



Michal Varchola
Kamil Madáč

Úvod

Dôvod prečo systémový prístup má taký veľký význam je, že v súčasnej dobe sa v rôznych oblastiach ľudskej činnosti stretávame s veľmi zložitými problémami. Keď sa snažíme pochopiť a cieľavedome meniť ľubovoľné zložené celky, ktoré sú vytvorené postupným pripájaním ďalších a ďalších relatívne jednoduchších systémov k pôvodnému celku, zistíme, že jednotlivé časti týchto zložitých celkov sa samostatne správajú úplne inak ako vo vnútri daného celku. Preto pri riešení daných problémov je potrebné tieto javy chápať komplexne, vo všetkých ich vnútorných a vonkajších súvislostiach (systémový prístup).

Systémový prístup by však mal byť zameraný hlavne na odhalenie zjednocujúcich a integračných vlastností celku, na úkor vzájomne závislých častí, ktoré tento celok tvoria. Integračné vlastnosti systému spôsobujú práve to, že systém ako celok (teda komplexný systém) má synergický efekt – dosahuje vyššiu efektívnosť ako je súčtová efektívnosť jeho častí. Preto súčasná veda neinterpretuje uvedené zložené celky ako oddelené objekty, izolované jeden od druhého, ale ako určité systémové zoskupenia, teda zložené systémy. Tieto sa skladajú z viacerých podsystémov, ktoré sú charakterizované ich typickými vlastnosťami [2]. Ak uvažované podsystémy spolupracujú, hovoríme, že medzi podsystémami existujú vzájomné väzby. V prípade, že sa tieto väzby zrušia, resp. vzájomné väzby budú slabšie ako vonkajšie väzby (väzby podsystémov s okolím systému), zložitý systém sa rozpadne na niekoľko samostatných a izolovaných podsystémov, čím sa poruší jeho celistvosť.

Preto pri systémovom prístupe projektovania výrobných liniek treba mať vždy na zreteli, že úlohy týkajúce sa vypracovania progresívnej technológie, navrhovania progresívnej výrobnéj techniky a automatizácie technologických procesov treba skúmať ako problém zvýšenia miery celistvosti zloženého systému, akým výrobná linka je [5]. Problémom však zostáva, ako kvantifikovať uvedenú mieru celistvosti výrobných liniek, ako porovnávať úroveň systémovosti, komplexnosti, resp. systémovosti prístupu pri projektovaní výrobných liniek, pretože o takom prístupe sa veľa hovorí, ale praktické realizácie sú zriedkavé.

Niektorým otázkam z uvedenej problematiky je venovaný tento príspevok.

Hodnotenie stability kvality produkcie výrobných liniek prostredníctvom informačnej entropie

Pôsobením vonkajších vplyvov na výrobnú linku sa menia parametre technologického toku, preto finálne výrobky nebudú absolútne rovnaké. Čím menšie bude množstvo vonkajších vplyvov pôsobiacich na výrobnú linku, resp. čím menej bude výrobná linka citlivá na tieto vplyvy, tým menej sa bude meniť technologický tok, a tým stabilnejšia bude kvalita produkcie. Preto za jednu zo základných vlastností výrobných liniek možno považovať stabilitu kvality produkcie ako faktor celostnosti zloženého systému (výrobnej linky).

Stabilitu kvality produkcie možno vypočítať podľa vzťahu [6]:

$$\eta_y = 1 - \frac{H_y}{H_{\max}} \quad (1)$$

- kde η_y – stabilita ukazovateľa kvality produkcie na výstupe y -teho podsystému výrobnéj linky,
 H_y – entropia zodpovedajúca rozloženiu hodnôt ukazovateľa kvality produkcie,
 H_{\max} – maximálne možná entropia zodpovedajúca zákonu normálneho rozdelenia.

Budeme sa zaoberať jedným z ukazovateľov kvality produkcie $x(t)$ (základný rozmer charakterizujúci polovýrobok, ktorý meriame na výstupe podsystému danej výrobnéj linky). Pri meraní zistíme, že $x(t)$ sa náhodne mení. Považujeme ho za jednu realizáciu náhodného procesu $X(t)$. Pre určitý čas t alebo jeho časť prejde tento náhodný proces do náhodnej premennej X .

Predpokladajme, že X je diskretná náhodná premenná, ktorá môže mať konečný počet hodnôt x_1, x_2, \dots, x_n . Entropia meraného ukazovateľa kvality produkcie na výstupe podsystému v čase t je entropia diskretnéj náhodnej premennej [3]:

$$H_t(X) = - \sum_{i=1}^n p_{t,i} \cdot \log_2 p_{t,i} \quad (2)$$

- kde $p_{t,i}$ – pravdepodobnosť, že meraný ukazovateľ kvality produkcie na výstupe podsystému má v čase t hodnotu x_i .

Index t pri entropii H_t a pravdepodobnosti $p_{t,i}$ znamená, že tieto parametre sú funkciami času. Entropia diskretnéj náhodnej premennej X v čase t závisí teda len od:

- počtu n hodnôt tejto náhodnej premennej,
- pravdepodobností týchto hodnôt,
- času t , v ktorom vykonávame meranie uvedených hodnôt.

V prípade, že sú dva možné výsledky, teda $n = 2$ (ukazovateľ kvality produkcie „vyhovuje – nevyhovuje“) vzťah (2) bude mať tvar [3]:

$$H = -p \cdot \log_2 p - (1-p) \cdot \log_2 (1-p) \quad (3)$$

Maximálna hodnota entropie sa dosiahne vtedy a len vtedy, keď $p_1 = p_2 = \dots = p_n = 1/n$. Minimálna hodnota entropie sa dosiahne vtedy a len vtedy, keď jedna z hodnôt $p = 1$, pričom ostatné hodnoty pravdepodobnosti sa rovnajú nule.

Miera celistvosti výrobných liniek

Miera celistvosti systému závisí od hodnôt reprezentujúcich stabilitu ukazovateľa kvality produkcie na výstupe podsystémov η . Ak stabilita ukazovateľa kvality produkcie na výstupe každého podsystému sa rovná 1 (maximálna hodnota), potom miera celistvosti celého systému sa taktiež rovná 1. V tomto prípade ide o optimálne organizovaný systém. Všeobecne mieru celistvosti výrobnéj linky pozostávajúcej z y podsystémov je možné vzhľadom na vzťah (1) určiť:

$$\theta = \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_y - (y-1) \quad (4)$$

Ak sa stabilita ukazovateľa kvality produkcie na výstupe každého podsystému rovná nule (minimálna hodnota), potom miera celistvosti celého systému sa rovná takému počtu záporných jednotiek, ktorý je o jednu jednotku menší ako počet podsystémov zložitého systému. V tomto prípade ide o samostatné a náhodne fungujúce časti, súhrn ktorých tvorí jednoduchý súčtový systém. To znamená, že v prvom prípade, t. j. v celistvom systéme, je miera celistvosti v rozsahu 0 až 1. V druhom prípade je miera celistvosti menšia ako nula, teda o takomto systéme nemôžeme ešte hovoriť ako o celistvom.

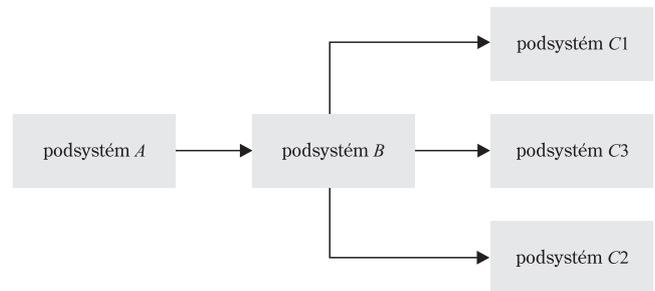
Miera celistvosti výrobnéj linky pozostávajúcej napríklad z troch podsystémov sa môže meniť od -2 do +1, a pri systéme, ktorý pozostáva z ôsmich podsystémov sa miera celistvosti môže pohybovať v rozpätí od -7 do +1.

Ak máme technologický model konkrétnej výrobnéj linky, môže sa jeho štruktúra použiť ako základ pre výpočet miery celistvosti.

Aplikácia miery celistvosti pri experimentálnom výskume automatickej výrobnéj linky A2-200

Informačné ukazovatele na určenie miery celistvosti automatickej výrobnéj linky A2-200 na vystrihovanie rotorových a statorových plechov boli získané pri experimentálnom výskume, ktorý bol uskutočnený na dvoch druhoch plechov s hrúbkou 0,65 mm s rôznym chemickým zložením [7]. Na linke sa vystrihovali plechy pre rotorové a statorové zväzky.

Väzby podsystémov tejto linky ($A, B, C1, C2$ a $C3$, na výstupe ktorých meriame kvalitu produkcie) vychádzajúc z operačného modelu automatických vystrihovacích liniek [5], je možné pri určovaní miery celistvosti znázorniť nasledovnou schémou (obr. 1).



Obr.1 Schéma väzieb podsystémov automatickej vystrihovacej linky A2-200

Štruktúra automatickej vystrihovacej linky A2-200 (obr. 1) pozostáva z nasledujúcich podsystémov:

- podsystém na prípravu polovýrobku – nekonečne dlhého rovného pásu (podsystém A),
- podsystém na vystrihovanie rotorových a statorových plechov (podsystém B),
- podsystémy na finálnu úpravu rotorových a statorových zväzkov (podsystém $C1$ a $C2$),
- podsystém na spracovanie odpadu (podsystém $C3$).

Na výstupe z každého podsystému danej automatickej vystrihovacej linky boli kontrolované informačné ukazovatele kvality produkcie podľa zadaných požiadaviek: A – tvar, rozmer a kvalita polovýrobku, B – veľkosť ostrapu vystrihnutých rotorových a statorových plechov, $C1$ a $C2$ – kvalita a rozmery nastohovaných rotorových a statorových plechov (počet výstrižkov v stožu). V podsystéme na vystrihovanie rotorových a statorových plechov (podsystém B) veľkosť ostrapu nesmie byť väčšia ako hrúbka izolačnej vrstvy (max. 0,05 mm).

Prvé vzorky boli odoberané hneď po naostrení nástroja a ďalšie sa rovnomerne odoberali v priebehu jedného dňa (v dvojsmennej prevádzke). Zistené hodnoty kvality produkcie pre všetky podsystémy boli rozdelené do dvoch intervalov, a to na vyhovujúce alebo nevyhovujúce zadaným požiadavkám. Na základe týchto výsledkov bola vypočítaná informačná entropia a stabilita kvality produkcie každého podsystému podľa vzťahov (1) a (3). Pri experimentálnom výskume určené hodnoty informačných ukazovateľov, ako aj príslušné výpočty pre každý podsystém automatickej vystrihovacej linky A2-200 sú uvedené v tab. 1.

Miera celistvosti automatickej vystrihovacej linky v súlade s jej štruktúrou (obr. 1) sa vypočíta podľa vzťahu:

$$\theta_{ABC1C2} = \eta_A + \eta_{B/A} + \eta_{C1/AB} + \eta_{C2/AB} + \eta_{C3/AB} - 4 \quad (5)$$

kde $\eta_A, \eta_{B/A}, \eta_{C1/AB}, \eta_{C2/AB}, \eta_{C3/AB}$ – stabilita podsystému A ; podsystému B vzhľadom na podsystém A ; podsystému $C1$ vzhľadom na podsystém A a B ; podsystému $C2$ vzhľadom na podsystém A a B ; podsystému $C3$ vzhľadom na podsystém A a B .

podsystem	doba hodnotenia	výberový rozsah	počet nameraných hodnôt		p_i	$1 - p_i$	$-p_i \cdot \log_2$	$-(1 - p_i) \times \log_2(1 - p_i)$	H_i	η_i
			v 1. intervale	v 2. intervale						
			A	min.						
	hod.	50	50	0	1	0	0	0	1	
	deň *	50	50	0	1	0	0	0	1	
B	min.	25	25	0	1	0	0	0	1	
	hod.	50	50	0	1	0	0	0	1	
	deň *	50	47	3	0,94	0,06	0,0839	0,2435	0,33	0,67
C1	min.	25	25	0	1	0	0	0	1	
	hod.	50	50	0	1	0	0	0	1	
	deň *	50	50	0	1	0	0	0	1	
C2	min.	25	25	0	1	0	0	0	1	
	hod.	50	50	0	1	0	0	0	1	
	deň *	50	47	3	0,94	0,06	0,0839	0,2435	0,33	0,67
C3	min.	25	25	0	1	0	0	0	1	
	hod.	50	50	0	1	0	0	0	1	
	deň *	50	50	0	1	0	0	0	1	

Tab.1 Výpočet stability kvality produkcie jednotlivých podsystemov automatickej vystrihovacej linky A2-200 (* linka pracuje na dve zmeny)

Miera celistvosti automatickej vystrihovacej linky za minútu θ_m , hodinu θ_h a deň θ_d (pri dvojsmennej prevádzke) bude:

$$\theta_m = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 - 4 = 1$$

$$\theta_h = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 - 4 = 1$$

$$\theta_d = 1 + 0,67 + 1 + 0,67 + 1 - 4 = 0,34$$

Boli vykonané tri za sebou nasledujúce série meraní, pričom aj v ďalších dvoch boli výsledky podobné. Z toho možno vyvodit nasledujúce závery:

- Automatická vystrihovacia linka A2-200 predstavuje systémovo dobre navrhnutý a celistvý systém, kde v priebehu rôznych časových intervalov je miera celistvosti vyššia ako nula.
- Pomerné široký interval hodnôt miery celistvosti od 0,34 do 1 (obr. 2) za sledované časové intervaly ukazuje, že sú určité rezervy, takže mieru celistvosti danej linky je možné v prevádzke zvýšiť.

Na zníženie miery celistvosti najviac vplyva podsystem B (a následne aj podsystem C2) – vystrihovanie rotorových a statorových plechov. V tomto podsysteme, ako už bolo uvedené, nepodarkovosť okrem iného zapríčiňuje najmä opotrebenie strižného nástroja, ktoré úmerne vplyva na veľkosť ostrapu. Opotrebenie strižného nástroja stúpa s počtom vystrihnutých výstrižkov a pri určitom počte výstrižkov (v sledovanom prípade pri vystrihnutí 240 až 250 tisíc výstrižkov) veľkosť ostrapu presiahne povolenú hodnotu.

Treba však znova podotknúť, že hodnota miery celistvosti je veľmi závislá od časového intervalu, za ktorý sa vykonáva diagnostika, ako aj od tolerancie na výstupe podsystemu. Čím je časový interval menší a väčšie tolerančné pole, tým vyššia bude hodnota miery celistvosti výrobnéj linky pri tých istých podmienkach.

Na základe číselnej hodnoty miery celistvosti možno určiť účelný smer rozvoja výrobnéj linky, pri ktorom sa miera jej celistvosti musí zvýšiť.

Smery rozvoja výrobných liniek

Na obr. 2 je znázornená závislosť strednej hodnoty stability ukazovateľa kvality produkcie na výstupe podsystemov η a počtu podsystemov y v systéme pre rôznu mieru celistvosti systému θ . Závislosť, ktorá zodpovedá miere celistvosti $\theta = 0$, tvorí hranicu medzi systémami súčtovými (pod touto závislosťou) a systémami celistvými (nad touto závislosťou).

Z obr. 2 vyplýva, že rozvoj výrobných liniek ako zložitého systému, t. j. prechod z nižšej miery celistvosti na vyššiu je dosiahnuteľný:

- optimalizáciou technologického toku (1. smer – zdokonaľovanie štruktúry, hlavne znížením počtu podsystemov),

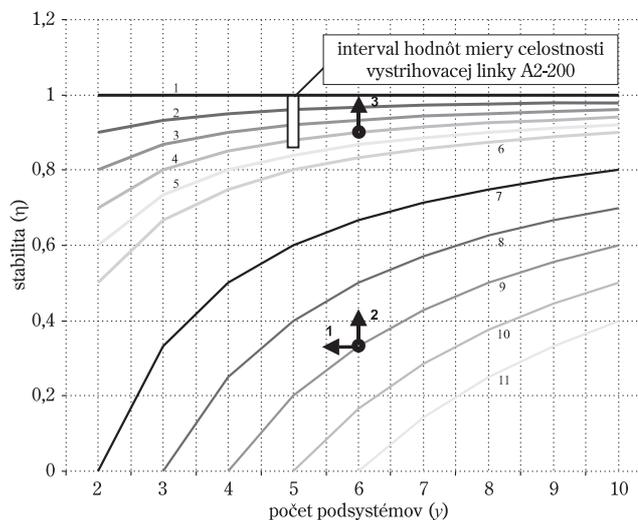
- zvyšovaním technickej úrovne výrobných strojov a zariadení (2. smer – zdokonaľovanie prvkov systému),
- automatizáciou linky (3. smer – zdokonaľovanie väzieb).

Tretí smer má zmysel vtedy, ak výrobná linka predstavuje celistvý systém, t. j. $\theta > 0$. Keď je $\theta \leq 0$. Rozhodujúci je smer 1. a 2. pri rozvoji výrobných liniek, keďže tieto predstavujú ešte len málo organizovaný súčtový systém.

Možnosti zvýšenia miery celistvosti vystrihovacej linky A2-200

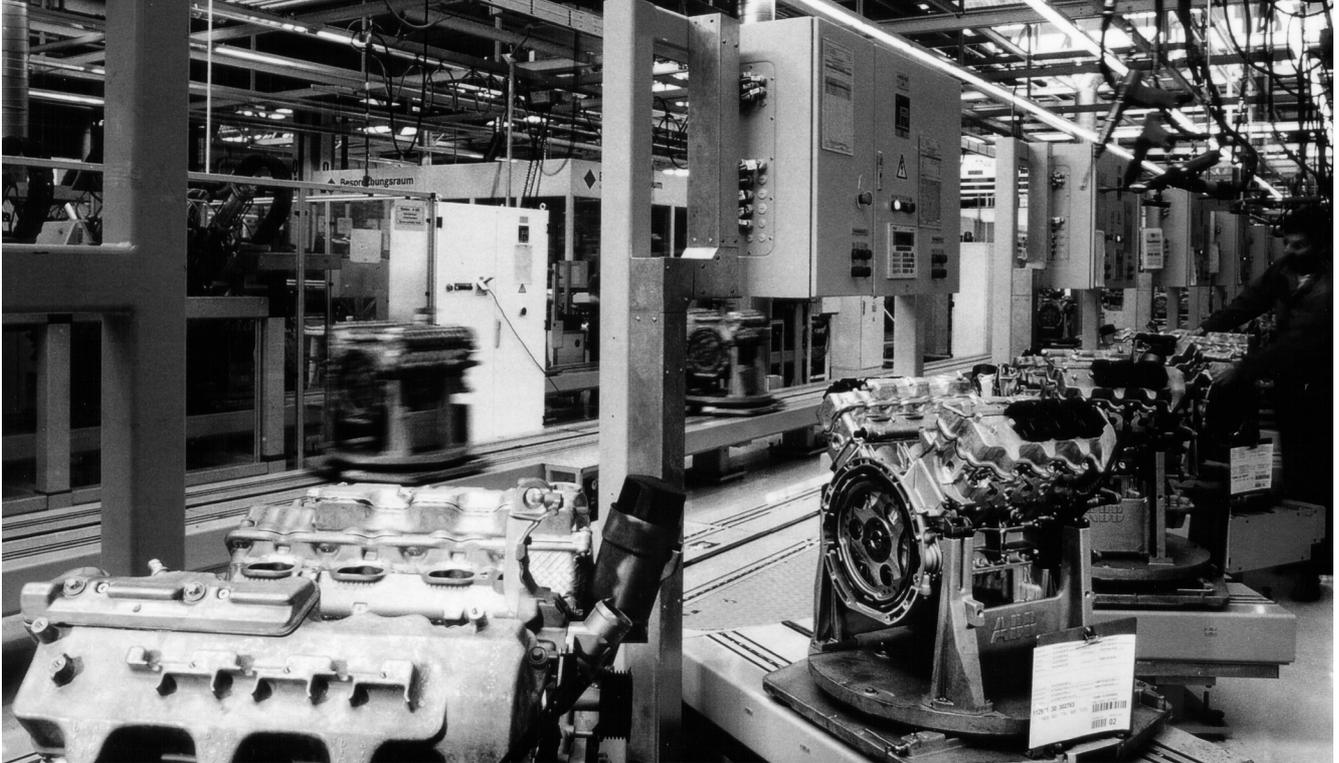
Vychádzajúc z uvedeného je zrejmé, že mieru celistvosti automatickej výrobnéj linky A2-200 možno zvýšiť:

- **V prevádzke** – využitím štatistického spôsobu riadenia kvality produkcie, pretože ide o hromadnú výrobu. Znamená to, že v dostatočnom predstihu pred vystrihnutím limitného počtu výstrižkov dá riadenie linky povel na výmenu strižného nástroja. Je pochopiteľné, že týmto opatrením sa nedá úplne odstrániť nepodarkovosť podsystemu B. Zväčšovaním doby predstihu sa môže nepodarkovosť znížiť, ale zároveň sa znižuje aj počet vystrihnutých plechov pri jednom naostrení strižného nástroja.
- **Pri rozvoji** automatickej vystrihovacej linky – vzhľadom na to, že ide už o úplnú linku, možno využiť aj tretí smer rozvoja. Ten sa týka ďalšej automatizácie linky, najmä prostredníctvom



Obr.2 Závislosť strednej hodnoty stability ukazovateľov kvality produkcie od hodnoty celistvosti pre jednotlivé závislosti:

- 1 ($\theta = 1,0$); 2 ($\theta = 0,8$); 3 ($\theta = 0,6$); 4 ($\theta = 0,4$); 5 ($\theta = 0,2$); 6 ($\theta = 0$); 7 ($\theta = -1$); 8 ($\theta = -2$); 9 ($\theta = -3$); 10 ($\theta = -4$); 11 ($\theta = -5$)



zdokonaľovania informačného toku na danej linke. Išlo by o automatické meranie veľkosti ostrapu výstrižkov, pričom pri dosiahnutí hraničnej hodnoty daného informačného ukazovateľa by riadenie linky dalo povel na výmenu strižného nástroja.

- **Pri navrhovaní** – pretože ide o celostnú linku, možno ju, resp. jej podsystemy rozšíriť o ďalšie prvky zvyšujúce jej funkčné vlastnosti. Je možné do linky zaradiť napríklad zariadenia na zväzkovanie rotorových a statorových výstrižkov (zváraním, nitovaním) po ich vystrihnutí a nastohovaní (kontrola počtu výstrižkov v jednom stohu). Tieto technologické procesy možno zameniť zväzkovaním priamo pri vystrihovaní tak, že postupový strihací nástroj v rotorových, ako aj statorových plechoch vytlačí jamky, pomocou ktorých sa nastavený počet výstrižkov pri stlačení spojí do zväzku. Skrúti sa tým technologický tok - toto predstavuje prvý smer rozvoja výrobných liniek, ale s ním však treba rátať už pri navrhovaní výrobných liniek, pretože bude obsahovať nové zariadenie a nové nástroje.

Bol predstavený prvý a tretí smer rozvoja výrobných liniek. Druhý smer rozvoja výrobných liniek, ktorý sa týka zvyšovania technickej úrovne výrobných strojov, môže byť v danej výrobných linke tiež aktuálny napr. pri použití nástrojov z vysokotvrdých materiálov (zabezpečujú vystrihovanie niekoľkonásobne väčšieho počtu výstrižkov). Vtedy je nevyhnutné zabezpečiť aj veľmi presné vedenie výkonných orgánov výrobných strojov, pretože použité nástroje môžu byť namáhané len tlakom.

Záver

- Pri navrhovaní výrobných liniek treba mať stále na zreteli, že novonavrhovaná linka nebude len jednoduchým súčtovým systémom, ale celistvým systémom, pričom jeho kvalitatívne vlastnosti budú vyššie než len súčet vlastností prvkov tvoriacich danú výrobnú linku.
- Celistvosť je dôležitou charakteristikou výrobných liniek, ktorá odzrkadľuje mieru jej organizovanosti a komplexnosti. Hodnotí sa pri diagnostike výrobných liniek alebo pri modelovaní výrobných liniek na počítači.
- Navrhnutý metodický postup kvantifikácie miery celistvosti výrobných liniek sa zakladá na aplikácii informačnej entropie a stability kvality produkcie jednotlivých podsystemov výrobných liniek, ako aj na jej vnútornej organizovanosti (štruktúre výrobných liniek).
- Číselná hodnota miery celistvosti dovoľuje účelne určiť smery rozvoja výrobných liniek, v dôsledku ktorých sa táto miera musí zvýšiť. Uvedené smery rozvoja sú spojené s optimalizáciou výrobných procesov, so zvyšovaním technickej úrovne výrobných

strojov a zariadení a so zdokonaľovaním hmotných, energetických, no predovšetkým informačných tokov prostredníctvom automatizácie výrobných liniek.

- Je ešte jeden veľmi jednoduchý „spôsob“ zvýšenia miery celistvosti výrobných liniek – zväčšiť tolerančné pole na výstupe podsystemov. Je to však iba sebaklam. Naopak, stále znižovanie tolerančného poľa stimuluje hľadanie nových technických riešení pri navrhovaní, prevádzke a rozvoji výrobných liniek.

Predložený článok je príspevkom riešenia grantového projektu VEGA č. 1/8029/01 „Systémový prístup pri projektovaní výrobných liniek“.

Literatúra

- [1] DEMEČ, P.: Presnosť obrábacích strojov a jej matematické modelovanie. Viena, Košice 2001. ISBN 80-7099-620-X
- [2] HUBKA, V.: Theorie Technischer Systeme. Springer-Verlag, Berlin 1984.
- [3] JAGLOM, A. M., JAGLOM, I. M.: Wahrscheinlichkeit und Information. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1984.
- [4] PILC, J. a kol.: Jednúčelové stroje a výrobné linky. EDIS-ŽU, Žilina 2001. ISBN 80-7100-810-9
- [5] VARCHOLA, M.: Teoria technologičeských linij. MGUPP, Moskva 1997.
- [6] VARCHOLA, M., MADÁČ, K., WESSELY, E.: The Evaluation of Integrity of Production Lines. DAAAM Scientific Book 2002, Vienna 2002.
- [7] VARCHOLA, M., MADÁČ, K.: Výpočet miery celostnosti automatickej výrobných liniek A2-200 na vystrihovanie rotorových a statorových plechov elektromotorov. In: Acta Mechanica Slovaca, Košice 1/2003. ISSN 1335-2393

doc. Ing. Kamil Madáč, CSc.

Výpočtový uzol, Strojnícka fakulta TU v Košiciach
Letná 9, 042 00 Košice
e-mail: kamil.madac@tuke.sk

Ing. Michal Varchola

Katedra výrobných techník a robotiky
Strojnícka fakulta TU v Košiciach
Boženy Němcovej 32, 042 00 Košice
e-mail: michal.varchola@tuke.sk