GENERÁCIA INTELIGENTNÝCH VÝROBNÝCH SYSTÉMOV

Ing. Lukáš Ďurica
doc. Ing. Peter Bubeník, PhD.
Katedra priemyselného inžinierstva
Žilinská univerzita v Žiline
Strojnícka fakulta
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina
e-mail: lukas.durica@fstroj.uniza.sk
Tel: +421 41 513 5077
e-mail: peter.bubenik@fstroj.uniza.sk
Tel: +421 41 513 2719

Abstract

Centralized, hierarchical and modified hierarchical control architectures usually become large rigid system with little ability to respond and adapt to the dynamic changes of external and internal stimuli. In order to achieve the necessary properties that have been set for a new generation of manufacturing systems, has been in the last two decades presented several new concepts. This generation of manufacturing systems is in [1] titled as generation of intelligent manufacturing systems.

Key words: bionic, fractal, holonic, multi-agent systems, manufacturing systems, artificial intelligence

ÚVOD

Inteligentné výrobné systémy sa dajú rozdeliť do viacerých skupín. Najčastejším príkladom býva rozdelenie podľa zvoleného prístupu a podľa metód umelej inteligencie, ktoré sú v nich použité.

Podľa zvoleného prístupu je možné inteligentné výrobné systémy rozdeliť na:

- *Bionické výrobné systémy* (Bionic Manufacturing Systems - BMS),
- *fraktálne výrobné systémy* (Fractal Manufacturing Systems - FrMS),
- *holonické výrobné systémy* (Holonic Manufacturing Systems - HMS),
- a výrobné systémy založené na *multiagentovom prístupe* (Multi-Agent Systems – MAS).

Samo-organizačné výrobné systémy, ktoré by sa dali zaradiť k inteligentným výrobným systémom [2]:

- Výroba založená na agentovom prístupe,
- výroba riadená agentami,
- genetický výrobný systém,
- náhodný výrobný systém,
- maticový výrobný systém,
- virtuálny výrobný systém,
- a iné.

Inteligentné výrobné systémy môžu využívať jednu alebo viacero metód umelej inteligencie. Tieto metódy možno rozdeliť na:

- Expertné systémy.
- umelé neurónové siete,
- genetické algoritmy,
- fuzzy logika,
- inteligentné agenty,
- a iné.

BIONICKÉ VÝROBNÉ SYSTÉMY

Slovo bionika je zložené z názvov dvoch vedných odborov a tými sú *bio*lógia a elektro*nika*. Bionika je zameraná na uplatňovanie poznatkov zo štúdia živých organizmov a ich štruktúr pri vývoji nových technológií [3].

Na bionickej teórii je založený aj bionický výrobný systém. Štruktúry a správania, ktoré sú pozorované v prírode, od bunečnej cez živočíšnu, až po úrovne spoločenstiev, v ktorých tvory spolu nažívajú, je možné aplikovať do podniku, pretože ako je uvedené v [4] „život v prírode vykazuje autonómne a spontánne správanie, ako aj sociálnu harmóniu v hierarchicky usporiadanom vzťahu“. Autonómia je žiadanou vlastnosťou entít vo výrobných systémoch, pretože zlepšuje odozvu na vnútorné a vonkajšie podnety. Namodelovaním spontánneho správania biologických štruktúr vo výrobných systémoch, by sa dosiahla ešte lepšia reakcia na neočakávané stavy. Taktiež uplatnenie sociálnej harmónie týchto biologických štruktúr do výrobných entít, by viedlo ku koordinačným a kooperačným mechanizmom medzi danými entitami.

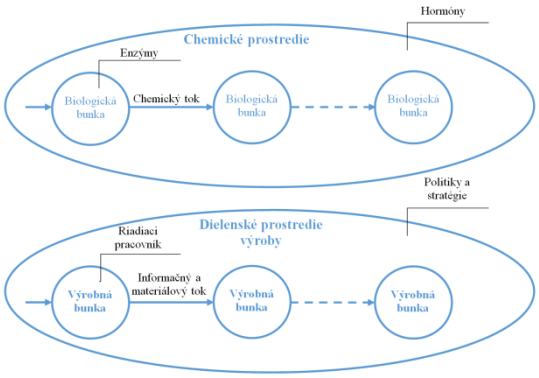
BMS vytvára paralelu medzi biologickými vlastnosťami a hlavnými požiadavkami pre budúce výrobné systémy [1]. Ako príklad môže byť uvedená biologická bunka, ktorá môže slúžiť ako báza pre bunku výrobnú.

Biologická bunka je entita, ktorá je umiestnená v chemickom prostredí. Je tvorená jedným vnútorným chemickým prostredím – cytoplazmou, jadrom bunky – nukleónom (ktorý nesie DNA a reguluje chemické reakcie vnútri bunky) a organelami, ktoré sú špecializované na rôzne funkcie [5],[6].

Stabilita vnútorného prostredia žijúceho organizmu je udržiavaná prostredníctvom rýchlosti jeho metabolických reakcií. V jeho vnútri je táto stabilita dosiahnutá enzýmami, ktoré bunka

produkuje. Tieto enzýmy sa správajú ako katalyzátory, ktoré urýchľujú alebo spomaľujú reakcie. Druhá úroveň regulácie je dosiahnutá prostredníctvom hormónov, ktoré sú vylučované bunkami a sú prepravované telesnými tekutinami do iných častí tela, kde vykonávajú špecifický fyziologický proces. Príkladom takéhoto fyziologického procesu môže byť zmena farby u niektorých zvierat ako reakcia na nebezpečenstvo. Spoločným cieľom skupiny biologických buniek je združiť sa do orgánu (napr. srdce), ktorý má špecifickú funkciu. Spoločným cieľom skupiny orgánov je vytvoriť žijúci organizmus [4],[7],[8].

Biologické bunky majú veľa spoločných vlastností s výrobnými bunkami (Obr. 1). Výrobne bunky prijímajú potrebné vstupy (materiál, rozpracované výrobky a informácie) z dielenského prostredia výroby a vykonávajú na nich výrobné operácie.



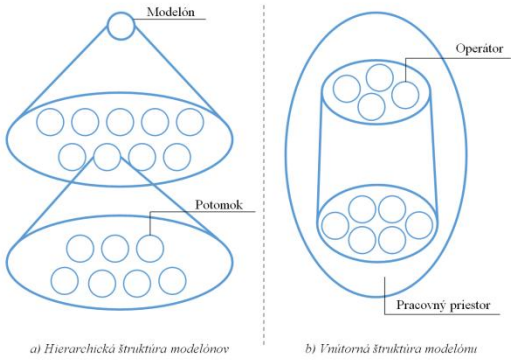
Obrázok 1: Pararela medzi biologickými a výrobnými systémami

Výstupy týchto operácii prúdia naspäť do dielenského prostredia výroby. Podobne ako to je u enzýmov, riadiaci pracovníci môžu svojím konaním zasahovať aby "zachovali harmóniu". Taktiež regulačné postupy, obdoba hormónov, môžu zahŕňať politiky a stratégie, ktoré majú dlhodobejšie vplyv, napríklad na zmeny technologických postupov [8].

Biologické bunky sú začlenené do jednotlivých orgánov. Podobne je to aj v prípade vytvárania hierarchických riadiacich architektúr ako sú dielenské, závodné a marketingové oblasti. Taktiež aj vo výrobných systémoch prichádzajú informácie, ktoré v tomto prípade charakterizujú špecifikáciu objednávky, z vyšších vrstiev, až kým sa procesom zhora-nadol nerozčlenia na jednotlivé výrobné operácie. Základom BMS je element zvaný modelón, ktorý je tvorený z modelónov nižších úrovní (submodelónov), formujúc modelón vyššej úrovne, a tvoriac tak hierarchickú štruktúru, ktorá je znázornená na obrázku 2.

Komunikačné systémy zabezpečujú výmenu informácií v modelóne, a taktiež medzi modelónmi. Informačný tok je vytvorený samo-organizačným procesom, pričom vyššie vrstvy modelónov predávajú informácie nižším vrstvám.

Vedúce alebo operátorské entity majú zodpovednosť za reguláciu a riadenie tzv. potomkov (submodelónov) a rodičovských modelónov. Zavádzajú pravidlá o organizácii a štruktúre medzi modelónmi tak, aby za pomoci kooperácie, vykonali úlohy a dosiahli spoločný cieľ celého systému.



Obrázok 2: Štruktúra modelónu

FRAKTÁLNE VÝROBNÉ SYSTÉMY

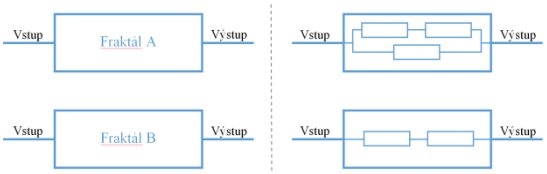
Fraktál je geometrický objekt vybudovaný pomocou rekurzie. Ide o "nepravidelný, fragmentovaný geometrický tvar, ktorý môže byť rozdelený na časti, z ktorých je každá aspoň približne podobná, zmenšená kópia celého geometrického tvaru" [9]. Táto vlastnosť tiež býva nazývaná sebe-podobnosť [10].

Nemecký profesor Warnecke aplikoval vlastnosti fraktálne geometrie na model správania entít vo výrobnom systéme. Tento koncept ponúkol nové prístupy a pohľady k zvládaniu nepružnosti a rigidite organizačných štruktúr [11],[12]. Fraktálny výrobný systém je otvorený systém, zložený z malých komponentov, známych ako fraktálne entity alebo fraktálne jednotky.

Tie majú nasledovné vlastnosti [7],[8],[11],[12]:

- Samo-organizačnosť (self-organizing), ktorá zahŕňa voľnosť vo fraktálnej organizačnej štruktúre, pričom si fraktálna jednotka môže vybrať aký typ metódy použije pri riešení daného problému, vrátane možnosti seba-optimalizácie (self-optimisation),
- dynamickosť, vďaka ktorej majú fraktálne jednotky možnosť adaptovať sa na podnety prichádzajúce z vonkajšieho prostredia, a to bez akýchkoľvek prekážok plynúcich z organizačnej štruktúry,
- sebepodobnosť (self-similarity), z ktorej vyplýva, že jedna fraktálna jednotka je navonok identická s ostatnými, ale ich vnútorná štruktúra sa môže líšiť (Obr. 3), a

taktiež, ako je uvedené v [13], ide podobnosť cieľov medzi fraktálmi.



Obrázok 3: Vlastnosť sebepodobnosti medzi fraktálmi

Okrem vyššie uvedených vlastností, je nutné aby fraktálny výrobný systém fungoval ako jednotný celok. To je dosiahnuté prostredníctvom spoluúčasti a koordinácie fraktálov, k čomu napomáha dedičný mechanizmus. Ten zaisťuje súlad cieľov [7]. Ako je uvedené v [14] fraktály sú vždy usporiadané zdola-nahor, tvoriac tak fraktály vyšších rádov. Fraktálne jednotky vyššej úrovni preberajú na seba iba tie úlohy v procese, ktoré nie je možné splniť na nižšej fraktálnej úrovni. Tento princíp zaručuje tímovú prácu a rozdelenie schopností medzi fraktálmi.

Aj v prípade tohto konceptu autonómia, ktorá plynie z aplikácie samo-organizácie, a kooperácia, ktorá je daná sebepodobnosťou, sú kľúčovými vlastnosťami tohto prístupu. V uvedenej literatúre [15] a [16] bol použitý Warneckeho koncept pre vytvorenie nového modelovacieho rámca pre výrobné systémy, kde sú fraktály usporiadané do hierarchie a skladajú sa z piatich typov funkčných modulov, konkrétne: pozorovateľ, analyzátor, riešiteľ, organizátor, a reportér. Fraktálne jednotky sú prepojené s výrobnými zdrojmi v dielenskom riadení výroby. Použitím preddefinovaných pravidiel a vnútornej znalostnej databázy, vykonávajú všetky úlohy, ktoré boli zadané dielenskému riadeniu, bez nutnosti ľudského zásahu.

HOLONICKÉ VÝROBNÉ SYSTÉMY

Holonický koncept má pôvod v práci [17], maďarského autora a filozofa Arthura Koestlera, kde pojednáva o rôznych typoch organizačných štruktúr a prichádza k záverom, že každý systém v prírode, či už biologický alebo sociálny, je postavený na hierarchickej štruktúre, v ktorej sú niektoré entity časťami väčších celkov, pričom nie je možné rozlíšiť časti a celky. A teda v jeho predstave bola definícia časti ako "niečoho nekompletného, čo samo o sebe nemá opodstatnenú existenciu" a celkov ako "niečoho kompletného, čo nepotrebuje žiadne ďalšie vysvetlenia. Koestler ešte poznamenal, že "celky a časti v absolútnom zmysle neexistujú.".

Pre opísanie základnej jednotky organizačnej štruktúry v biologických a sociálnych systémoch, Koestler navrhol termín holón, ktorý je zložený z gréckych slov "holos" (celok) a "on" (časť, častica). V sociálnej (resp. biologickej) organizačnej štruktúre sa holóny správajú "*čiastočne ako celky a celkovo ako časti*".

Koestler taktiež navrhol koncept otvorenej hierarchie (open-ended hierarchy - OEH), ako architektúry pozostávajúcu z holónov, zvanej holarchia, ktorá nie je, čo sa týka hierarchie, ohraničená smerom nadol, ani smerom nahor. OEH je postavená na podobnej štruktúre, ako je napríklad štruktúra vojenského organizačného usporiadania a to: družstvo - čata - rota - prápor - divízia a tak ďalej. Avšak na rozdiel od vojenskej organizačnej štruktúry, OEH nie je ani na jednej strane hierarchie obmedzená.

V reálnom živote má každý systém svoje vlastné časti a zároveň je časťou niečoho väčšieho. Holón je celkom, pretože sa skladá z podjednotiek (iných holónov) a zároveň je podjednotkou, ktorá je časťou väčšieho systému (ďalšieho holóna).

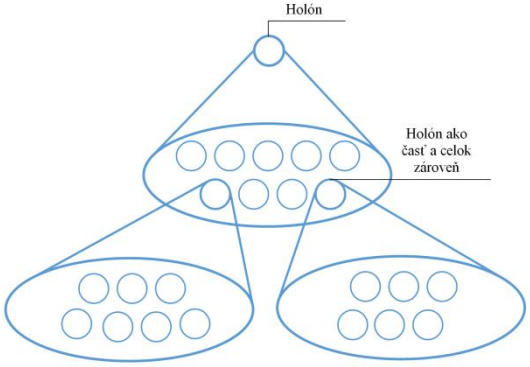
Koestler poznamenal, že biologické organizmy "predstavujú [...] ucelenú hierarchiu molekúl, buniek, orgánov a orgánových systémov", ktoré sú pri pohľade z vonkajšej strany biologickým organizmom "niečo ucelené a unikátne, celok", ale pri pohľade z opačnej strany "je to časť, základná jednotka jednej alebo viacerých sociálnych hierarchií“ [23].

Myšlienka využitia holonického konceptu vo výrobných systémoch sa objavila okolo roku 1990 minulého storočia, v programe IMS(s), ako riešenie zvládať zvyšujúcu sa intenzitu zmien, ktoré mali dopad na celý ekonomický svet vrátane sektoru výroby. HMS konzorcium (HMSC), tvorené výskumníkmi z Austrálie, Kanady, Európy, Japonska a Spojených štátov amerických, bolo založené v rámci IMS programu za účelom vývoja nástrojov pre implementáciu holonického konceptu do výrobných oblasti výroby, a dosiahnutia tak výhody holonických organizačných štruktúr, akými sú "odolnosť voči poruchám, prispôsobivosť vzhľadom na zmeny a efektívne využitie dostupných výrobných zdrojov" [18]. HMS konzorcium zaviedlo sériu pracovných definícií pre jednotlivé entity holonického systému [19]:

- *Holón* je autonómny a kooperatívny blok vo výrobnom systéme pre transformáciu, prepravu, ukladanie/skladovanie a/alebo overovanie informácií alebo fyzických objektov. Holón sa skladá z informačnej a často aj z fyzickej, procesnej časti. Holón môže byť súčasťou iných holónov.
- *Autonómia* je schopnosť entity vytvárať a riadiť realizáciu jej plánov a/alebo stratégií.
- *Kooperácia* je proces, prostredníctvom ktorého skupina entít spoločne vypracúva prijateľné plány a tieto plány aj realizuje.
- *Holarchia* je systém pozostávajúcich z holónov, ktoré dokážu kooperovať, aby

dosiahol požadovaný cieľ alebo účel (Obr. 4).

- *Holonický výrobný systém* je holarchia ktorá spája celý rad výrobných aktivít od objednávky, cez návrh, výrobu a marketing, za účelom dosiahnutia agilného výrobného podniku.



Obrázok 4: Holarchia

Holóny a holarchie pozostávajúce z holónov dokážu pracovať autonómne, z čoho je možné usúdiť, že majú určitý stupeň inteligencie a dokážu riešiť problémy na úrovni ich holarchie bez potreby dopytovania pomoci vyššej úrovne.

VÝROBNÉ MULTIAGENTOVÉ SYSTÉMY

Agent je autonómny výpočtový systém, ktorý je schopný konať v prostredí [20]. Flexibilný agent je:

- *autonómny* - koná bez priameho zásahu človeka, alebo iných entít, a riadi svoje činnosti a vnútorné stavy,
- *reaktívny* - reaguje na prostredie v ktorom sa nachádza,
- *proaktívny* - má schopnosť snahy docieliť jeho vlastné plány a ciele,
- a *sociálny* - je schopný komunikovať s ďalšími agentami pomocou jazyka.

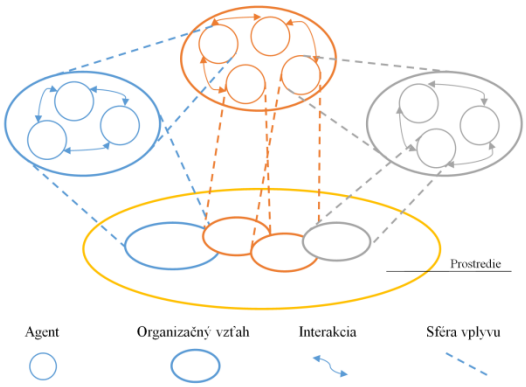
Aj keď agenty a multiagentové systémy (MAS) nemajú spoločnú definíciu, všeobecný konsenzus o týchto dvoch abstraktných pojmoch existuje [21]:

- Agent je výpočtový systém, ktorý sa nachádza v dynamickom prostredí a je schopný autonómneho a inteligentného správania.
- Agent sa môže nachádzať v prostredí, ktoré zahŕňa iných agentov. Komunita interagujúcich agentov, ako celku, pracuje ako *multiagentový systém.*

Taktiež podľa [21] sú agenty charakterizované nasledujúcimi kľúčovými vlastnosťami:

- Agenty môžu konať v záujme svojho dizajnéra, alebo používateľa s cieľom splniť požadovaný účel.
- Agenty sú autonómne v tom zmysle, že dokážu riadiť svoje vnútorné stavy a ovplyvňovať okolité prostredie.
- Agenty vykazujú znaky inteligencie, plynúce z použitia fixných pravidiel pre odôvodňovanie, plánovanie a schopnosť učiť sa.
- Agenty interagujú s prostredím a s komunitou, teda s ostatnými agentami.
- Agenty sú adaptívne, schopné meniť ich správanie vzhľadom na zmeny prostredia, bez potreby zásahu dizajnéra.

Multiagentový systém je postavený na sieti agentov, ktoré medzi sebou interagujú a komunikujú za účelom dosiahnutia určitého cieľa [Obr. 5].



Obrázok 5: Všeobecná schéma multiagentového systému

Multiagentový systém je založený, tak ako to bolo u predchádzajúcich konceptoch, na heterarchickej architektúre, ktorá ponúka potrebné výhody pre generáciu inteligentných výrobných systémov a to flexibilitu, adaptáciu a rekonfiguráciu. Aj vďaka týmto vlastnostiam, boli agenty aplikované, už v druhej polovici 80. rokov minulého storočia, na úrovni dielenského plánovania a riadenia výroby.

Pri aplikácii MAS do výroby, sa autonómne agenty používajú na reprezentáciu celej škály entít, od výrobných zdrojov, rozpracovaných výrobkov, výrobných operácií, pracovníkov, pracovísk, výrobných strojov, náradí, autonómnych logistických ťahačov, až po systémy plánovania materiálových potrieb (MRP).

ĎALŠIE SAMO-ORGANIZAČNÉ KONCEPTY INTELIGENTNÝCH VÝROBNÝCH SYSTÉMOV

Hoci sa spomenuté koncepty, môžu líšiť v tom, že ich základy sú inšpirované z rôznych vedných odborov (napríklad: z matematiky pre fraktálne výrobné systémy, z biológie pre bionické a genetické výrobné systémy a z filozofie, sociológie a taktiež biológie v prípade holonických výrobných systémov), nemusia byť nutne

v rozpore, pričom niektoré z týchto konceptov majú spoločné charakteristiky. Niektoré koncepty sa dokonca môžu navzájom dopĺňať. U väčšiny sa využíva prístup multiagentových systémov pre modelovanie základných entít.

Genetické výrobné systémy sú založené na myšlienke napodobňovania DNA pri výrobných objednávkach. Náhodný výrobný systém zase vychádza z multiagentového prístupu a je založený na štyroch pilieroch: stroje robia autonómne rozhodnutia; vytváranie vnútorných štruktúr je dynamické; príkazy a požiadavky sú oznamované cez princíp „tabule“ (blackboard); a dielenské riadenie je vykonávané pomocou odmien a trestov. Virtuálne výrobné systémy majú integrované počítačové modely, ktoré presne simulujú výrobný systém pre predvídanie a riadenie výrobných operácií [22].

ZÁVER

Centralizované, hierarchické a upravené hierarchické riadiace architektúry nie sú schopné reagovať na nové požiadavky zákazníckého dopytu a teda nie sú schopné poskytunúť vlastnosti ako je adaptácia a rekonfigurabilita, odolnosť voči poruchám, či škálovateľnosť.

S cieľom dosiahnutia požadovaných vlastností, ktoré boli stanovené pre inteligentné výrobné systémy, bolo v posledných dvoch dekádach predstavených niekoľko novo-generačných konceptov. Medzi nich patria aj opísané bionické, holonické, fraktálne, či multiagentové výrobné systémy.

Literatúra

[1] CHRISTO C., CARDEIRA C., 2007. *Trends in Intelligent Manufacturing Systems*, In: IEEE Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium 3209 - 3214 s. ISBN 978-1-4244-0754-5.

[2] *Inteligentný systém* [online]. [s.a]. [cit 2014-12-14]. Dostupné na internete: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Inteligentn%C3%BD_syst%C3%A9m

[3] *Bionika* [online]. [s.a]. [cit 2014-12-12]. Dostupné na internete: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Bionika>

[4] THARUMARAJAH, A., WELLS, A. J., NEMES, L., 1996. *Comparison of the bionic, fractal an holonic manufacturing concepts*. In: Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 9, no. 3. 217-226 s. ISSN: 0951-192X

[5] *Bunkové jadro* [online]. [s.a]. [2014-12-12]. Dostupné na internete: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Bunkov%C3%A9_jadro>

[6] *Organela* [online]. [s.a]. [2014-12-12]. Dostupné na internete: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Organela>

[7] THARUMARAJAH, A., WELLS, A. J., NEMES, L., 1996. *Comparison of the bionic, fractal an holonic manufacturing concepts*. In: Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 9, no. 3. 217-226 s. ISSN: 0951-192X

[8] THARUMARAJAH, A., WELLS, A. J., NEMES, L., 1998. *Comparision of Emerging Manufacturing Concepts*. In: Proc. of the IEEE Int. Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 325-331, 11-14 October. ISBN: 978-0780347816

[9] MANDELBROT, B.B., 1982. *The Fractal Geometry of Nature*. Vyd: W.H. Freeman and Company. ISBN 0-7167-1186-9.

[10] *Fraktál* [online]. [s.a]. [cit 2014-12-12]. Dostupné na internete: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Frakt%C3%A1l>

[11] LEITÃO, P. J. P., 2004. An Agile and Adaptive Holonic Architecture for Manufacturing Control, Dizertačná práca, University of Porto.

[12] SILVA, N., 1998. Sistemas Holónicos de Produção, Especificação e Desenvolvimento, Diplomová práca. University of Porto.

[13] SIHN, W., BRIEL VON R., 1997. *Process cost calculation in a fractal company*. In: International Journal of Technology Management, v. 23, n. 1, pp. 68-77 s. ISSN 0267-5730.

[14] STRAUSS, R. E., HUMMEL, T., 1995. The new industrial engineering revisited - information technology, business process reengineering, and lean management in the self- organizing “fractal company”. In: Foo Say Wei (eds), Proceedings of 1995 IEEE Annual International Engineering Management Conference. Theme “Global Engineering Management: Emerging Trends in the Asia Pacific”. 287-292 s. ISBN: 0-7803-2799-3

[15] RYU, K., SHIN, M., JUNG, M. 2001. *A methodology for implementing agent-based controllers in the fractal manufacturing systems.* In: Proceedings of the 5th Conference on Engineering Design and Automation. 91-96 s.

[16] RYU, K., SON, Y. AND JUNG, M. 2003. *Modeling and specifications of dynamic agents in fractal manufacturing systems.* In: Computers in Industry, 52, 161-182 s. ISSN 0166-3615.

[17] KOESTLER, A. 1968. *The ghost in the machine*, The Macmillan Company, New York. ISBN 978-0140191929.

[18] VAN BRUSSEL, et al. 1998. *Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA.*In: Computers in Industry, 37, 255-274.

Článok je podporený z projektu KEGA č. 043ŽU-4/2014.