom.de</a>
15. – 17. 6.	Norimberk (7)	<b>ELTEC 2005</b> – 26. mezinárodní odborný elektrotechnický veletrh; <a href="http://www.eltec.de">www.eltec.de</a>

#### Kontaktní adresy veletržních správ a zahraničních zástupců

- Progres Partners Advertising s.r.o.**, Opletalova 55, 110 00 Praha 1, tel.: 224 218 403, 224 234 274, fax: 224 218 312, e-mail: [info@ppa.cz](mailto:info@ppa.cz)
- INCHEBA s.r.o.**, areál Výstaviště Praha-Holešovice, 170 90 Praha 7, tel.: 220 103 111, fax: 233 379 450, e-mail: [info@incheba.cz](mailto:info@incheba.cz)
- OMNIS Olomouc a.s.**, Mgr. Petr Nasadil, Kosmonautů 8, 772 11 Olomouc, tel.: 587 433 150, fax: 585 232 097, e-mail: [nasadil@omnis.cz](mailto:nasadil@omnis.cz)
- VELETRHY BRNO a.s.**, odbor zahraničních zastoupení, Výstaviště 1, 647 00 Brno, tel.: 541 152 533, fax: 541 153 051, e-mail: [mhorakova@bv.vv.cz](mailto:mhorakova@bv.vv.cz)
- SEPP International s.r.o.**, Výhradní zastoupení Leipziger Messe pro ČR, Přemyslovská 32, 130 00 Praha 3, tel.: 222 734 483, fax: 222 734 482, e-mail: [info@leipziger-messe.cz](mailto:info@leipziger-messe.cz)
- Technický týdeník**, Nádražní 32, 150 00 Praha 5, tel.: 225 351 450, fax: 225 351 456, e-mail: [techttyd@springmedia.cz](mailto:techttyd@springmedia.cz)
- EXPO-Consult + Service s.r.o.**, Příkop 4, 604 45 Brno, tel.: 545 176 158, fax: 545 176 159, e-mail: [info@expocs.cz](mailto:info@expocs.cz) a CBT s.r.o., Staroměstské nám. 17, 110 00 Praha 1, tel.: 224 224 646, fax: 224 224 724, e-mail: [svehlova@cbttravel.cz](mailto:svehlova@cbttravel.cz)
- DEUTSCHE MESSE AG, Hannover**, zastoupení Ing. Eva Václavíková, Myslbekova 7, 169 00 Praha 6, tel.: 220 510 057, 220 517 837, fax: 220 510 057, e-mail: [info@hf-czechrepublic.com](mailto:info@hf-czechrepublic.com)
- Česko-německá obchodní a průmyslová komora**, Václavské nám. 40, 110 00 Praha 1  
Norimberk: Kamila Hlavsová – tel.: 221 490 305, fax: 224 490 332, e-mail: [messe1@dtihk.cz](mailto:messe1@dtihk.cz)  
Stuttgart: Ladislav Baxa – tel.: 221 490 326, fax: 224 490 332, e-mail: [messe-stuttgart@dtihk.cz](mailto:messe-stuttgart@dtihk.cz)
- K + M EXPO s.r.o.**, Václavské nám. 1, 111 21 Praha 1, tel.: 224 230 104, fax: 224 234 395, e-mail: [messefrankfurt@mbox.vol.cz](mailto:messefrankfurt@mbox.vol.cz)
- TERINVEST s.r.o.**, Legerova 15, 120 00 Praha 2, tel.: 221 992 133, fax: 221 992 139, e-mail: [amper@terinvest.com](mailto:amper@terinvest.com), [mach@terinvest.com](mailto:mach@terinvest.com)
- VELETRHY BRNO a.s.**, Výstaviště 1, 647 00 Brno, tel.: 541 151 111, fax: 541 153 079, e-mail: [info@bv.vv.cz](mailto:info@bv.vv.cz)
- AGROKOMPLEX-VÝSTAVNICTVO NITRA**, Výstavná 4, SK 949 01 Nitra, tel.: +421/376 572 111, fax: +421/377 335 859, e-mail: [agrokomplex@agrokomplex.sk](mailto:agrokomplex@agrokomplex.sk)

Další a podrobnější informace o veškerých veletržích (i těch, které zde nejsou uvedeny) mohou zájemci najít na internetových serverech: [www.veletrhyavystavy.cz](http://www.veletrhyavystavy.cz) a [www.veletrhyavystavy.sk](http://www.veletrhyavystavy.sk), které spravuje veletržní agentura Progres Partners Advertising s.r.o. (výše uvedená v kontaktních adresách pod číslem 1). Tyto nové přehledné servery obsahují stále aktualizované údaje o více než 2500 veletržích a výstavách v tuzemsku i zahraničí, včetně možnosti propojení na internetové stránky pořadatele.

(jpe)



# Profesor JAROSLAV POSPÍŠIL sedmdesátiletý

V únoru t.r. se dožívá sedmdesát let prof. RNDr. Ing. Jaroslav Pospíšil, DrSc., člen redakční rady našeho časopisu a profesor katedry experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.

Narodil se 19. 2. 1935 v Charvátčích u Olomouce. Postupně absolvoval gymnázium v Šumperku, matematiku a fyziku na Přírodovědecké fakultě UP v Olomouci, slaboproudou elektrotechniku na VUT v Brně a postgraduální studium optiky na Státní univerzitě v Tokiu.

V letech 1957 až 1960 působil jako pedagog na středních školách v Praze a potom v Prostějově. Od roku 1960 je zaměstnán na Přírodovědecké fakultě UP v Olomouci. Doktorát přírodních věd a vědeckou hodnost kandidáta fyzikálně-matematických věd pro obor experimentální fyzika získal v roce 1968 a v roce 1971 se habilitoval na docenta experimentální fyziky. V roce 1990 byl prezidentem republiky jmenován profesorem kvantové elektroniky a optiky a v roce 1992 získal vědeckou hodnost doktora fyzikálně-matematických věd pro tentýž obor. Ve funkčním období 1990 až 1993 byl vedoucím katedry experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty UP v Olomouci a potom do svých pětadesátin vykonával funkci vedoucího oddělení aplikované fyziky téže katedry, o jehož vznik a úspěšný rozvoj se výrazně zasloužil. Za vykonanou práci obdržel Zlatou medaili UP.

Dosavadní pedagogická činnost prof. J. Pospíšila je velmi rozsáhlá a nelze ji v krátkém sdělení detailně postihnout. Jde o vynikajícího a zkušeného vysokoškolského pedagoga, jehož přednášky jsou charakteristické neustálou a promyšlenou inovací. Jeho rozsáhlé učební texty jsou základní literaturou dnes již pro několik generací studentů.

Těž jeho činnost v rámci doktorského studia na fakultě je rozsáhlá. Je předsedou Rady doktorského studijního oboru „Aplikovaná fyzika“ a vychoval řadu doktorů Ph.D. a RNDr. pro disciplíny Přístrojová fyzika a metrologie, Aplikovaná fyzika, Biofyzika a Obecná fyzika a matematická fyzika. Je též členem Rad doktorských studijních oborů „Obecná fyzika a matematická fyzika“ a „Optika a optoelektronika“, Kolegia fyziky na PŘF UP a bývá předsedou nebo členem komisí pro habilitační docentská řízení a pro profesorská řízení z fyziky.

Odborná a vědecká činnost prof. J. Pospíšila je hlavně zaměřena na aktuální problémy analýzy a měření přenosových, šumových a informačních signálových vlastností optických, fotografických, elektrooptických a vizuálních analogových i digitálních soustav. Je autorem nebo spoluautorem několika původních nebo modifikovaných měřících metod optického, elektronického a počítačového zaměření pro interpretaci, hodnocení a rozpoznávání struktury a kvality optického obrazu s vědeckým i aplikačním významem.

Jeho odborná aktivita je nejlépe patrná z původních vědeckých publikací, kterých je dnes kolem dvěstěpadesátí, a to v tuzemských i zahraničních



časopisech a sbornících - například *Jemná mechanika* a optika, *Acta UP* – řada fyzika, *Czechoslovak Journal of Physics*, *Optik*, *Optica Applicata*, *Optica Acta*, *Journal of Modern Optics*, *Optics Communications*, *Optical Engineering*, *Central European Journal of Physics*, *Proceedings of SPIE*. Prof. J. Pospíšil byl vedoucím řešitelem nebo spoluřešitelem několika etap státních výzkumných úkolů z fyziky a optiky, úkolů z praxe a grantových projektů FRVŠ MŠ a GA ČR. Jako vedoucí řešitel ukončuje v současnosti pětiletý Výzkumný záměr MŠM 153100007 „Přístrojové centrum fyzikálního a chemického výzkumu na PŘF UP v Olomouci“. Při tom úzce spolupracuje s fyzikálními a chemickými pracovišti fakulty a se Společnou laboratoří optiky UP a FZÚ AV v Olomouci.

Řada jeho vědeckých prací je citována v českých i cizojazyčných publikacích a je též prezentována v některých bibliografiích - například *Kdo je kdo v ČR*, *Kdo je kdo v české a slovenské fotonice*, *Who's Who in Science and Engineering* (Marquis, USA), *Dictionary of International Biography* (IBC Cambridge, England), *2000 Outstanding Scientists of 20th and 21st Century* (IBC Cambridge, England), *International Directory of Distinguished Leadership* (ABI, USA), *The Contemporary Who's Who of Professionals* (ABI, USA).

Z tradičních aktivních účastí prof. J. Pospíšila v řadě profesních institucí, organizací, komisí a výborů lze například uvést jeho minulou úspěšnou práci v rámci pracovních skupin fyziky při Akreditační komisi ČR, FRVŠ MŠM, GA AV a GA ČR. Je též znám z Jednoty československých a českých matematiků a fyziků, jejímž členem je od roku 1960 a v níž zastával různé funkce. Od ní obdržel několik čestných uznání, vyznamenání za vynikající pedagogickou práci a jí byl též jmenován zasloužilým a později i čestným členem. Byl též členem Vědeckého výboru poradců Amerického institutu ABI, Českého komitétu Mezinárodní unie pro čistou a aplikovanou fyziku IUPAP, České společnosti pro vědeckou kinematografii a místopředsedou Českého komitétu Mezinárodní komise pro optiku ICO. V současnosti pracuje ve výboru české a slovenské sekce Mezinárodní společnosti pro optické inženýrství SPIE/CS, je členem Česko-Slovenské společnosti pro fotoniku, České společnosti pro metrologii a Divize pro kvantovou elektroniku a optiku při Evropské fyzikální společnosti. Od roku 1972 je úspěšným odborným redaktorem periodických sborníků *Acta Universitatis Palackianae Olomucensis* – řada *Physica*.

Prof. J. Pospíšil je stále vzorem pracovitosti v pedagogické a ve vědecké oblasti. Je též neúnavným propagátorem fyziky, optiky i elektroniky.

Redakce i redakční rada našeho časopisu rádi připomínají odborné veřejnosti životní jubileum prof. J. Pospíšila, které je příležitostí k poděkování jubilantovi za jeho prospěšnou práci pro náš časopis.

*Redakce*

## Světový CeBIT v Hannoveru

Na světě největší přehlídky vyspělosti informační a telekomunikační techniky jsou Mezinárodní veletrhy a konference CeBIT, pořádané každoročně veletržní společností Deutsche Messe AG, Hannover na 12 místech světa. Ten největší a nejzajímavější z nich – CeBIT HANNOVER 2005 se bude konat ve dnech 10. až 16. března 2005.

Ve všech 27 výstavních halách na užité výstavní ploše 323 627 m<sup>2</sup> umístí své expozice 6224 vystavovatelů ze 70 zemí, z nichž bude 3188 z tuzemska a 3036 ze zahraničí s plochou 86 620 m<sup>2</sup>. Největší počet vystavovatelů ze zahraničí bude mít Taiwan 726, Čína 241, Velká Británie 196, USA 194, Jižní Korea 183, HongKong 148, Nizozemí 126, Itálie 88, Rusko 72, Francie 72, Švýcarsko 69, Belgie 61 a Švédsko 60. Za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR se zúčastní na výstavní ploše 892 m<sup>2</sup> také 29 českých firem.

Základní témata veletrhu je rozdělena do tří hlavních částí. Jsou to **Business Processes** s řešeními a službami pro rozvoj a optimalizaci obchodních procesů založených na informačních technologiích, **Communications** s telefonii pevných, mobilních i dalších sítí a **Digital Equipment and Systems** s počítačovou, pamětovou, kancelářskou a zábavní technikou.

Dalšími výstavními oblastmi jsou **Banking & Finance** prezentující zařízení a technické vybavení bank včetně kompletního řešení pro oblast finanční a úvěrovou, **Future Parc** s řešeními pro vědu a výzkum, **Public Sector Parc** s řešeními pro řízení a správu obce, státu i dalších veřejných institucí a **Planet Reseller** pro obchodníky z oblasti informačních technologií, telekomunikací, zábavní elektroniky, fotografie a kancelářských potřeb. Středem zájmu bude také kompletní prezentace obchodních procesů využívajících plně informační technologie, rozmanitost použitých nových řešení komunikací i sblížení informačních technologií a zábavní elektroniky.

Na veletrhu CeBIT HANNOVER 2005 bude i mnoho dalších zajímavých prezentací s různými tématy. Zájmem o ně mohou najít podrobnější informace na internetových stránkách [www.cebit.de](http://www.cebit.de). O zvýhodněných možnostech návštěvy veletrhu, nákupu katalogů a vstupenek se lze informovat u zástupce veletržní správy Deutsche Messe AG, Hannover, Ing. Eva Václavíková, Myslbekova 7, 169 00 Praha 6, tel./fax: 220 510 057, [www.hf-czechrepublic.com](http://www.hf-czechrepublic.com), e-mail: [info@hf-czechrepublic.com](mailto:info@hf-czechrepublic.com).

*(jpe)*

# DIOPTRA VYRÁBÍ NEJEN BRÝLOVÉ ČOČKY

Kromě nosného programu výroby brýlových čoček, DIOPTRA a. s. Turnov rovněž vyrábí a prodává široký sortiment ručních a stojánkových lup bez osvětlení i s osvětlením, se zvětšením 1,5 x až 12,0 x a s průměry čoček 12 až 180 mm. Dalším sortimentem jsou speciální a ochranné brýle, binokulární lupy, rovněž i různá svítidla pro zdravotnictví, průmysl i domácí použití.

V oblasti přesné zakázkové optiky DIOPTRA a. s. vyrábí speciální čočky pro automobilový a letecký průmysl, přesné kulové

a rovinné plochy, optické filtry, kondenzory do průměru 300 mm, skleněné pyramidy, krychle, koule, těžítka a dárkovou optiku.

Dovolujeme si Vám zde stručně představit část tohoto sortimentu výrobků, který lze použít ve výrobním a kontrolním procesu, zdravotnictví, zlatnictví a všude tam, kde je potřeba dobře vidět.

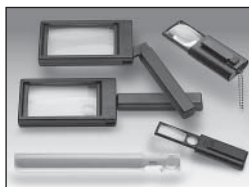
Bližší informace naleznete na [www.dioptra.cz](http://www.dioptra.cz)



**D 033 - 036**  
Lupy ruční - sklo, plast



**D 062 - 064**  
Lupy ruční - s osvětlením



**D 054 - 058**  
Lupy ruční obdélníkové



**D 093 - 095**  
Lupy Fresnelovy



**D 096 - 099**  
Lupy vyšívací



**D 200 - 203 - Lupy bankovní a Brinellovy**



**D 204 - 206**  
Lupy asférické



**D 223 - 226**  
Lupy v kůži



**D 250 - 253**  
Lupy technické - sklopné



**D 270 - 273**  
Lupy barokní



**D 284**  
Čelní binokulární lupy



**D 300 - 302 - Lupy stoján.**  
110 mm bez osvětlení



**D 311 - 313 - Lupy stoján.**  
40 x 90 mm bez osvětlení



**D 373 - 374**  
Stojánky k lupám



**D 350 - 360 - Stojánky a výtokové pohárky**



**D 400 - 411 - Lupy stoján.**  
180 mm s osvětl. i bez



**D 430 - 439 - Lupy stoján.**  
110 mm s osvětlením



**D 470 - 472 - Lupy stoján.**  
110 mm s hal. osvětlením



**D 415 - 418 - Lupy stoján.**  
120 mm se zářivk. osvětl.



**D 600 - 602 - Hal. svítidla**  
vyšetřovací - 200 mm



**D 640 - 649 - Hal. svítidla**  
kuželová - 50 mm



**D 640 A - 649 A - Halog.**  
svítidla výkonná - 80 mm



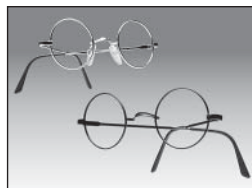
**D 673 - 675 - Zářivková**  
svítidla ke zdravot. lůžkům



**D 665 - 667 - Hal. svítidla**  
přenosná pro automobily



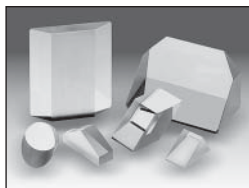
**D 689**  
LED - diodová svítidla



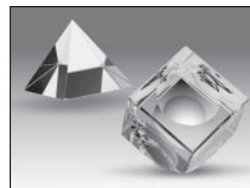
**D 503 - 508**  
Brýlové obruby Lennon



**D 280 - 281**  
Brýlové binokulární lupy



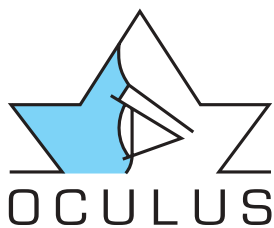
**D 700 - 705**  
Optické hranoly



**D 750 - 752**  
Krychle a pyramidy



**D 780 - 782 - Globusy**  
a těžítka i s osvětlením



## OCULUS – VÁŠ SPOLEHLIVÝ DLOUHOLETÝ PARTNER PRO DODÁVKY OFTALMOLOGICKÝCH A OPTICKÝCH PŘÍSTROJŮ

Pardubická 765, 500 04 Hradec Králové, tel./fax: 495 531 140, 495 531 145,  
e-mail: oculus@oculus.cz

### DODÁVÁ

přístroje, nástroje a zařízení pro oftalmologii a oční optiku od firem:  
OCULUS, NIDEK, Kaps, Neitz, Ocular Ins.

### VYŠETŘOVACÍ PŘÍSTROJE

- Vyšetřovací jednotky
- Foroptery automatické, manuální
- Projektory optotypů
- Oftalmometry, keratometry
- Štěrbinové lampy stolní
- Fotoštěrbinové lampy
- Autorefraktometry, autokeratometry, autorefraktokeratometry-stacionární i ruční
- Fokometry okulárové, projekční, automatické
- Fundus kamery
- Rohovkový topograf
- Pentacam – analyzátor předního segmentu oka
- Pachycam – bezkontaktní pachymetr s keratometrem

### ORTO-PLEOPTIKA, OFTALMOSKOPY, PŘÍSTROJE NA ZKOUŠKU ZRAKU, LUPY

- Brýlové skříně, zkušební obruby
- Páskový, kruhový skiaskop (retinoskop), skiaskopické lišty
- Prismatické lišty, prismata
- Oftalmoskopy síťové, akumulátorové, bateriové
- Indirektní binokulární oftalmoskopy
- Lupové brýle
- Mesotest
- Anomaloskop Heidelberg Multi Color
- Binoptometr
- Dětský H-test
- Počítačové perimetry
- Tonometry bezkontaktní, aplanační, Schiötzův)
- PD metr

### ULTRAZVUKOVÁ DIAGNOSTIKA

- Echoscan US-3300 A-B-Cv-Scan

- Echoscan US-1800 A-Scan-biometrie
- Pachymetr UP-1000

### OPERAČNÍ MIKROSKOPY

- SOM 12
- SOM 22, 32
- SOM 62

### CHIRURGICKÉ PŘÍSTROJE

- Fakoemulzifikační systém CV-7000
- SDI BIOM pro zadní vitrektomii

### MIKROCHIRURGICKÉ NÁSTROJE

#### LASERY

- Kombi YAG lasery
- Diodový laser
- YAG laser
- Excimer laser
- Krystalový laser GYC-1000

#### ČOČKY

- Laserové
- Vitrektomické
- Gonioskopické
- Goniotomické
- Diagnostické

Vypracování nabídky na přání zákazníka dle konkrétních požadavků na vybavení. Vystavujeme na OPTA 2005 v Brně stánek č. 85, PAVILON B. Servis zajištěn firmou OCULUS ČR - servisními pracovníky vyškolenými u výrobce.

Na první straně obálky je OCULUS PACHYCAM - přístroj na změření tloušťky a zakřivení rohovky v centru nekontaktní metodou a přepočtu tlaku v závislosti na těchto hodnotách.

## Technický slovník naučný, 7. svazek, R-Š



Projekt Technického slovníku naučného se chýlí ke konci, právě vyšel 7. svazek zpracovávající písmena R-Š. Kniha má 540 stran, obsahuje asi 500 černobílých ilustrací a barevnou přílohu, stojí 490 Kč.

Poslední svazek vyjde Technického slovníku naučného vyjde v polovině letošního roku. Celé dílo tak zahrne v osmi svazcích 43 000 hesel. Slovník zachycuje současnou techniku, včetně souvisejících teoretických oborů a technologií. Obrací se k zájemcům o rychlou, kvalitní a aktuální informaci, zdůrazňuje novinky, ale neopomíjí ani historii jednotlivých oborů a technických objevů.

Technický slovník naučný je původní autorskou prací, na jeho vzniku se podílí kolektiv více než 200 externích autorů a konzultantů z řad vysokoškolských pedagogů i odborníků z praxe.

Vychází za podpory některých vysokých škol technického směru a od 4. svazku je částečně financován Grantovou agenturou ČR.

Knihy dostanete v knihkupectvích nebo v našem nakladatelství. Prodáváme za hotové, na fakturu nebo na dobírku, zájemce může naše nakladatelství navštívit osobně, nebo mu knihy pošleme na základě telefonické či faxové objednávky, případně objednávky na našich internetových stránkách.

**Najdete nás na adrese:** Encyklopedický dům, s.r.o., Prvního pluku 8-10, 186 00 Praha 8, tel.: 224 918 831, fax: 224920576,  
e-mail: encdum@encyklopedie.cz, www.encyklopedie.cz

# CONTENTS

## Objective representation and diagnostic interpretation of glaucomatous changes of the optic disc using image analysis

(F. Pluháček, J. Pospíšil) ..... 35  
A typical symptom of glaucoma is the rise and progression of the pallor area within the optic nerve head (optic disc, papilla) on the human eye fundus. These changes can be objectively detected and suitably numerically represented in the form of the characteristic vector using the computer image analysis process proposed and described in this article. Next, two new methods for subsequent evaluation of obtained numerical data are presented. These methods are based on the analytical approximation of probability densities of one selected component of the characteristic vector and on the complex evaluation of the entire characteristic vector using a suitable artificial neural net. The relevant diagnostic results are presented in the form of a diagnostic classification of investigated eyes into three classes with different probabilities of glaucoma occurrence. Moreover, a proposal of the objective determination of the glaucoma damage degree of the affected eye is presented. All described methods are verified and compared using the set of 480 color digital images of healthy and glaucomatous optic discs.

## Shack-Hartmann sensor application in ophthalmology

(V. Kollárová) ..... 42  
Shack-Hartmann sensor has found an important place in the region of wavefront analysis - especially in the active and adaptive optics. It enables to determine aberrations of optical system and so it is a basis for finding the appropriate correction. In the last years it has been used for study of aberration of the human eye - in aberrometry. In this article the importance of aberrometry and its use in ophthalmology are mentioned. Adaptive optics and its possibilities in ophthalmology are further described.

## Professor Delong in his eighties (B. Lencová, L. Frank) ..... 45

## Optimizations of optics of an electron-beam welding machine

(P. Jánský, B. Lencová, J. Zlámal) ..... 46  
The paper describes numerical calculations of thermionic electron gun with hairpin filament of an electron-beam welding machine and optimization of its electron optical system. It describes new method used in program EOD for determination of space-charge effect on emitted current and on electron trajectories in the gun.

## Computation of aberration coefficients by fitting and their use for calculation of current density in beams (M. Oral) ..... 49

The paper describes a method of calculation of aberration coefficients by

regression (fitting). A prerequisite for the calculation is knowledge of an analytical expression of optical aberrations, which is used not only for fitting, but also for a fast computation of particle positions behind an optical system, e. g. for evaluation of a beam profile. The method is illustrated on computation of current density profiles in a deflected ion beam.

## Low-voltage transmission electron microscope

(P. Štěpán) ..... 52

## Design and Realization Two-dimensional Rotarily Symmetrical Transparent Structures Utilized for Testing, Calibration and Comparative Measuring Realized by Means of the Digital Rotational Microphotometer (J. Hrdý) ..... 53

This article describes design two-dimensional transparent structures by means of a computer and realization ones by means of the laser printer OKIPAGE 14ex. The article contains too mathematical description of design transparent structures. These structures are assigned for the digital rotational microphotometer of the module conception with optical separation of control signals.

## The tools of digital image analysis for classification of dendritic structures (J. Vařenka, R. Kubínek) ..... 58

There are many kinds of dendritic crystal types in the nature. For example we can adduce fern leaves or lovely dendritic crystallized snowflakes. Dendritic crystallization can be observed by iron on special conditions, not only salt solutions building typical dendritic crystals in the viscous environ. It is suitable to have sufficient tools giving us capability to classify the dendritic crystallization by its structure. The aim of this contribution is to introduce and to approach the possibilities of various points of dendritic crystals views. The second one object is to introduce other procedures of finding the most effective classification signs and dendritic crystal classification methods.

## The most significant technical fairs hold in the first

half year 2005 (jpe) ..... 62

## Professor Jaroslav Pospíšil septuagenary

(Editorial board) ..... 65

World CeBIT in Hannover (jpe) ..... 65

Dioptra produces not only spectacle lenses (jpe) ..... 66

OCULUS - Your solid confirmed partner ..... 67

Technical thesaurus, Vol. 7, R-Š ..... 67

Technical and consumer trades in the fair (jpe) ..... 68

## Technická a spotřební řemesla na veletrhu



Ani nejvyspělejší průmyslová výroba nemůže vytvořit vše, musí ji doplňovat nebo nahrazovat nejrozličnější řemesla. Jednotliví odborní řemeslníci sami nebo v malých kolektivech vyrábějí různé předměty i potraviny, poskytují služby, instalují, udržují a opravují různá zařízení.

**Na novém výstavišti v Mnichově od 10. do 16. března 2005** bude veletržní společnost GHM – Gesellschaft für Handwerksmessen mbH pořádat na světě největší, již 57. kontraktačně-prodejní veletrh technických a spotřebních řemesel I.H.M. 2005, na kterém bude přes 1700 vystavovatelů prezentovat nové vývojové tendence, progresivní techniku, široké spektrum zboží z malých i středních podniků a také řemeslnické služby pro každého. Veletrh je oborově rozdělen na technickou a spotřebitelskou část.

Expozice budou umístěny ve 12 halách s výstavní plochou asi 120 000 m<sup>2</sup>. Za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR se na veletrhu I.H.M. 2005 v oficiální účasti představí již podesáté Česká republika.

V technické části je nabízeno elektrické ruční nářadí, malá mechanizace, stroje a zařízení pro opracování a zpracování kovů, umělých hmot,

dřeva, skla a keramiky. Dále zahrnuje vybavení dílen a skladů, dopravní prostředky, potřeby pro motoristy, autoopravárenskou techniku, řemeslnou techniku a malou mechanizaci pro stavbu i výstavbu, upevňovací prostředky, bezpečnost práce a ochranu životního prostředí, ukázky výstavby obytných domů, vybavení zahrad, zahradní stroje, nástroje a potřeby, informační a komunikační techniku, vybavení kanceláří.

V samostatné expozici, zaměřené na energetické hospodářství a životní prostředí, bude poradenská služba o náhradních zdrojích energie a tepelná technika s izolačními materiály pro snížení ztrát tepla. Na předním místě budou opět nejmodernější solární kolektory, o které mají stále větší zájem domácnosti, neboť zdarma poskytují polovinu potřebné energie pro ohřev užitkové vody.

Podrobnější informace o dění na výstavišti lze najít na internetu [www.ghm.de](http://www.ghm.de). Zájemci o návštěvu mohou získat levnější vstupenky a katalogy, objednat vhodné ubytování i přihlásit se k připravovaným zájezdům u oficiálního zástupce veletržní správy EXPO-Consult + Service s.r.o., Příkop 4, 604 45 Brno, tel.: 545 176 158, fax: 545 176 159, e-mail: [info@expocs.cz](mailto:info@expocs.cz).

(jpe)