

## Sledovanie parametrov kvality pomocou spracovania obrazu a nepriameho merania

Marcela Čarnogurská a Ján Terpák<sup>1</sup>

### *Monitoring of quality parameters using the image processing and the indirect measurement*

*This article presents the utilization of image processing within the quality control in the last phase of the production of the pipes – the measurement their diameter. The method is realized by using the laser ray projected on the pipe and consequently scanned with the CCD camera. To enable the measurement, a calibration is necessary by a calibration device. The final light lines are extracted and processed by using the image processing technology with the Matlab software. The Matlab recognizes the image and counts the real pipe diameter. Using the statistical methods the density of defective dimensions of pipes diameters is finally defined. These approaches are documented by illustrative examples.*

**Key words:** *image processing, quality control, control chart, non-direct measurement.*

### Úvod

Techniky spracovania obrazu sú neoddeliteľnou súčasťou merania v oblasti automatickej kontroly povrchov materiálov. Umožňujú rýchlo, presne a spoľahlivo vyhodnocovať kvalitu parametrov produktov, triediť ich podľa rôznych kritérií, alebo priamo riadiť technologický proces.

Tradičný prístup k výrobe vychádza zo závislosti výroby, ktorá vytvára produkt a riadenia kvality, kde sa má konečný produkt skontrolovať a vytriediť nezhodné produkty, ktoré nespĺňajú požadované špecifikácie. Táto stratégia je neekonomická, pretože sa kontrola uskutočňuje až keď výroba prebehla. Miesto toho je oveľa účinnejšie získavať informácie o výrobnom procese a priebežne pôsobiť alebo zasahovať. Súčasný prístup teda preferuje prevenciu pred detekciou.

Norma STN ISO 8252:1995 Shewhartove regulačné diagramy definuje štatistickú kontrolu výrobného procesu ako napomáhanie k dosiahnutiu a udržaniu výrobného procesu na prípustnej a stabilnej úrovni tak, aby sa zaistila zhoda výrobkov a služieb so špecifikovanými požiadavkami.

Netypickým spôsobom posudzovania úrovne kvality produktu je získavanie dát zo systému merania (kamery a lasera), ktorým je možné zistiť, či je produkt vytvorený štatisticky zvládnutým a pod kontrolou realizovaným procesom a následne prostredníctvom regulačných diagramov vyhodnotený.

### Výhoda zvyšovania kvality

Požiadavky na 100 % výstupnú kvalitu produkcie nútia výrobcov zabezpečovať nielen to, že sa minimalizuje vznik chýb, ale aj to, že ak predsa chyba vznikne, nesmie opustiť bránu podniku. Aplikovaná ľudská kontrola je aj napriek všetkým opatreniam neobjektívna a často aj sama zdrojom problémov.

Zjednodušene by sme mohli povedať, že spracovanie obrazu je technológia, ktorá umožňuje bezkontaktným optickým spôsobom získať, vyhodnotiť dáta a z nich určiť či boli dosiahnuté požadované parametre. Z hľadiska pracovného procesu tvorby daných produktov sú tieto technológie merania navrhované ako samoúčelné uzavreté celky, zakomponované v danom mieste do procesu.

### Ortogonalna metóda najmenších štvorcov

Existujú rôzne metódy získavania a následného spracovania dát. Ortogonalna metóda najmenších štvorcov je modifikáciou klasickej Gaussovej metódy najmenších štvorcov, pričom modifikácia vychádza z predpokladu, že pre minimalizáciu rozdielu súčtu štvorcov neuvažujeme vertikálne vzdialenosti medzi množinou bodov a prekladanou závislosťou, ale uvažujeme kolmé vzdialenosti medzi bodmi a ich modelom. Podporiť túto myšlienku môže niekoľko argumentov (Bednárová, 2007):

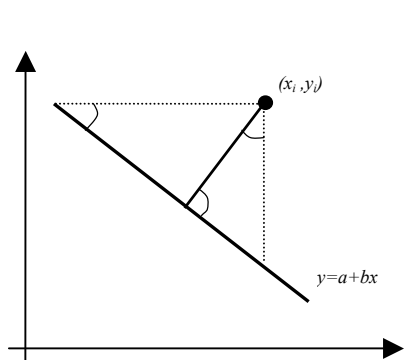
1. Najkratšia (kolmá) vzdialenosť je najprirodzenejší pohľad na akékoľvek prekladanie bodov nejakou funkciou.
2. Suma kolmých vzdialeností je nezávislá na voľbe systému súradníc.

<sup>1</sup> Ing. Marcela Čarnogurská, Doc. Ing. Ján Terpák, CSc., Technická univerzita v Košiciach, Fakulta BERG, Ústav riadenia výrobných procesov, Boženy Němcovej 3, 043 54 Košice.  
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 11. 4. 2007)

3. Závislosť na voľbe vysvetľovanej a vysvetľujúcej premennej, tzv. kauzalita, t.j. príčina a následok nemajú vplyv na výpočty parametrov (matematický postup), teda napr. pri lineárnej regresii neexistujú regresne združené priamky .
4. Implementácia metódy ortogonálnej regresie nie je závislá na počte premenných.

Možnosť použitia ortogonálnej metódy najmenších štvorcov ilustruje nasledujúci príklad:

Označme vysvetľujúcu premennú  $x$  a vysvetľovanú ako  $y = f(x)$ . Pre tieto premenné je odvodený vzťah pre výpočet parametrov modelu použitím ortogonálnej metódy najmenších štvorcov, pričom sa minimalizujú kolmé vzdialenosti  $d_i$  medzi nameranými dátami a predpokladaným hľadaným modelom priamky:  $y = a + bx$  (obr. 1), ktoré možno vyjadriť nasledujúcim funkcionálom:



$$R = \sum_{i=1}^n |d_i|.$$

Obr. 1. Znáznornenie ortogonálnej vzdialenosti  $d_i$ .  
Fig. 1. The orthogonal distance  $d_i$  representation.

Metóda ortogonálnej regresnej metódy sa využíva pri hľadaní najlepších možných matematických modelov, ktoré aproximujú množinu meraných dát. Možné využitie ortogonálnej regresie je hlavne pri modelovaní procesov, 3D objektov, pri optimalizácii, v riadení kvality, v spracovaní obrazu a zvuku, atď.

### Vlastný vektor a vlastná hodnota

Základným matematickým aparátom použitým v metódach výpočtu parametrov ortogonálnej regresie je vlastný vektor matice  $\mathbf{A}$  a jej odpovedajúca vlastná hodnota.

Nech  $\mathbf{A} = (a_{ij})$  je štvorcová matica typu  $n \times n$ , kde  $a_{ij} \in R$ , pre všetky  $i, j \in (1, 2, \dots, n)$ . Číslo nazývame vlastnou hodnotou matice  $\mathbf{A}$ , ak sústava lineárnych rovníc tvaru:

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v} \Leftrightarrow (\mathbf{A} - \lambda\mathbf{E})\mathbf{v} = 0, |\mathbf{v}| = 1,$$

má okrem triviálneho riešenia aj nenulové riešenie, čo závisí od  $\mathbf{A}$  a  $\lambda$ .

Vektor  $\mathbf{v}$  sa nazýva vlastným vektorom matice  $\mathbf{A}$  k vlastnej hodnote  $\lambda$ . Jedná sa o homogénnu sústavu lineárnych algebraických rovníc pre zložky vektora  $\mathbf{v}$ . Z teórie (O'Leary, 2004) vieme, že rovnica  $(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{E})\mathbf{v} = 0$  má vždy jedno z riešení  $\mathbf{v} = 0$ .

Aby táto sústava rovníc mala nenulové riešenie, tak matica  $(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{E})$  musí byť singulárna, čo nastane, keď determinant sústavy sa rovná nule, t.j.  $\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{E}) = 0$ .

Tento vzťah je polynomiálna rovnica pre neznámu  $\lambda$ , tzv. charakteristická rovnica matice  $\mathbf{A}$ . Korene charakteristickej rovnice matice  $\mathbf{A}$  nazývame charakteristické hodnoty matice  $\mathbf{A}$ . Takáto rovnica ale nemusí mať požadované reálne riešenie. Platí, že vlastné vektory symetrickej matice k rôznym vlastným hodnotám sú navzájom ortogonálne.

Vzhľadom k tomu, že v  $n$  - rozmerných priestoroch sa použitie metódy ortogonálnej regresie javí ako jeden z najvhodnejších spôsobov získania matematického modelu, je potrebné zaoberať sa náhradnými metódami získavania primeraných matematických modelov. Tu môžeme spomenúť napríklad metódu Singular Value Decomposition (SVD) alebo Principal Component Analysis (PCA), kde sa využíva práve minimalizácia účelovej funkcie, pričom sú uvažované ortogonálne (kolmé) vzdialenosti ako najkratšie vzdialenosti medzi nameranými dátami a hľadaným matematickým modelom, ktorý ich aproximuje.

## Metóda Singular Value Decomposition

Metóda Singular Value Decomposition (singulárny rozklad hodnôt) je ortogonalizačný proces, ktorý vedie ku dekompozícii matice  $\mathbf{D}$  na jej ľavé a pravé singulárne matice  $\mathbf{U}$  a  $\mathbf{V}$ , ktoré sú ortogonálne a diagonálnu maticu  $\mathbf{S}$ , ktorá obsahuje singulárne hodnoty také, že platí (O'Leary, 2004):

$$\mathbf{D} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T.$$

Vo všeobecnosti budeme uvažovať SVD metódu, kde ak  $\mathbf{D}$  je matica  $m \times n$ , potom  $\mathbf{U}$  je matica  $m \times m$ ,  $\mathbf{S}$  je diagonálna matica typu  $n \times m$  a  $\mathbf{V}$  je matica typu  $n \times n$ . Ak  $\mathbf{D}$  je reálna  $m \times n$  matica, potom ortogonálne matice

$$\mathbf{U} = [u_1 \dots u_m] \in R^{m \times m}, \|\mathbf{U}\| = E$$

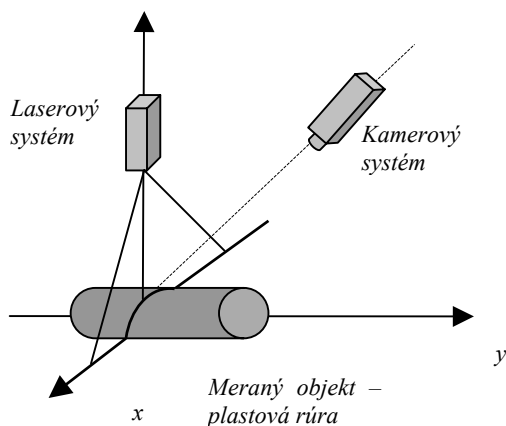
$$\mathbf{V} = [v_1 \dots v_n] \in R^{n \times n}, \|\mathbf{V}\| = E$$

existujú také, že

$$\mathbf{U}^T \mathbf{D} \mathbf{V} = \mathbf{S} = \text{diag}\{\sigma_1 \dots \sigma_p\} \in R^{n \times m}, p = \{m, n\},$$

kde hodnosť matice  $\mathbf{D}$  je počet nenulových singulárnych hodnôt:  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p \geq 0$ , pričom splnenie tejto podmienky zaručuje jednoznačnosť riešenia.

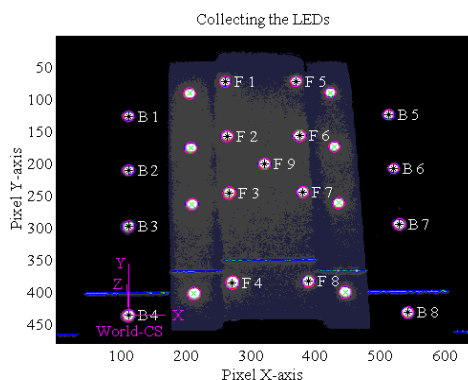
## Proces merania



Prostredníctvom kamerového a laserového zostavenia, ktoré je zobrazené na obrázku 2, je realizované meranie priemeru plastovej rúry. Laser vysiela laserové lúče na meranú plastovú rúru, ktorá je následne snímaná CCD kamerou (Čarnogurská, 2006).

Obr. 2. Zostavenie systému merania.  
Fig. 2. Measurement system composition.

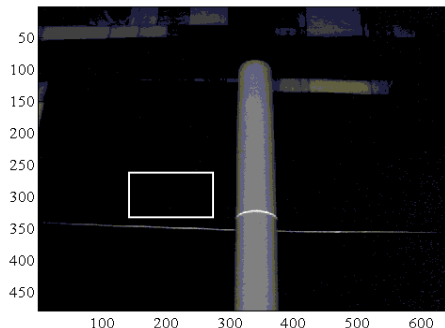
Pred začiatkom merania je realizovaná kalibrácia kamery, a to pomocou kalibračného terčika, ako je to znázornené na obrázku 3. Pre kalibráciu bol použitý software naprogramovaný Kollerom a Schalkom (Koller, Schalk 2003). Po tejto kalibrácii dostaneme kalibračnú maticu, ktorú ďalej použijeme pri spracovaní nasnímaných obrázkov, ktoré sú priebežne ukladané do pamäte počítača.



Zosnímanie objektu je realizované kamerou a uložené prostredníctvom programu EtherCam do počítača a následne spracované v prostredí programu Matlab.

Obr. 3. Kalibrácia.  
Fig. 3. Calibration.

Povrch meranej rúry je zosnímaný kamerou s laserovým lúčom a bez laserového lúča. Pri praktickom meraní je použitá CCD EtherCam kamera Neuricam a zelený laserový líniový projektor (3V). Uskutočňuje sa meranie, kde sa presne kurzorom vymedzí oblasť objektu, kde laserový lúč pretína meraný predmet, ako je to zobrazené na obrázku 4.



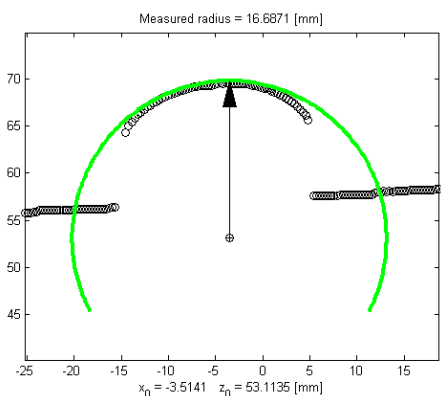
Obr. 4. Výber oblasti merania.  
Fig. 4. Measurement area selection.

Každú polhodinu sa uskutočnilo 5 meraní pri celkovom počte 20 výberov. Predpísané medzné hodnoty sú 17,7870 mm a 14,8850 mm. V tabuľke 1. sú vypočítané skupinové výsledné charakteristiky (Čarnogurská, 2006).

Tab. 1. Výsledné skupinové charakteristiky polohy a variability.

Tab. 1. Result group characteristics of position and variability.

Výsledné charakteristiky					
Skupina k	Priemer $X_j$ [mm]	Rozpätie $R_j$ [mm]	Skupina k	Priemer $X_j$ [mm]	Rozpätie $R_j$ [mm]
1	16,22476	1,0024	11	16,85840	1,0141
2	16,22022	0,9464	12	16,97094	1,4152
3	16,39694	1,4725	13	16,56752	1,0464
4	16,57218	1,5114	14	16,49378	0,6423
5	16,41594	1,7443	15	16,93484	1,3043
6	16,29616	0,8065	16	16,72438	1,1133
7	16,48892	1,0467	17	16,91086	1,4506
8	16,95730	0,5587	18	16,97422	1,2668
9	16,88148	0,8704	19	16,59100	0,9658
10	16,37534	0,7229	20	16,51254	0,7080



Po ohraňení meranej oblasti rúry je zo získaných dát vypočítaný priemer objektu, ako je to na obrázku 5, v prostredí programu Matlab.

Obr. 5. Nameraný priemer.  
Fig. 5. The measured radius.

### Proces vyhodnocovania

Na základe hodnôt nameraných priemerov sa realizuje vyhodnocovanie. Podľa normy pre konštrukciu Shewhartových regulačných diagramov sa odporúča merať výrobky v približne rovnakých intervaloch a v skupinách, ktoré sa skladajú z rovnakého výrobku, ktorý má rovnaké merateľné jednotky a rovnaký počet hodnôt v každej podskupine (STN EN ISO 8258:1995, 1993).

Cieľom bolo zhodnotiť správanie výrobného procesu a prípadne jeho reguláciu z hľadiska dosahovaných parametrov tak, aby výrobný proces splnil špecifikované požiadavky. Bol použitý regulačný diagram pre meranie, a to pre  $x_p$  (priemer) a pre  $R$  (rozpätie). Pre tieto typy diagramov sa predpokladá, že vo

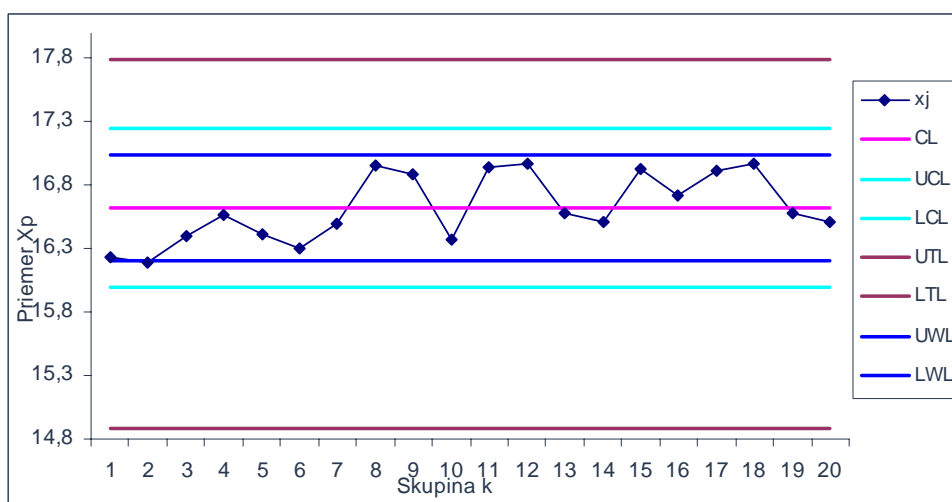
vnútri výberu má sledovaný znak kvality normálne (Gaussovo) rozdelenie a odchýlky od toho predpokladu budú ovplyvňovať účinnosť diagramu.

Z hodnôt (tab. 1) boli vypočítané základné parametre, potrebné pre vynesenie čiar (CL, LCL, UCL) do regulačných diagramov. V tabuľke 2 sú hodnoty parametrov pre centrálnu priamku, dolné a horné regulačné medze, ktoré boli následne vynesené do grafu, obr. 6.

Tab. 2. Základné parametre regulačných diagramov.

Tab. 2. The basic parameters of Shewhart control charts.

Regulačný diagram pre priemer [mm]		Regulačný diagram pre rozpätie [mm]	
CL	16,618386	CL	1,0804500
UCL	17,241806	UCL	2,2840713
LCL	15,994966	LCL	0



Obr. 6. Regulačný diagram pre priemer.

Fig. 6. Control chart for the average.

Pri regulačnom diagrame pre priemer sú doplnené aj predpísané tolerančné medze  $\langle LTL - UTL \rangle$ , a to  $\langle 14,8850 \text{ mm} - 17,7870 \text{ mm} \rangle$ , pomocou ktorých môžeme určiť spôsobilosť výrobného procesu, ako schopnosť trvalo dosahovať vopred stanovené kritériá kvality, a to cieľovú hodnotu ukazovateľa kvality, mieru variability okolo cieľovej hodnoty a umiestnenie všetkých hodnôt v tolerančnom intervale. Okrem hodnotenia spôsobilosti procesu je potrebné venovať pozornosť aj hodnoteniu spôsobilosti výrobných zariadení, prostredníctvom ktorých sa dáta pre hodnotenie spôsobilosti procesu získavajú. Nemenej dôležitá je aj spôsobilosť meracieho zariadenia, ktorá charakterizuje vhodnosť pre meranie určitého znaku kvality v danom rozpätí. Pri analýze spôsobilosti procesu sa využívajú informácie o znakoch kvality produktov, ktoré v procese vznikajú. V prípade merateľných znakov sa na hodnotenie spôsobilosti používajú indexy spôsobilosti.

Úlohou indexov spôsobilosti procesu je jednoducho vyjadriť vzťah medzi cieľovou hodnotou  $T$ , špecifikačnými medzami  $LTL$ ,  $UTL$  a skutočnou strednou hodnotou  $\mu$  a štandardnou odchýlkou  $\sigma$  nameraných hodnôt vybraného znaku kvality hodnoteného procesu (Benková, 2006).

**Index spôsobilosti  $C_p$**  je mierou potenciálnej schopnosti procesu zaistiť, aby sledovaný znak kvality ležal vo vnútri tolerančných hraníc. Charakterizuje možnosti dané variabilitou procesu. Jeho nevýhodou je, že neberie do úvahy stred rozdelenia nameraných hodnôt vzhľadom k požadovanej cieľovej hodnote  $T$  a vyžaduje zadanie oboch tolerančných medzí. Výpočet indexu  $C_p$  pre realizované meranie je:

$$C_p = \frac{UTL - LTL}{6\sigma} = 0,73.$$

Hodnota  $C_p < 1$  udáva, že spôsobilosť procesu sa nedodržiava. Pásmo skutočnej variability predstavované hodnotou  $6\sigma$  je širšie ako pásmo dovolenej variability predstavované rozdielom hornej a dolnej tolerančnej hranice. Je potrebné v tomto meraní prehodnotiť rozsah toleračného pásma.

**Index spôsobilosti  $C_{pk}$**  zohľadňuje nielen variabilitu, ale aj umiestnenie hodnôt sledovaného znaku kvality v tolerančnom poli, t.j. centrovanie. Charakterizuje teda skutočnú spôsobilosť procesu dodržiavať predpísané tolerančné medze. Počíta sa zo vzťahu:

$$C_{pk} = \min\left\{\frac{UTL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LTL}{3\sigma}\right\} = \min\{0,873 \quad 0,589\} = 0,589.$$

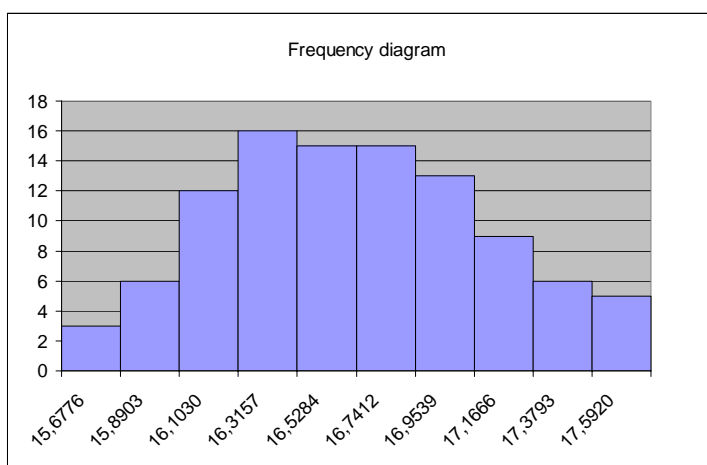
Hodnota  $C_{pk} < 1$  hovorí, že sa jedná o nespôsobilý výrobný proces. Nevýhoda indexu je, že ak sa  $\mu$  vzdialuje od  $T$  a nemení sa  $\sigma$ , zhoršuje sa  $C_{pk}$ , ale ak je odchýlka  $\mu$  od  $T$  kompenzovaná zmenou  $\sigma$ ,  $C_{pk}$  nedodrží cieľovej hodnoty  $T$  nezachytí. Ďalšou nevýhodou indexu  $C_{pk}$  je, že ak cieľová hodnota  $T$  neleží v strede tolerančného pásma, nezachytí jej odchýlku od skutočnej strednej hodnoty procesu, čo však nie je tento posudzovaný prípad.

**Index spôsobilosti  $C_{pm}$**  odstraňuje nedostatky indexov  $C_p$  a  $C_{pk}$  a dobré vlastnosti si ponecháva. Porovnáva maximálne prípustnú variabilitu sledovaného znaku kvality určenú šírkou tolerančného pásma s jeho skutočnou variabilitou okolo cieľovej hodnoty  $T$ . Zohľadňuje variabilitu hodnôt sledovaného znaku kvality a mieru dosiahnutia optimálnej hodnoty. Vypočíta sa zo vzťahu:

$$C_{pm} = \frac{UTL - LTL}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} = 0,498.$$

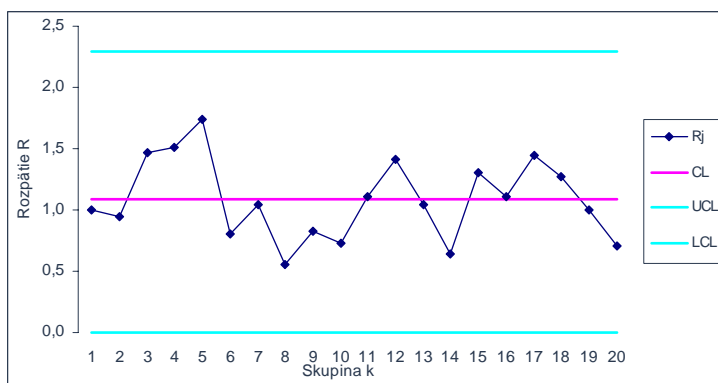
Výraz  $\sigma^2 + (\mu - T)^2$  je mierou priemernej kvadratickej straty spôsobenej nedodržaním podmienok kvalitnej výroby. Keď sa zväčšuje štandardná odchýlka a stredná hodnota sa vzdialuje od cieľovej hodnoty, menovateľ indexu rastie a hodnota  $C_{pm}$  klesá.

Indexy spôsobilosti predpokladajú normálne Gaussovo rozdelenie. Namerané hodnoty boli testované na normalitu. Ako je vidieť na nasledujúcom obrázku 7, hodnoty majú normálne Gaussovo rozdelenie. Meranie nebolo ovplyvnené žiadnymi vonkajšími vplyvmi, ale ľudským faktorom. Preto pri prvej skupine piatich



meraní sú viditeľné veľké odchýlky v porovnaní s ostatnými skupinami. Z tohto dôvodu aj vypočítané indexy spoľahlivosti vykazujú nespôsobilosť procesu, ktorá je hlavne zapríčinená príliš širokým intervalom tolerančného pásma a realizáciou úvodných meraní, kde nie je zabezpečená opakovateľnosť merania.

Obr. 7. Histogram absolútnych početností.  
Fig. 7.. Absolute frequencies histogram.



Shewhartove regulačné diagramy sú realizované stále dvojicou diagramov. K diagramu pre priemer je ilustrovaný na obrázku 8 aj regulačný diagram pre rozpätie.

Obr. 8. Regulačný diagram pre rozpätie.  
Fig. 8. Control chart for the range.

Z tohto regulačného diagramu je vidieť, že žiadna hodnota nepresahuje hornú a ani dolnú regulačnú medzu UCL a LCL.. Môžeme skonštatovať, že z hľadiska variability je výrobný proces v ustálenom a požadovanom stave, čiže je štatisticky zvládnutý.

### Záver

Na základe teoretickej analýzy spracovania obrazu a kontroly kvality bolo vykonané praktické meranie.

Na obrázkoch je možné vidieť použitie CCD kamery a laserového čiarového projektora. Výpočty boli realizované v programe Matlab a získané výsledky boli štatisticky spracované pomocou Shewhartových regulačných diagramov.

Popísaný postup umožňuje diagnostikovať prostredníctvom nepriameho merania skutočné požadované rozmery a je teda vhodný pre nedeštruktívnu diagnostiku.

### Literatúra - References

- Bednárová, D.: Metóda ortogónálnej regresie a jej využitie v modelovaní a riadení, *Pisomná práca k dizertačnej skúške, TU Košice, F BERG, 2007.*
- Benková, M.: Analýza spokojnosti zákazníka s produktom v kontexte s analýzou spôsobilosti procesov. *Habilitačná práca, Košice. TU Košice, F BERG, 2006.*
- Čarnogurská, M.: Metodológia posudzovania kvality vybraných parametrov produktov, *Pisomná práca k dizertačnej skúške, TU Košice, F BERG, 2006.*
- Floreková, L., Benková, M.: Štatistické metódy, *TU Košice, F BERG, 1999.*
- Koller, N., Schalk, P.: Ethern cam calibration software. Institute for Automation, *University of Leoben. Austria. 2003.*
- O'Leary, P., Pernkopf, F.: Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces, *NDT&E international*, vol. 36, pp.609-617. 2003
- O'Leary, P.: Fitting Geometric Objects for metric Vision: A tutorial. *Internal documentation. 30. July 2004, Leoben.*
- STN EN ISO 9001:2000 Systémy manažérstva kvality. Požiadavky. *Slovenský ústav technickej normalizácie, apríl 2001.*
- STN EN ISO 10012:2003 Systémy manažérstva merania. Požiadavky na meracie procesy a meracie zariadenia. *Slovenský ústav technickej normalizácie, október 2004.*
- STN EN ISO 8258:1995 Shewhartove regulační diagramy. Český normalizační institut, *Praha, 1993.*