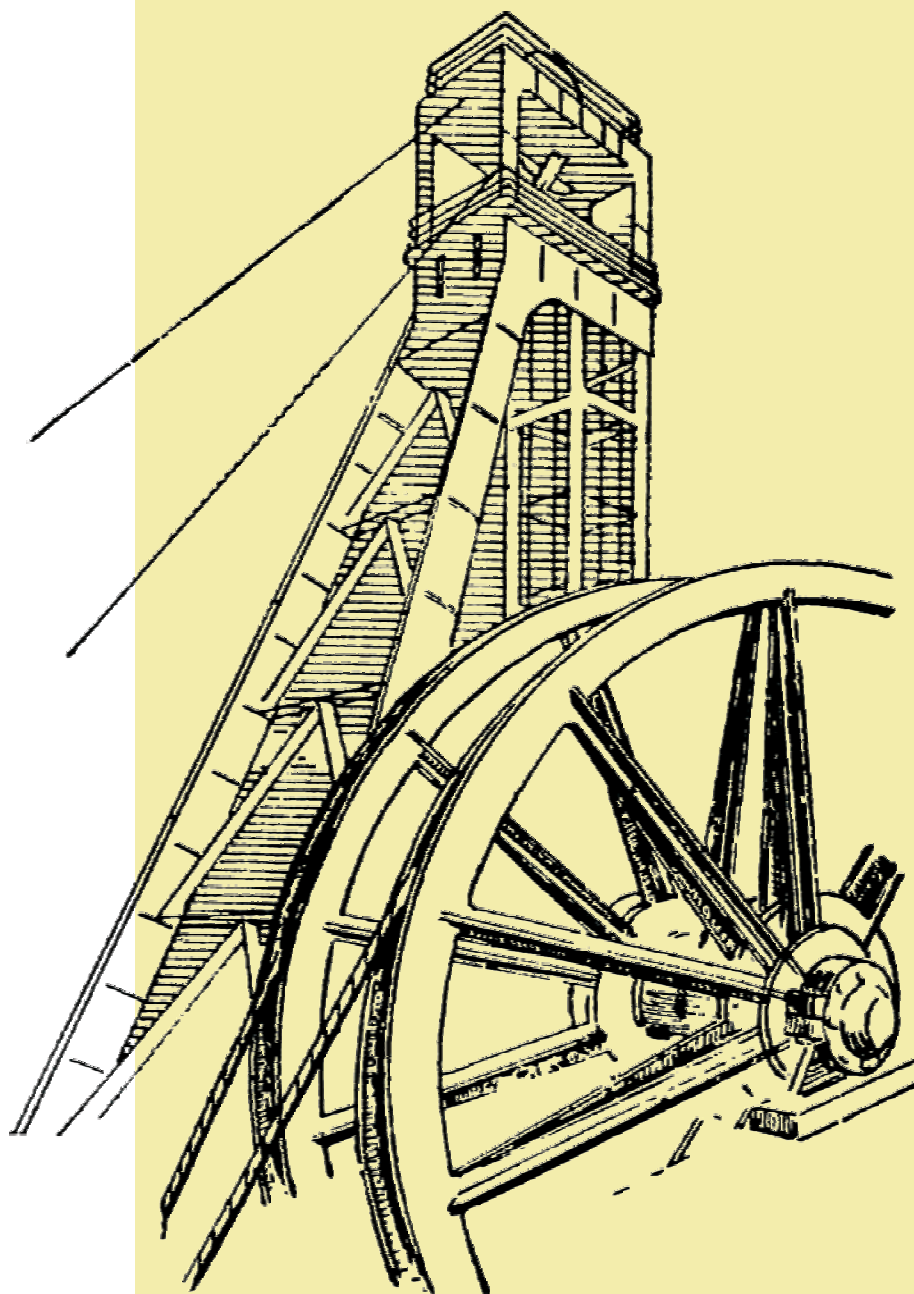


STROJNIŠKI VESTNIK

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING



cena 800 SIT



9 770039 248001

ISSN 0039-2480

Vsebina - Contents

Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering
letnik - volume 51, (2005), številka - number 1
ISSN 0039-2480

Izhaja mesečno - Published monthly

Uvodnik

Rant, Z.: Strojniški vestnik

Editorial

2 Rant, Z.: Journal of Mechanical Engineering

Razprave

Šarlah, A., Poredoš, A., Kitanovski, A., Egolf, P.:
Prenos toplote v toku ledene brozge

Dular, M., Bachert, R., Širok, B., Stoffel, B.: Časovno
odvisna simulacija, vizualizacija in meritve
kavitacije z metodo PIV-LIF na različnih
osamljenih profilih

Ficko, M., Brezočnik, M., Balič, J.: Oblikovanje
prilagodljivega obdelovalnega sistema z
genetskimi algoritmi

Milfelner, M., Župerl, U., Čuš, F.: Ustvarjanje
modela rezalnih sil z uporabo umetne
inteligence

Papers

Šarlah, A., Poredoš, A., Kitanovski, A., Egolf, P.: Heat
Transfer in an Ice-Slurry Flow

Dular, M., Bachert, R., Širok, B., Stoffel, B.: Transient
simulation, visualization and PIV-LIF
measurements of the cavitation on different
hydrofoil configurations

Ficko, M., Brezočnik, M., Balič, J.: A Model for
Forming a Flexible Manufacturing System
Using Genetic Algorithms

Milfelner, M., Župerl, U., Čuš, F.: Generation of a
Model for Cutting Forces Using Artificial
Intelligence

Poročila

Černigoj, B.: 1955 - leto rojstva Strojniškega
vestnika

Novak, P.: 5 desetletij - minila so kot trenutek

Alujevič, A.: Ob 50. obletnici Strojniškega vestnika

Reports

Černigoj, B.: 1955 - Year of Birth of Journal of Me-
chanical Engineering

Novak, P.: 5 Decades - They passed as One Moment

Alujevič, A.: On the 50th Anniversary of Journal of
Mechanical Engineering

Osebne vesti

Doktorati, magisteriji, diplome

Doktorske disertacije 1962 - 2004

Personal Events

61 Doctor's, Master's and Diploma Degrees

62 Doctor's Degrees 1962 - 2004

Navodila avtorjem

71 **Instructions for Authors**

Uvodnik - Editorial

Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering

Lani v marcu je izšla prva številka »Strojniškega vestnika«, danes pa imam pred seboj vse štiri številke popolnega prvega letnika. S »Strojniškimi vestnikom« je vse slovensko strojništvo slednjič dobilo preprosto glasilo, kajti ta vestnik je glasilo strokovne organizacije »Društva strojnih inženirjev in tehnikov LRS«, naše strokovne pedagoške in znanstvene ustanove »Oddelka za strojništvo Tehniške fakultete«, dalje »Inštituta za turbostroje pri Slovenski akademiji znanosti in umetnosti« - ter naših največjih tovarn »Litostroja« in »Tovarne avtomobilov v Mariboru«.

Vsebinska vestnika je pestra in zanimiva. V prvem letniku je objavljenih 17 izvirnih člankov, izmed katerih so trije izpod peresa inozemskih avtorjev. Teme segajo od čiste teorije pa do praktičnih problemov, od zgodovinskega pogleda do vprašanj srednjega in višjega strojniškega pouka pri nas in v tujini. Taki izvirni članki dajejo pečat in obeležje vsakemu strokovnemu glasilu; le-ti bi morali biti in so tudi odraz razvoja stroke in znanja ter kulture njenih predstavnikov na publicističnem področju. Razveseljivo je, da je ožja strokovna pripadnost avtorjev zelo različna, saj v tem delu glasila sodelujejo obratni inženirji in tehniki, tovariši iz konstrukcijskih krogov, profesorji univerze in drugi. Tako se je uredništvo že v začetku izognilo nevarni in dolgočasni enostavnosti in je na dobri poti k reprezentativnosti našega glasila. To je velik uspeh in takšno pot naj zasleduje še naprej z vso energijo. Strojniki do sedaj nismo imeli posebne priložnosti za literarno delo; večinoma smo še nekako neuki v pisanju in imamo trdo in nevešče pero. Zato naj uredništvo gleda tudi na način pisanja in predvsem na koncizno in jedrnato izražanje. Tu bi se dalo opraviti zaslužno delo v vzgoji naših bodočih strojniških avtorjev.

Vemo, da imamo Slovenci odlične strojne konstruktorje in organizatorje dela, ki delujejo širom po vsej državi. Želeli bi, da kaj več napišejo o svojem delu, o tem, kar so zamislili in postavili. Tu pogrešamo marsikoga, ki je veliko napravil, a le malo o tem povedal in poročal. Prepričan sem, da je pri nas nabranega toliko potencialnega gradiva, da bo ta najvažnejši del revije zmerom na višini in zmerom zanimiv, če bo le uredništvo znalo vzdramiti in

pritegniti k sodelovanju vse tiste, ki še dremljejo, oklevajo ali pa »nimajo časa«.

V »poročilih« je bilo objavljenih 15 člankov o zanimivih novostih iz strojništva v tujini in doma. »Strojniški vestnik« tudi stalno priobčuje naše državne standarde in notranje standarde naših večjih podjetij ter zakone in uredbe, ki utegnejo zanimati strojnike.

V poglavjih o »tehniški besedi« se nam odpira kaj živahen pogled v delo Tehniške sekcije Terminološke komisije pod okriljem SAZU. Vidimo, s kakšnimi težavami in problemi, pa tudi s koliko vztrajnostjo in temeljitostjo se borijo tisti, ki brusijo in čistijo naše – velikokrat pomankljivo – tehniško besedišče. Ali ne bi bilo kazno, poleg tehniške »besede« govoriti tudi o našem tehniškem »jeziku« in izluščiti pravila za pisanje tehniških člankov in sestavkov? Zdi se mi, da smo v tem pogledu velikokrat še pregostobesedni in preobširni.

Društvene in osebne vesti služijo predvsem osebni povezavi med člani in društvom ter člani med seboj.

Pregled tuje in domače strokovne literature je narasel od treh strani v prvi številki na deset strani v četrti. Tu so objavljeni naslovi zanimivih člankov iz domačega in tujega strokovnega časopisja, naslovi novih knjig v Centralni tehniški knjižnici in ocene knjig. Temu delu je posvečena posebna skrb in ocene knjig kažejo lep nivo. Zaradi pomanjkanja prostora se pa moramo tudi tu naučiti poročila čim bolj krčiti, ne da bi pri tem trpela kakovost recenzij.

Razveseljiva posebnost so redna poročila iz Litostroja in iz TAM, ki nas seznanjajo z delom, z izdelki in uspehi teh tovarn in z življenjem in razmerami v njihovih delovnih kolektivih.

»Strojniški vestnik« je izpolnil občutno vrzel v naši strokovni literaturi. Zdaj, ko strojništvo prepleta vse naše življenje, ta obzornik ni samo glasilo razmeroma ozkega kroga strojnikov, marveč spada tudi v roke vseh tistih, ki jih zanima moderno življenje.

Neumornemu trudu glavnega urednika prof. Krauta in članov uredništva gre vse priznanje in pohvala, Vestniku samemu pa želim lep razvoj in napredek v prihodnje.

prof.dr. Zoran Rant

povzeto po Slovenskem poročevalcu, 28.1.1956

Prenos toplote v toku ledene brozge

Heat Transfer in an Ice-Slurry Flow

Alen Šarlah - Alojz Poredoš - Andrej Kitanovski - Peter Egolf

Ledena brozga je do okolja neškodljiva snov, katere uporaba je zaradi njenih dobrih toplotnih lastnosti primerna v mnogih sistemih hlajenja. Do pred nekaj leti so sistemi z ledeno brozgo bili omejeni le na živilsko proizvodnjo, kjer zaradi strupenosti drugih hladil, uporaba le-teh ni dovoljena. Zaradi hitrega razvoja takšnih sistemov in mnogih inovacij v hladilni tehniki, pa je njihova uporaba mogoča tudi na drugih področjih, na primer daljinsko hlajenje. V ta namen je treba opraviti še veliko raziskav, predvsem eksperimentalnih, saj je analitičen postopek obravnave problema precej zapleten.

Prispevek obravnava rezultate raziskave prenosa toplote v toku ledene brozge znotraj pravokotnega kanala. Na začetku je podan opis preizkusne proge in samega preizkusa, s katerim smo določili intenzivnost prenosa toplote. Dobljeni rezultati so v nadaljevanju razloženi in predstavljeni v diagramih ter primerjani s korelacijami in rezultati meritev drugih avtorjev. Opisan je tudi numerični program, na podlagi katerega je v nadaljevanju narejena primerjava numeričnih in eksperimentalnih rezultatov. Na koncu so narejene še ugotovitve in sklepi raziskave.

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: brozga ledena, prenos toplote, profili temperaturni, programi numerični)

An ice slurry is a harmless substance that can be used in various cooling systems because of its good thermal properties. Until recently, systems with ice slurries were limited to food processing, where conventional, harmful refrigerants are not allowed. The rapid development of such systems and the many innovations in refrigeration have paved the way for ice-slurry systems to be used in other areas, e.g., district cooling. However, a lot of research remains to be done, especially experimental work.

This paper deals with the research results from heat transfer in an ice-slurry flow within a rectangular channel. First, the basics of heat transfer in an ice slurry are explained. Next the experiment to determine the intensity of the heat transfer is explained. Later, the results are explained, and together with the results of some other experiments, shown in diagrams for comparison. In the second part of the paper a numerical program is described; this was used to compare numerical and experimental data. Finally, conclusions from the comparison between the experimental and numerical results are given and discussed.

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: ice slurry, heat transfer, temperature profile, numerical programs)

0 UVOD

Vse od protokolov, sprejetih v Kyotu in še pred tem v Montrealu, se je v svetu kazala potreba po zmanjšanju uporabe hladil CFC, predvsem zaradi njihovega škodljivega delovanja na ozračje. Ena izmed možnosti je omejitev hladil CFC na samo proizvodnjo hladu, medtem ko sta prenos in uporaba hladu opravljena z uporabo drugih snovi. Ena takšnih je ledena brozga, ki je do okolja neškodljiva snov, saj je sestavljena iz vode in ledu ter dodatka, po navadi je to kar sol, alkohol ali kakšna druga snov, ki v

0 INTRODUCTION

Since the protocols in Montreal and later in Kyoto, there has been an urgent need to limit use of CFC refrigerants because of their harmful effect on the atmosphere. One way to do this is to use CFC refrigerants only for cold production, while the transport and usage of cooling energy can be done with other substances. One such substance is a slurry of ice, which is ecologically harmless because it consists only of water, ice and an additive such as salt, alcohol or another substance that lowers the freez-

raztopini z vodo zniža temperaturo ledišča ledene brozge. Tako lahko dosežemo večje temperaturne razlike v prenosniku in s tem manjše izmere sistema ter nižje temperature hlajenja. Poleg tega pa ima ledena brozga še eno dobro lastnost; zaradi vsebnosti delcev ledu, ima namreč večjo toplotno zmogljivost kot pa sama raztopina, kakor občutno zmanjša investicijske in obratovalne stroške.

Seveda pa se pri uporabi ledene brozge pojavljajo tudi problemi. Pri tem moramo omeniti predvsem dva, stratifikacijo in združevanje delcev ledu v večje kose po določenem času. Stratifikacija je ločevanje dveh komponent zaradi sile vzgona. Pri ledeni brozgi je led lažji od raztopine, zato se ob neustreznem mešanju ustvarita dve plasti, kar lahko občutno poslabša tokovne razmere, v skrajnem primeru pa povzroči tudi zamašitev elementov in ustavitve sistema. Zato je nujno, da se ledena brozga uporabi v čim krajšem času ter da se v elemente sistema (hranilnik, cevovodi itn.) vgradijo mešalne naprave, kar pa lahko slabo vpliva na celoten sistem.

1 TEORIJA PRENOSA TOPLOTE V LEDENI BROZGI

Pri obravnavanju prenosa toplote v ledeni brozgi sta pomembna predvsem dva mehanizma; prevod toplote in prestop toplote. Matematično lahko prevod toplote zapišemo s Fourierjevim zakonom [1]:

$$\vec{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda(T) \text{grad} T \quad (1),$$

medtem ko lahko prestop toplote opišemo z Newtonovim zakonom hlajenja:

$$q = \alpha (T_w - T_f) \quad (2)$$

kjer je $(T_w - T_f)$ temperaturna razlika med tekočino (prosti tok) in površino stene. Seveda je zapis enačbe (2) samo osnovna oblika, saj v dejanskih razmerah nimamo stalnih temperatur ali toplotnega toka. Obe veličini se vzdolž toka spreminjata. Skupno toplotno moč lahko tako zapišemo v obliki integrala lokalnega toplotnega toka q_x vzdolž površine A :

$$\dot{Q} = \int_A q_x dA \quad (3).$$

Pri prestopu toplote je zelo pomembno tudi poznavanje temperaturne in hitrostne mejne plasti ter predvsem tokovnega režima (turbulentni ali

ing temperature of the solution. This way we can have lower cooling temperatures and higher temperature differences inside the heat exchanger, and thus a system with smaller dimensions. Ice slurries also have another good property: because they contain ice particles they have a higher heat capacity as the solution itself, which again lowers the investment and the running costs.

There are, however, also some problems associated with ice-slurry systems. Two are particularly important: stratification and the unification of ice particles after a certain time. Stratification is the separation of two phases due to a buoyancy force. In ice slurries the ice is lighter than the rest of the solution, and so in the case of improper mixing we get two phases, which causes an increase in the pressure drop or even stoppage of the flow and the whole cooling system. To prevent this it is necessary to use an ice slurry a short time after its production and to install mixing elements in the ice-slurry storage and pipes, which can have a negative impact on the whole system.

1 THE THEORY OF HEAT TRANSFER IN AN ICE SLURRY

Two mechanisms are important when dealing with heat transfer in ice slurries: heat conduction and heat convection. Heat conduction can be written with Fourier's law [1]:

while heat convection is described with Newton's law of cooling:

where $(T_w - T_f)$ is the temperature difference between the free flow of the fluid and the surface of the wall. Equation (2) is, of course, just the basic form of the law, since in real problems we do not have constant temperatures or constant heat flux, they both vary along the length of the flow. Thus, we have to write the combined heating power as an integral of q_x along the area A :

When dealing with heat convection we have to be familiar with the temperature and the velocity boundary layers, and especially with the type

laminarni tok). Turbulentni tok zaznamuje zelo neurejeno trirazsežno gibanje razmeroma velikih delov tekočine, kar povzroči povečanje tlačnega padca in intenzivnost prenosa toplote.

Glede na pretekle preizkuse, ki so jih opravili različni avtorji, lahko sklepamo, da ima, poleg hitrosti tekočine in premera cevi, pomemben vpliv na prenos toplote tudi koncentracija delcev ledu v ledeni brozgi. Christensen [2] je ugotovil, da se intenzivnost prenosa toplote zvečuje s povečano koncentracijo ledu. Seveda pa je primerno povečevati koncentracijo ledu samo do neke vrednosti, saj se pri večjih koncentracijah padec tlaka v prenosniku zelo poveča, hkrati pa se povečuje nevarnost stratifikacije toka. Ker želimo v sistemu imeti čim manjši tlačni padec ob čim večjem prenosu toplote, je nujno, da s preizkusi določimo čim boljše razmerje med obema.

2 OPIS PREIZKUSA

Namen preizkusa je bil določiti intenzivnost prenosa toplote ledene brozge znotraj pravokotnega kanala ter rezultate primerjati z že znanimi podatki za okrogle cevi. Pravokotna oblika prenosnika je bila izbrana zaradi podobnosti z obliko prenosnikov v dejanskih sistemih. Kot osnovni parameter je bil izbran hidravlični premer kanala, ki je znašal 23 mm – enako kakor je bil premer cevi v prejšnjih rezultatih [3]. Zaradi želje po čim bolj intenzivnem prenosu toplote med ledeno brozgo in steno prenosnika je bilo izbrano večje razmerje med širino (126,6 mm) in višino kanala (12,7 mm). Izbrano razmerje je bilo približno 10. Pri tem pogoju smo imeli večjo površino za prenos toplote ter hkrati še vedno ugodne hidravlične razmere.

Testni del prenosnika z dolžino 1 meter je bil izdelan iz aluminijeve zlitine ter razdeljen na 4 odseke po 250 mm, na katere so bili nameščeni električni grelniki (skupaj 8 grelnikov – zgoraj in spodaj), vsak z močjo 1,1 kW. Na začetku (prerez 1), koncu (prerez 5) in med vsakim segmentom prenosnika (prerezi 2, 3 in 4) so bila nameščena temperaturna (termoelement: Roth+Co. AG Tip T040, razred A, točnost: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) ter tlačna (Huba Control) zaznavala, skupaj tako na petih mestih (sl. 1). Po dve temperaturni zaznavali sta bili postavljeni na vsakem prerezu, in sicer, 35 mm od sredine kanala. Tako je bilo mogoče določiti razvoj temperaturnega in tlačnega profila vzdolž prenosnika. Vsak temperaturni profil je bil izmerjen z dvema zaznavaloma, vendar ne naenkrat. Medtem so vsa druga zaznavala bila odstranjena iz kanala. Tako ni bilo vpliva preostalih zaznaval na izmerjeno temperaturo.

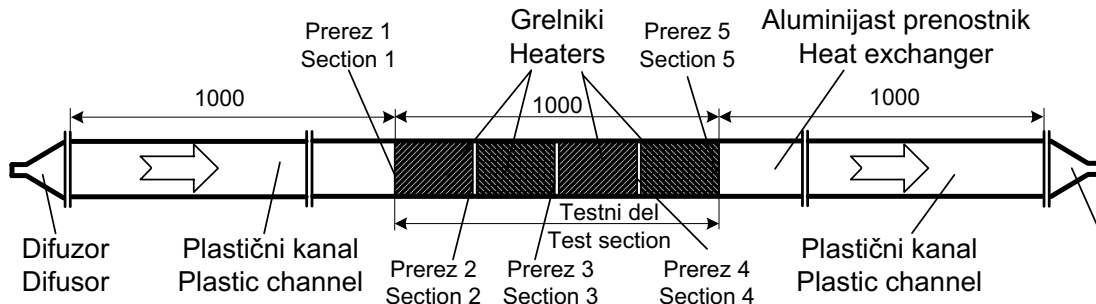
of flow (turbulent or laminar). Turbulent flow is characterized as the very disordered three-dimensional motion of a relatively large portion of fluid that causes a greater pressure drop and heat transfer.

We can conclude from previous experiments made by other authors that the heat transfer in an ice slurry is not influenced only by velocity and the diameter of the pipe, but also by the ice-particle concentration. Christensen [2] found that the heat transfer increases with increasing ice-particle concentration up to a certain point, while increasing it beyond that point is pointless due to an increased pressure drop. Since we want to have, at the same time, a low pressure drop and a high heat transfer, we need to find the optimum point with an experiment.

2 DESCRIPTION OF THE EXPERIMENT

The objective of the experiment was to determine the intensity of the heat flux in an ice slurry within a rectangular channel and to compare the results with some other experiments. We chose a rectangular channel because of the similarity with the shape of real heat exchangers. As the main parameter, we chose a hydraulic diameter of 23 mm, the same as the diameter in previous experiments [3]. We chose higher ratio (~ 10) between the width (126.6 mm) and height (12.7 mm) of the channel in order to have a higher heat transfer from the wall to the ice slurry. This way we had a larger area for the heat transfer and maintained favourable flow conditions.

The test section of the exchanger was 1 metre long and made of aluminium alloy. It was divided into four segments of 250 mm, on which electrical heaters (a total of eight – top and bottom) were installed, each of 1.1 kW. At the beginning (cross-section 1), end (cross-section 5) and between each segment (cross-section 2, 3 and 4), temperature (Roth+Co. AG Type T040, Class A, accuracy: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) and pressure (Huba Control) sensors were installed. Two temperature sensors were installed for every section, each 35 mm away from the middle of the channel. In this way we were able to measure the pressure drop and the temperature at five points along the channel and thus determine the development of the temperature and the pressure-drop profiles. Each temperature profile was measured with two sensors, but only one at a time, while all the other sensors were removed from the channel. In this way the measured temperature was not influenced by any other sensor.



Sl. 1. Shema prenosnika
Fig. 1. Heat-exchanger scheme

Pred prenosnikom in za njim sta bila nameščena en meter dolga plastična kanala enakega prereza, ki bi naj zagotovila, da na testnem delu prenosnika ni bilo vpliva vstopnega in izstopnega dela prenosnika. Predhodno je bil izdelan tudi poseben pretvornik toka, difuzor, ki je spremenil tok iz okroglega prereza v pravokotni in nazaj.

Meritve so bile opravljene v laboratoriju Inštituta za termodinamiko (Institut de Génie Thermique IGT) na Visoki tehniški šoli (École d'Ingénieurs du Canton de Vaud) v Yverdon-u v Švici. Posebna konstrukcija, krmilni in nadzorni sistem ter cevne povezave so bile narejene za opravljanje meritev na ledeni brozgi [5].

Opravili smo več meritev, pri katerih smo spreminjali toplotni tok ($1,8\text{ kW/m}^2$, $7,2\text{ kW/m}^2$), ter masni delež ledu (15 do 20 masnih %), medtem ko smo preostale parametre (masni pretok $\dot{m} = 1,2\text{ kg/s}$; vstopna temperatura brozge $T_{\text{in}} = -3,2^\circ\text{C} \pm 0,1$; $\text{Re} = 5100$ do 5200) poskušali vzdrževati čim bolj stalne. Kot dodatek smo uporabili propilen glikol (10 masnih %).

3 REZULTATI MERITEV

Z meritvami smo dobili temperaturne profile na določenem prerezu vzdolž prenosnika toplote (slika 2), iz katerih smo nato lahko določili intenzivnost prestopa toplote v ledeni brozgi. Zaradi rahlega nihanja vstopne temperature ledene brozge v času opravljanja ene meritve smo za predstavitev razvoja temperaturnega profila (sl. 2) uporabili tako imenovano skaliranje, ki izniči vpliv spremenljivosti vstopne temperature. Pri tem uporabimo naslednjo enačbo, kjer y pomeni razdaljo od sredine kanala ter x lego vzdolž kanala:

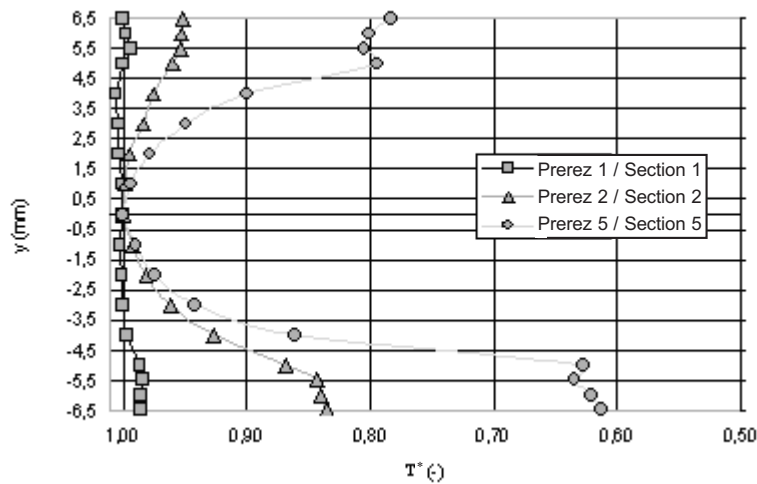
Before and after the heat exchanger, one metre long, plastic channels of the same cross-section were installed in order to prevent any influence of the entrance or exit part from reaching the test section. A special diffuser was also made to transform the flow from the cylindrical pipe to the rectangular channel.

Measurements were made in a laboratory at the Institute for Thermodynamics (Institut de Génie Thermique IGT - École d'Ingénieurs du Canton de Vaud) in Yverdon, Switzerland. A special construction, control systems and piping were made for the purpose of ice-slurry measurements [5].

Measurements were made with a variable heat flux (1.8 kW/m^2 , 7.2 kW/m^2) and a concentration of ice particles (15–20 mass %), while we tried to keep the other parameters (mass flow $\dot{m} = 1.2\text{ kg/s}$; entrance temperature $T_{\text{in}} = -3.2^\circ\text{C} \pm 0.1$; $\text{Re} = 5100$ to 5200) more or less constant. The additive used was propylene glycol (10 mass %).

3 RESULTS OF THE MEASUREMENTS

With the experiment we obtained temperature profiles at certain sections along the channel (Figure 2), which were further used to determine the intensity of the heat transfer in the ice slurry. Because of slight oscillations of the ice slurry's entrance temperature during the measurements we had to use a so-called "scaling" method (non-dimensionalising), which nullifies those oscillations, to show the development of the temperature profiles along the channel (Figure 2). To do so we used the following equation, where x represents the position along the length of the channel and y , the distance from the middle of the channel:



Sl. 2. Temperaturni profili

Fig. 2. Temperature profile

$$T^* = \frac{T(x, y)}{T(x, 0)} \quad (4)$$

Brezrazsežna temperatura T^* (slika 2) pomeni relativno spremembo temperature tekočine $T(x, y)$ na različnih prerezih vzdolž kanala glede na temperaturo v sredini kanala $T(x, 0)$.

Iz dobljenih podatkov lahko določimo lokalno Nusseltovo število po enačbi [3]:

The dimensionless temperature T^* (Figure 2) represents a relative change of the fluid temperature $T(x, y)$ compared with the temperature at the middle of the channel $T(x, 0)$ at different sections along the channel.

From the obtained data we are able to determine the local Nusselt number according to Equation [3]:

$$Nu_x = \frac{\alpha_x \cdot D_h}{\lambda} \quad (5)$$

kjer se lokalna toplotna prestopnost α_x določi kot:

where the local convective coefficient α_x is calculated as:

$$\alpha_x = \frac{q}{T_{w,x} - \bar{T}_{f,x}} \quad (6)$$

in je $T_{w,x}$ temperatura stene na dolžini x in $\bar{T}_{f,x}$ povprečna temperatura tekočine na dolžini x , ki se izračuna kot:

$T_{w,x}$ is the temperature of the wall at the length x and $\bar{T}_{f,x}$ is the average temperature of the fluid at the length x , which can be calculated as:

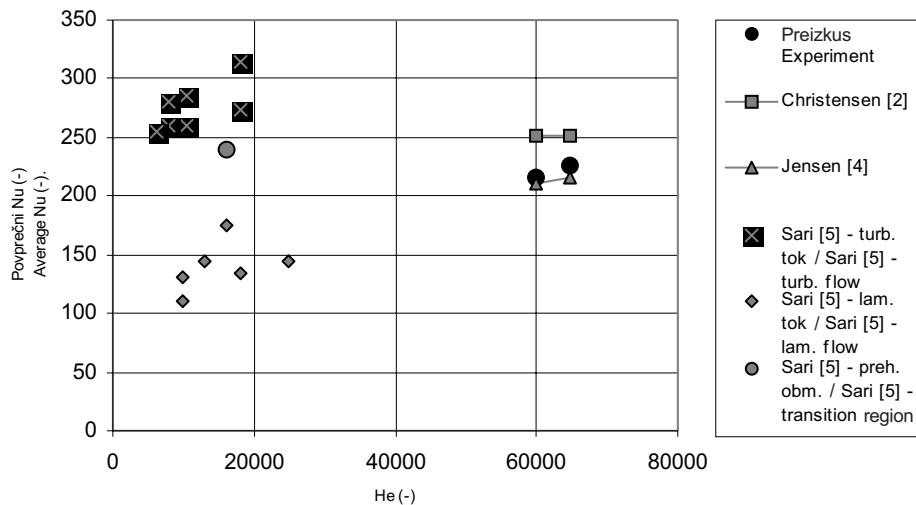
$$\bar{T}_{f,x} = \frac{1}{\bar{v}_f H} \int_{-y}^y v_x(y) T(y) dy \quad (7)$$

Kjer je $\bar{v}_f$ povprečna hitrost tekočine v kanalu in $v_x(y)$ hitrostni profil tekočine po višini (os y).

where $\bar{v}_f$ is the average velocity of a fluid and $v_x(y)$ is the velocity profile along the height of the channel (y -axis).

Z integriranjem lokalnega Nu števila vzdolž prenosnika pa dobimo povprečno Nu število. Dobljeno povprečno Nu število smo v odvisnosti od Hedstromovega števila primerjali z dvema korelacijama ([2], [4]) in rezultati meritev, ki jih je opravil Sari [5] (sl. 3). He število izraža razmerje med kritično strižno napetostjo ter silo viskoznosti in je

With integration of the local Nu number along the channel we obtain the average Nu number, which we compared with two correlations ([2], [4]) and with the results of an experiment by Sari [5] (Figure 3). The results are compared using the Hedstrom number (He), which expresses the ratio of the critical shear stress



Sl. 3. Primerjava rezultatov preizkusa z rezultati nekaterih drugih avtorjev
Fig. 3. Comparison of the results from our experiment with the results of other authors

pri ledeni brozgi predvsem funkcija masnega deleža ledu. Definirano je kot:

$$He = \frac{\tau_0 \cdot D^2 \cdot \rho}{\eta^2} \quad (8).$$

Kakor je razvidno (sl. 3), so naši rezultati podobni korelacijam, ki sta jih podala Christensen [2] in Jensen [4] na podlagi preizkusov. V diagram smo dodali tudi rezultate meritev, ki jih je opravil Sari [5], saj so rezultati njegovih meritev na neki način primerljivi z našimi. Če pogledamo enačbo za določitev He števila, vidimo, da imamo v imenovalcu dinamično viskoznost, ki je za ledeno brozgo s propilen glikolom (uporabljena pri naših meritvah) približno za razmerje 8 manjša od dinamične viskoznosti ledene brozge z etanolom, ki jo je uporabil Sari [5]. Zato je tudi He število sorazmerno manjše, medtem ko je vrednost povprečnega Nu števila primerljiva z našimi rezultati.

Hkrati smo lahko iz rezultatov meritev ugotovili, da smo kljub uporabi mešalnih elementov imeli prisotno stratifikacijo (ločevanje komponent) tekočine. Na to nakazujejo različni temperaturi blizu stene, zgoraj in spodaj (sl. 2 in 4).

4 NUMERIČNI PROGRAM

V okviru projekta smo dobljene preizkusne podatke tudi preverili z uporabo numeričnega programa, ki ga je sestavil P. Egolf in dopolnil A. Kitanovski ter je napisan v programskem jeziku Delphi. Teoretično ozadje programa za okroglo cev

and the viscous forces between the particles of the fluid. In the case of ice slurries the number mainly a function of the ice concentration. It is defined as:

From Figure 3 we see that our measurements yielded similar results to the correlations proposed by Christensen [2] and Jensen [4]. The results from Sari [5] are also added to Figure 3, since it is clear that his results yield similar results to our own. If we look at the equation for He number we see that we have a dynamical viscosity in the denominator of the equation. The viscosity of the ice slurry with propylene glycol is approximately eight times lower than the viscosity of the ice slurry with ethanol, which was used by Sari [5]. This is the reason why we had higher He numbers than Sari [5], while his average Nu number was similar to our results.

In results also showed that we had stratification present inside the channel even though we used mixing elements. Different temperatures at the top and the bottom wall indicate this (Figs. 2 and 4).

4 NUMERICAL PROGRAM

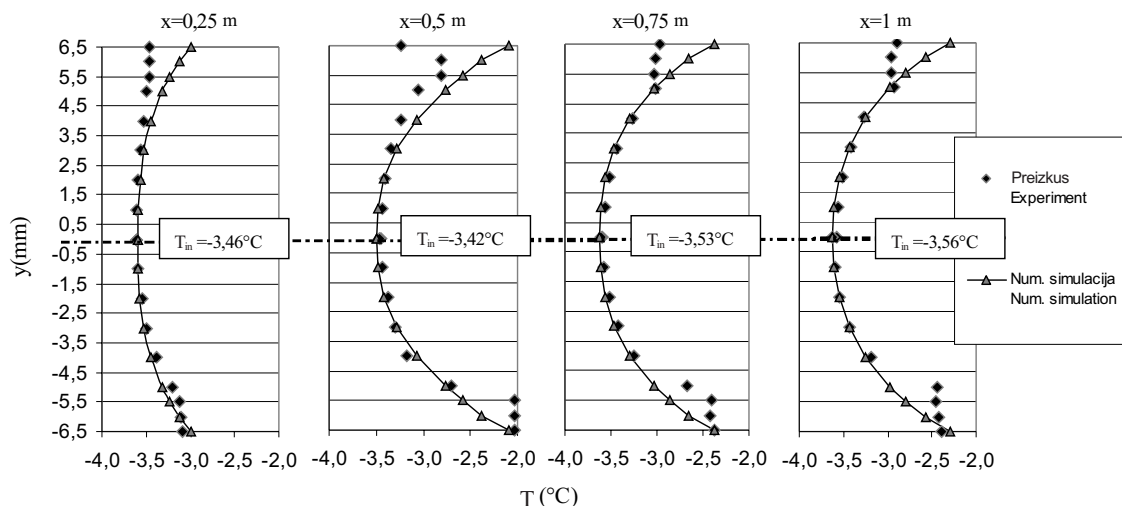
The experimental results were verified with a numerical program designed by P. Egolf [6] and upgraded by A. Kitanovski in the Delphi programming language. The theoretical part of the programme was written by Egolf [6] for a pipe, while we adapted the

je v celoti opisal Egolf [6], medtem ko smo ga v skladu z našim problemom priredili za pravokotni kanal [3]. Program je bil izpeljan iz osnovnih hidrodinamičnih enačb (energijska, kontinuitetna in gibalna), ob upoštevanju robnih in začetnih pogojev ter enačb za popis hitrostnega profila za Binghamovo tekočino. Program upošteva dejstvo, da je hitrostni profil že razvit, medtem ko se temperaturni profil šele razvija.

Iz numerične simulacije za model laminarnega toka smo opazili, da dobimo drugačne rezultate kakor iz preizkusa [3], kar dokazuje, da smo kljub vsemu v kanalu imeli turbulentni tok. Zato smo v nadaljevanju upoštevali, da imamo v toku tudi turbulentno termično difuzivnost, kar se je izkazalo za mnogo ustrežnejše (sl. 4).

programme for a rectangular channel according to our problem [3]. The programme was derived using three basic equations (energy, momentum and continuity) with consideration of equations for the velocity profile of Bingham fluids and the initial/boundary conditions. Within the numerical model we considered the fact that the velocity profile was fully developed, while the temperature profile was still developing.

From a simulation of the laminar flow we determined that the numerical results are totally different from the ones we obtained from the experiment [3], which proves that we did not have laminar flow, but rather transient or turbulent flow. Thus, we used turbulent thermal diffusivity in our programme, which proved correct since the results were a lot better (Figure 4).



Sl. 4. Primerjava eksperimentalno in numerično dobljenih temperaturnih profilov
Fig. 4. Comparison of the results from the numerical simulation and experiment

Kakor je razvidno s slike 4, smo blizu stene dobili nepričakovan potek temperaturnih profilov. Po analizi vseh možnih razlag smo prišli do sklepa, da je takšen potek mogoče razložiti na dva načina. Prvo razlago lahko opredelimo kot napako merjenja, zaradi neprimernosti uporabljenih zaznaval ali pa zaradi nenatančnosti pri določitvi odmikov. Glede na uporabljene merilne metode je ta razlaga manj verjetna. Zaradi pomanjkanja časa je bil posamezen temperaturni profil izmerjen le dvakrat v dveh urah. Oba rezultata meritev sta bila primerjana in sprejeta za pravilna, če je bila razlika med njima manjša od izračunane standardne negotovosti meritve (za termoelement z natančnostjo $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (navedena od proizvajalca) znaša standardna negotovost $0,3^{\circ}\text{C}$).

As we can see from Figure 4, we obtained some unexpected results (near the wall) for the temperature profiles. After analyzing all the possible causes of such course of temperature profiles, we came down to two possibilities. First of all, we can declare it as an error of measurements due to improper sensors or an inaccurate measurement of the sensor-position deviations. Due to the measuring techniques and devices used, this reason is less likely to be the cause. Because of a tight time schedule, each temperature profile was measured only twice, with a time delay of about 2 hours. Both results were compared and accepted as correct if the difference between them was less than the calculated standard uncertainty (for a thermocouple with

Če sta meritvi bili sprejeti kot pravilni, smo v nadaljevanju za izračun uporabili njuno povprečno vrednost.

Druga, bolj verjetna razlaga temelji na dejstvu, da je prišlo do lokalne spremembe tokovnega režima. Iz diagrama odvisnosti kritičnega Re števila in He števila za ledeno brozgo s propilen glikolom [3] lahko ugotovimo, da smo glede na naše podatke bili v bližini prehodnega območja. Zato je mogoče, da je blizu stene prišlo do taljenja delcev ledu in tako do lokalne spremembe transportnih lastnosti tekočine, kar je povzročilo spremembo tokovnega režima. Zato bi bilo treba opraviti dodatne meritve, s katerimi bi lahko natančneje ugotovili, kaj je razlog takšnih potočkov temperaturnih profilov v bližini stene.

S spreminjanjem vrednosti turbulentne toplotne difuzivnosti smo poskušali dobiti čim boljše ujemanje med rezultati meritev in numerične simulacije. Pri tem smo prišli do ugotovitve, da se turbulentna toplotna difuzivnost vzdolž toka zmanjšuje (sl. 5), kar je bil vsekakor nepričakovan rezultat, saj bi morala toplotna difuzivnost v primeru dobro razvitega toka biti skozi celoten prenosnik bolj ali manj nespremenljiva oziroma se kvečjemu povečevati.

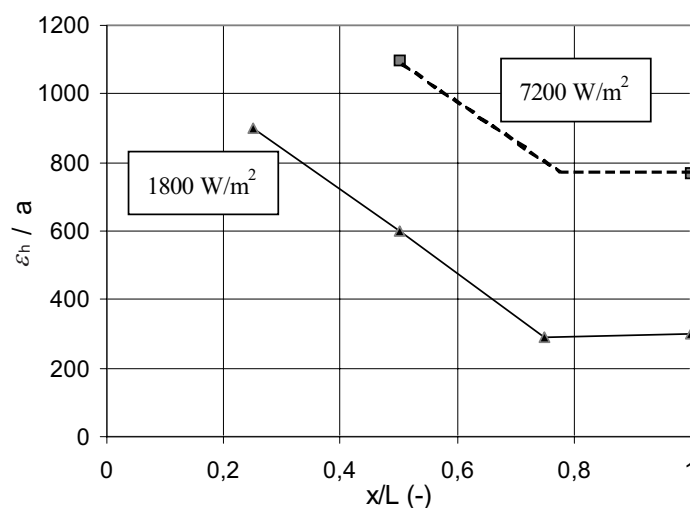
Razlog za takšen potek toplotne difuzivnosti je bil v sami konstrukciji prenosnika. Difuzorja, ki sta bila nameščena pred prenosnikom toplote in za njim, sta namreč imela kot razširitve približno 20° , kar je občutno preveč glede na nekatere priporočene vrednosti (približno do 12°). Zaradi prehitre razširitve toka je v pretvorniku prišlo do močnega turbulentnega gibanja, ki se je nadaljevalo

an accuracy of $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (stated by manufacturer) the calculated standard uncertainty is $0,3^\circ\text{C}$). If accepted, the average of both results was later on used in the calculations.

The second explanation is based on the fact that there were some local changes of flow type near the wall. If we check the dependency of the critical Re number and the He number [3], which tells us what type of flow we have, we see that we were close to the transient area between laminar and turbulent flow. So, it is possible that close to the wall, where the ice particles were melting, a change of flow type occurred due to a local change of the transport properties of the fluid. It would be necessary to perform more experiments relating to this issue to determine the true cause of such temperature profiles.

With the numerical programme we tried to achieve the best agreement between the numerical and experimental results by changing the value for the turbulent thermal diffusivity. We found that the value of the turbulent thermal diffusivity along the channel was decreasing (Figure 5), which was also unexpected since it should be more or less constant or at the utmost slightly increasing.

After evaluating this result we found that the reason for decreasing the thermal diffusivity along the channel was the construction of exchanger. The angle at which the flow was transformed from circular to rectangular in the diffuser was about 20° , which is too high according to some recommendations (up to $\sim 12^\circ$ is recommended). Because of this quick change of flow, strong turbulent motion ap-



Sl. 5. Razmerje turbulentne ε_h in laminarne toplotne difuzivnosti vzdolž prenosnika toplote
Fig. 5. Dependency of turbulent ε_h and laminar α thermal diffusivity along the exchanger

tudi v samem prenosniku toplote in se šele proti koncu prenosnika umirilo.

5 SKLEPI

Večina preizkusov, ki so bili opravljene na temo prenosa toplote v ledeni brozgi, je bilo narejeno z okroglimi prenosniki toplote (cevi), zato je v svetu na voljo malo rezultatov, pri katerih je bil uporabljen pravokotni prenosnik toplote. Hkrati pa je zaradi podobnosti z dejanskimi sistemi primernejši od okroglih prenosnikov toplote.

Iz rezultatov meritev smo lahko ugotovili, da smo kljub uporabi mešalnih elementov imeli stratifikacijo tekočine. Hkrati pa smo ugotovili, da smo blizu stene dobili nepričakovane poteke temperaturnih profilov, ki so najverjetneje posledica lokalnih sprememb lastnosti tekočine in s tem tokovnega režima. Pri primerjavi rezultatov preizkusa in numeričnega programa pa smo prišli do sklepa, da smo v kanalu imeli turbulentni, slabo razvit tok tekočine zaradi prevelikega kota razširitve pri difuzorju. Zato bi v prihodnje bilo nujno preveriti te rezultate z difuzorjem, ki bi imel manjši kot razširitve.

Primerjava rezultatov, dobljenih z našimi meritvami, in rezultatov drugih avtorjev je pokazala, da smo se pravilno lotili problema, saj so iz meritev izračunane vrednosti za Nu številno primerljive z rezultati drugih avtorjev.

peared, which continued along the exchanger and was smoothed only by the end of the exchanger.

5 CONCLUSIONS

Most of the experiments relating to heat transfer in ice slurries were made with cylindrical exchangers (pipes), thus there are not many results available where rectangular channel is used. At the same time a rectangular channel is more like the heat exchangers in real systems than a cylindrical one, and thus of greater interest.

From the experiment we found that even though mixing elements were installed in the system, we still had stratification (separation of fluid components) present. We also obtained some unexpected temperature profiles, which are most likely the result of local changes in the fluid transport properties and thus the flow type. When we compared the results of the experiment and the numerical programme we came to a conclusion, that we had turbulent, undeveloped flow because of a too large angle widening in the diffuser. It would be necessary to perform more experiments with a new diffuser to determine the appropriate heat transfer in ice slurries.

The results of our experiment and those from other experiments are very similar, which proves that we used an appropriate approach to the problem.

6 OZNAKE 6 NOMENCLATURE

površina	A	m^2	area
premer	D	m	diameter
višina kanala	H	m	height of the channel
Hedstromovo brezrazsežno št.	He	-	Hedstrom dimensionless number
masni pretok	$\dot{m}$	kg/s	mass flow
Nusseltovo brezrazsežno št.	Nu	-	Nusselt dimensionless number
gostota toplotnega toka	q	W/m^2	heat flux density
toplotna moč	Q	W	heating power
Reynoldsovo brezrazsežno št.	Re	-	Reynolds dimensionless number
temperatura	T	$^{\circ}C$	temperature
brezrazsežna temperatura	T^*	-	dimensionless temperature
hitrost	v	m/s	velocity
položaj vzdolž toka	x	m	position along the channel
razdalja od sredine kanala	y	m	distance from the middle of channel
toplotna prestopnost	α	W/m^2K	convective heat-transfer coefficient
toplotna prevodnost	λ	W/mK	conductive heat-transfer coefficient
dinamična viskoznost	η	kg/ms	dynamical viscosity
gostota	ρ	kg/m^3	density

strižna napetost τ Pa shear stress

Indeksi

tekočina
hidravlični
vstop
lokalno
stena
kritično

f
h
in
x
w
0

Subscripts

fluid
hydraulic
entrance
local
wall
critical

7 LITERATURA

7 REFERENCES

- [1] Incropera, F.P., D. P. DeWitt (1996) Fundamentals of heat and mass transfer. 4th edition. *John Wiley & Sons*.
- [2] Christensen, K.G., M. Kauffeld (1997) Heat transfer measurements with ice slurry. *IIR/IIF International Conference*.
- [3] Šarlah, A. (2003) Prenos toplote v toku ledene brozge. Diplomsko naloga univerzitetnega študija, *Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo*.
- [4] Jensen, E.N., K.G. Christensen, T. M. Hansen, P. Schneider, M. Kauffeld (2000) Pressure drop and heat transfer with ice slurry. *IIF-IIR, USA*.
- [5] Sari, O., F. Meili, D. Vuarnoz, Ph. Moser, P.W. Egolf (2000) Rapport de Recherche No. 6 : Thermodynamique d'un écoulement de coulis de glace dans un tube à flux de chaleur constant, Resultats expérimentaux et numériques. *Eureka Project FIFE, Suisse*.
- [6] Egolf, P.W., O. Sari, F. Meili, D. Vuarnoz, Ph. Moser (2000) Thermodynamics of moving and melting ice slurries in pipes. *Eureka Project FIFE, Research report No. 5, Switzerland*.

Naslova avtorjev: Alen Šarlah

prof.dr. Alojz Poredoš
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana
alen.sarlah@fs.uni-lj.si
alozj.poredos@fs.uni-lj.si

dr. Andrej Kitanovski
prof.dr. Peter Egolf
EIVD - École d'Ingénieurs du
Canton de Vaud
Institut de génie thermique
Route de Cheseaux 1
CH 1401 Yverdon les Bains
Švica
andrej.kitanovski@eivd.ch
peter.egolf@eivd.ch

Authors' Addresses: Alen Šarlah

Prof.Dr. Alojz Poredoš
University Ljubljana
Faculty of Mechanical Eng.
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana, Slovenia
alen.sarlah@fs.uni-lj.si
alozj.poredos@fs.uni-lj.si

Dr. Andrej Kitanovski
Prof.Dr. Peter Egolf
EIVD - École d'Ingénieurs du
Canton de Vaud
Institut de génie thermique
Route de Cheseaux 1
CH 1401 Yverdon les Bains
Switzerland
andrej.kitanovski@eivd.ch
peter.egolf@eivd.ch

Prejeto: 2.3.2004
Received:

Sprejeto: 2.12.2004
Accepted:

Odperto za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year

Časovno odvisna simulacija, vizualizacija in meritve kavitacije z metodo PIV-LIF na različnih osamljenih profilih

Transient simulation, visualization and PIV-LIF measurements of the cavitation on different hydrofoil configurations

Matevž Dular - Rudolf Bachert - Brane Širok - Bernd Stoffel

Prispevek obravnava numerično in preizkusno študijo kavitirajočega toka okrog različnih osamljenih profilov. Za simulacijo neustaljenega toka je bil uporabljen programski paket Fluent. Dvofazni tok smo opisali z vpeljavo homogenega toka mešanice. Za popis nastanka in kolapsa kavitacijskega oblaka je bil uporabljen kavitacijski model, utemeljen na poenostavljeni Rayleigh-Plessetovi enačbi dinamike mehurčka. Narejene so bile trirazsežne simulacije kavitirajočega toka v različnih razmerah za dva osamljena profila.

Za dva profila smo posneli slike kavitacijskih struktur v različnih razmerah. Za določitev hitrostnega polja zunaj in znotraj kavitacijskega oblaka smo uporabili metodo PIV-LIF. Izmerili smo frekvence trganja kavitacijskega oblaka.

Numerično napovedane porazdelitve deleža pare in hitrostnega polja smo primerjali s preizkusnimi rezultati. Narejena je bila primerjava s preizkusi določenih in numerično napovedanih povprečnih dolžin kavitacijske strukture vzdolž profila. Primerjali smo tudi numerično napovedane in s preizkusi določene frekvence trganja kavitacijskega oblaka. V vseh primerih smo dobili dobro ujemanje med rezultati preizkusov in simulacij. Poleg tega je simulacija pravilno napovedala nastanek značilne podkvaste kavitacijske strukture.

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: kavitacija, dinamika tekočin, vizualizacija, metoda PIV-LIF)

This paper concerns a numerical and experimental study of cavitating flow around different single hydrofoils. The program package Fluent was used to calculate the unsteady flow, and the homogeneous flow principle was used to describe two-phase flow. The cavitation model based on a simplified Rayleigh-Plesset equation for bubble dynamics, was used to describe the appearance and collapse of a cavitation cloud. A 3D transient simulation of cavitating flow under different conditions for two hydrofoils was made.

Images of the vapour structures under different cavitation conditions for the two hydrofoils were acquired. A PIV-LIF method was used to obtain the velocity field inside and outside the vapour cavity. Measurements of the cavitation cloud shedding frequencies were made.

Numerically predicted distributions of the water vapour and the velocity field were compared with experimental results. The experimentally determined and numerically predicted mean cavity structure lengths along the hydrofoil were compared. Also, a comparison between the numerically predicted and the experimental cavitation cloud shedding frequencies was made. In all cases a good correlation between the experimental results and the numerical simulations was found. The simulation was also able to correctly predict the formation of typical "horseshoe" cavitation structures.

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: cavitation, computational fluid dynamics, visualization, particle image velocimetry (PIV))

0 UVOD

Pojav kavitacije v hidravličnih strojih vodi k problemu, kakor so vibracije, povečanje hidrodinamičnega upora, tlačni utripi, spremembe v

0 INTRODUCTION

The occurrence of cavitation in hydraulic machines leads to problems like vibration, an increase of hydrodynamic drag, pressure pulsation, changes

kinematiki toka, hrup in erozijo trdnih površin. Večina teh problemov je povezana s prehodnim obnašanjem kavitacijskih struktur [1], zato je študija neustaljenega obnašanja nujno potrebna za pravilno napoved prej omenjenih problemov.

V zadnjem desetletju je bilo razvitih mnogo metod za numerično simuliranje kavitirajočega toka. Večina teh metod obravnava dvofazni tok kot enofazni tok mešanice pare in vode. Uparjanje in kondenzacijo lahko modeliramo z različnimi izvornimi členi, ki so navadno izpeljani iz Rayleigh-Plessetove enačbe dinamike mehurčka ([2] do [5])) oziroma s tako imenovanim barotropičnim zakonom stanja, ki podaja odvisnost med gostoto mešanice pare in vode od lokalnega statičnega tlaka ([6] do [8]).

Prispevek obravnava preizkusno in numerično študijo neustaljenih pojavov kavitirajočega toka okoli dveh različnih profilov. Za določitev hitrostnega polja (zunaj in znotraj kavitacijskega oblaka) je bila uporabljena metoda vizualizacijske anemometrije (PIV) v kombinaciji s tehniko lasersko inducirane fluorescence (LIF). Trenutne slike parnih struktur smo posneli s kamero CCD. Za določitev robnih pogojev smo uporabili metodo laserske Dopplerjeve anemometrije (LDA), s katero smo določili hitrostni profil v ravnini pred profilom. Za trirazsežno nestacionarno simulacijo smo uporabili komercialni program za računalniško dinamiko tekočin Fluent 6.1.18. Za opis nestacionarnega obnašanja kavitacije, vključno s trganjem kavitacijskega oblaka, smo uporabili kavitacijski model, osnovan na enačbi dinamike mehurčka, ki je podrobneje opisan v [4].

1 POSTAVITEV PREIZKUSA

Preizkus je bil opravljen v kavitacijskem kanalu v Laboratoriju za turbinske in hidravlične stroje na Tehniški Univerzi v Darmstadtu.

Za preizkus smo uporabili dve preprosti geometrijski obliki. Osnovna geometrijska oblika je 50 mm širok, 107,9 mm dolg in 16 mm debel simetrični profil s polkrožnim vpadnim robom (PPVR - CLE) ter vzporednimi stenami. Z namenom, da bi dobili trirazsežne kavitacijske učinke, smo osnovno geometrijsko obliko spremenili tako, da smo vpadni rob profila odrezali pod kotom 25° in dobili profil z nesimetričnim vpadnim robom (PNVR - ALE) (sl. 1).

Profil je bil vstavljen v pravokotni testni odsek kavitacijskega kanala z zaprtim obtokom, kar omogoča spreminjanje tlaka sistema in posledično

in flow kinematics, noise and erosion of solid surfaces. Most of these problems are related to transient behaviour of cavitation structures [1]. Hence, a study of unsteady cavitation behaviour is essential for the correct prediction of these problems.

In the past decade a wide range of methods for the numerical simulation of cavitating flow were developed. Most of the studies treat the two-phase flow as a single vapour-liquid phase mixture flow. The evaporation and condensation can be modelled with different source terms that are usually derived from the Rayleigh-Plesset bubble dynamics equation ([2] to [5]) or by the so-called barotropic state law, which links the density of the vapour-liquid mixture to the local static pressure ([6] to [8]).

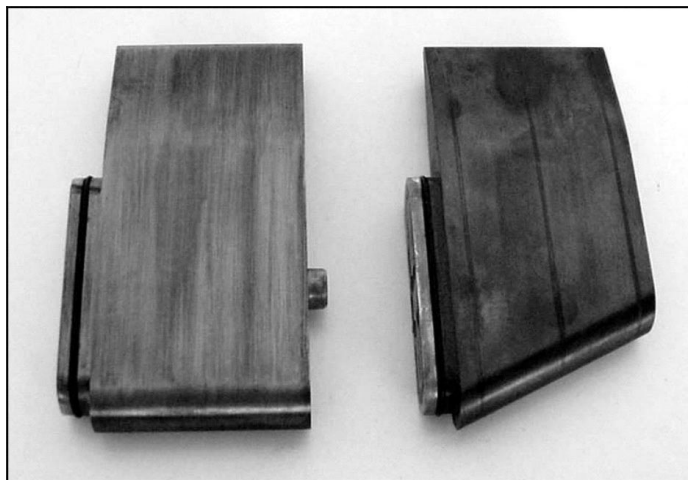
The paper discusses an experimental and numerical study of the unsteady phenomena of cavitating flow around two different hydrofoil configurations. The PIV (Particle Image Velocimetry) method combined with the LIF (Laser Induced Fluorescence) technique was used to determine the velocity field around the hydrofoil (outside and inside the vapour cavity). Instantaneous images of the vapour structures were recorded using a CCD camera. The LDA (Laser Doppler Anemometry) method was used to determine the boundary conditions by measuring the velocity in a plane in front of the hydrofoil. The commercial CFD (Computational Fluid Dynamics) code Fluent 6.1.18 was used for the 3D transient simulation. A cavitation model, based on bubble dynamics equations, described in [4], was used to describe the unsteady behaviour of the cavitation, including the shedding of the vapour structures.

1 EXPERIMENTAL SET-UP

The experiment was set up in a cavitation tunnel at the Laboratory for Turbomachinery and Fluid Power, Darmstadt University of Technology.

Two simple hydrofoils were used. The basic geometry is a 50-mm-wide, 107.9-mm-long and 16-mm-thick symmetrical hydrofoil with a circular leading edge and parallel walls (CLE – Circular Leading Edge hydrofoil). In order to obtain three-dimensional cavitation effects the basic geometry was modified by cutting the leading edge at an angle of 25 degrees (ALE – Asymmetric Leading Edge hydrofoil) (Fig. 1).

The hydrofoil was inserted into the rectangular test section of a cavitation tunnel with a closed circuit that made it possible to change the system pressure and consequently the cavitation number,



Sl. 1. Osnovni profil – PPVR (levo) in spremenjeni– PNVR (desno)
Fig. 1. Basic – CLE (left) and modified – ALE hydrofoil (right)

spreminjanje kavitacijskega števila, ki je definirano kot razlika med sistemskim tlakom in tlakom uparjanja (pri temperaturi sistema) deljena z dinamičnim tlakom:

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v(T_{\infty})}{\rho \cdot v^2 / 2} \quad (1)$$

Zmanjšanje kavitacijskega števila pomeni večjo verjetnost pojava kavitacije oziroma povečanje že prisotne kavitacije.

Hitrost v ravnini pred profilom je bila med preizkusom nespremenljiva $v = 13 \text{ m/s}$ ($Re = 208000$, glede na debelino profila). Obravnavali smo razviti kavitirajoči tok pri različnih vrednostih kavitacijskega števila (2,5, 2,3, 2,0) in 5° vpadnim kotom profila.

2 PREIZKUSNO VREDNOTENJE KAVITIRAJOČEGA TOKA

Obravnavali smo obliko in dinamiko kavitacijskih struktur ter hitrostno polje v okolici profila. S kamero CCD smo posneli slike kavitirajočega toka z dveh pogledov (od zgoraj in od strani) (sl. 2).

Hitrostno polje smo določili z uporabo metode PIV-LIF. Za preizkus smo uporabili laser, dve kameri CCD, osebni računalnik in enoto za zbiranje in nadzor (sl. 3). Za osvetlitev smo uporabili navpično ravnino laserske svetlobe (laser Nd-YAG) z valovno dolžino 532 nm (zeleni spekter) debeline približno 1 mm. Položaj laserske ravnine je bil 5 mm od sprednje stene (kjer je profil najkrajši). Frekvenca zajemanja slik je bila približno 2 Hz.

which is defined as the difference between the system and the vapour pressure (at system temperature) divided by the dynamic pressure:

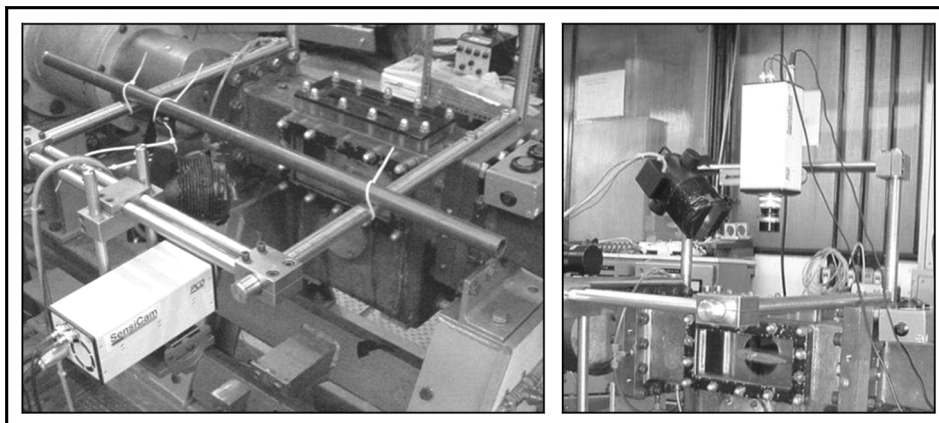
Decreasing the cavitation number results in a higher probability of cavitation occurrence or in an increase in the magnitude of the already-present cavitation.

The velocity in the reference plane in front of the hydrofoil was held constant at 13 m/s ($Re = 208000$ based on hydrofoil thickness). The developed cavitating flow at different values of the cavitation number (2.5, 2.3, 2.0) at a 5° angle of attack was observed.

2 EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE CAVITATING FLOW

The shape and dynamics of the cavitation structures and the velocity field around the hydrofoil were investigated. The images of the cavitating flow were recorded with a CCD camera from the side and from the top (Fig. 2).

The velocity field was determined with the PIV-LIF method. The experimental setup (Fig. 3) consisted of a laser, 2 CCD cameras, a PC and an acquisition-control unit. A Nd-YAG laser vertical light sheet with a wavelength of 532 nm (green spectrum) and approximately 1 mm thick was used for the illumination. The position of the light sheet was 5 mm from the front wall (where the hydrofoil is the shortest). The frequency of the image capturing was approximately 2 Hz.



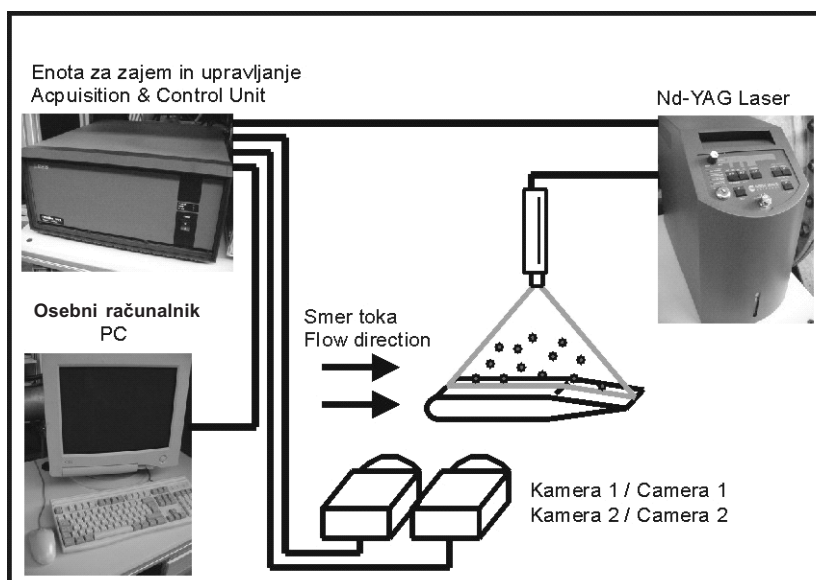
Sl. 2. Postavitev kamere za snemanje slik s strani (levo) in od zgoraj (desno)
Fig. 2. Camera set up for recording the side-view (left) and top-view (right) images

Problem uporabe metode PIV v kavirajočem toku je, da kavirajoče strukture odbijajo preveč svetlobe. Tako določitev hitrostnega polja znotraj kavirajočih struktur ni mogoča. Da bi dobili informacije o hitrostnem polju znotraj kavirajočih struktur, smo uporabili razmeroma novo tehniko, pri kateri združimo metodo PIV z metodo LIF (glej tudi [10]). Za zrno smo vodi dodali posebne fluorescentne delce PMMA-Rhodamin B, ki zeleno svetlobo (532 nm) odbijajo v rumenem spektru (590 nm).

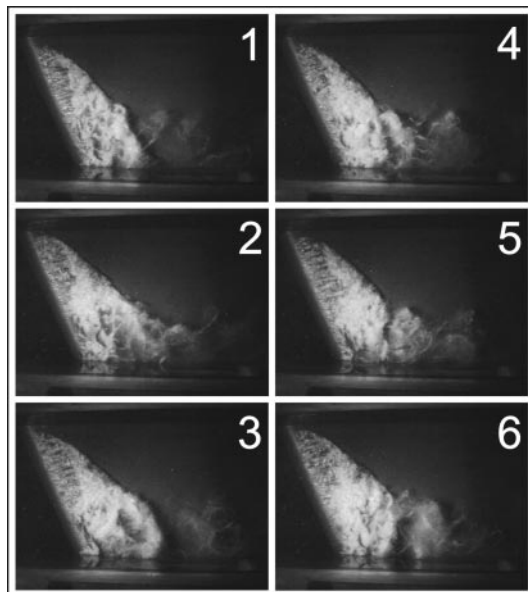
Tako je bila z uporabo dveh kamer CCD mogoča hkratna določitev hitrostnega polja in

The problem with using the PIV method in cavitation flow is that the present vapour structures reflect too much light so that the acquisition of the information about the velocity field inside the cavity is impossible. A relatively new technique of combining the PIV method with the LIF method was used to obtain the information about the velocity field outside and inside the vapour cavity [10]. For the seeding some special PMMA-Rhodamin B fluorescence particles that reflect the green light (532 nm) in the yellow spectrum (590 nm) were added to the water.

This way it was possible to use two CCD cameras (the first camera captured only light in yellow spec-



Sl. 3. Postavitev preizkusa za meritve z metodo PIV-LIF
Fig. 3. Experimental setup for measurements with the PIV-LIF method



Sl. 4. Trganje kavitacijskega oblaka nad profilom PNVR pri kavitacijskem številu $\sigma = 2,0$
 Fig. 4. Cavitation cloud separation on ALE hydrofoil at cavitation number $\sigma = 2.0$

porazdelitev pare (prva je zajemala samo svetlobo v rumenem spektru in posnela le slike delcev (kavitacijskih struktur na slikah ni mogoče videti), medtem ko je druga zajemala celoten svetlobni spekter in posnela slike kavitacijskih struktur). Da bi dobili informacijo o hitrostnem polju in pripadajoči kavitacijski strukturi na eni sliki, sta bili obe sliki združeni (sl. 5).

Hitrostno polje je bilo določeno samo s pogleda od strani, medtem ko so bile slike kavitacijskih struktur posnete tudi s pogleda od zgoraj (sl. 4) – tok teče z leve proti desni.

Zaporedje na sliki 4 je sestavljeno iz posameznih značilnih slik. Vidimo, da ima kavitacija ob sprednji steni (kjer je profil najkrajši) značilno dinamično obnašanje. Prihaja do trganja kavitacijskega oblaka, ki nato potuje s tokom in izgine v območju z višjim tlakom. Na drugi strani (kjer je profil najdaljši) je kavitacija ustaljena in ne prihaja do trganja oblaka.

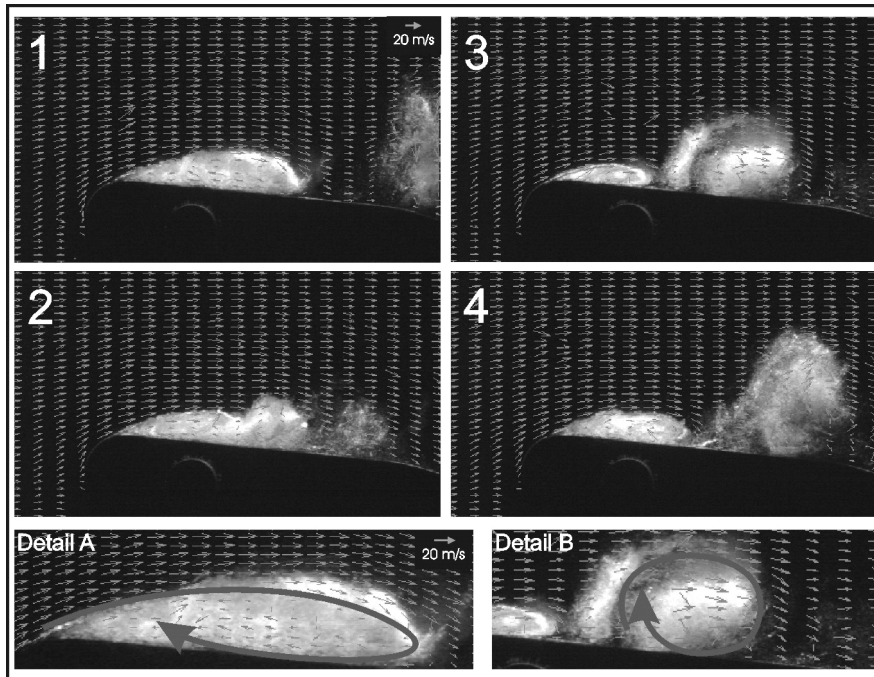
Na sliki 5 so prikazana štiri tipična stanja v postopku trganja kavitacijskega oblaka za PNVR pri $\sigma = 2,0$ ter dva povečana detajla. Po odtrganju (1), tik pred odtrganjem (2) in dva primera med samim trganjem (3 in 4). Detajla prikazujeta povratni curek znotraj pritrjene kavitacije (detajl A) in vrtnec za odtrganim kavitacijskim oblakom (detajl B). Tok teče z leve proti desni. Na levih dveh slikah (1 in 2) je mogoče znotraj pritrjene kavitacije opaziti

trum and recorded only the images of the tracer particles (the vapour structure is not visible in the image), while the other captured the whole light spectrum and recorded the image of the vapour cavity to determine the flow field and the distribution of the vapour simultaneously. The two pictures were superimposed to get information about the velocity field and about the dimensions of the vapour cavity in the picture (Fig. 5).

The velocity field was determined only from a side view, while the images of the vapour structures were recorded from the top view also (Fig. 4). In the figure the flow is from left to right.

The sequence is made from characteristic single images. We can see that the cavitation behaves dynamically at the front wall (where the hydrofoil is the shortest). In this region the separation of the cavitation cloud occurs. The separated cloud then travels and implodes in a region with higher pressure. On the other side (where the hydrofoil is the longest) the cavitation is steady (without cloud separation).

Four typical situations in the cavitation cloud separation process and two magnified details of the ALE hydrofoil at $\sigma = 2.0$ are shown in Fig. 5. After the cloud separation (1), just before the cloud separation (2), and two cases during the separation itself (3 and 4). The details show the re-entrant jet inside the attached part of the cavity (detail A) and a vortex behind the separated cavitation cloud (detail B). The flow is from left to right. A significant vortex (re-entrant jet) can be



Sl. 5. Primeri s preizkusi dobljenega hitrostnega polja in kavitacijskih struktur (profil z NVR pri $\sigma = 2,0$)
 Fig. 5. Examples of experimentally obtained flow field and vapour distribution (ALE hydrofoil at $\sigma = 2.0$)

značilen vrtinec (povratni curek). Povratni tok je prisoten od konca kavitacije do 75 % v njeno globino. Z desnih dveh slik (3 in 4) opazimo, da je povratni tok vzrok za trganje kavitacijskega oblaka. Vrtinec ostane znotraj odtrganega oblaka, ki potuje s tokom in izgine v območju z višjim tlakom. Kolaps kavitacijskega oblaka oblikuje nov povratni curek, ki povzroči trganje naslednjega kavitacijskega oblaka.

3 NUMERIČNA SIMULACIJA

Za simulacijo kavitirajočega toka smo uporabili komercialni program Fluent 6.1.18. Program uporablja strukturirane trirazsežne mreže in rešuje sistem časovno odvisnih Reynoldsovo povprečenih Navier-Stokesovih enačb (RPNSE-URANS). Numerični model uporablja posredno metodo končnih prostornin, zasnovan na algoritmu SIMPLE v povezavi z večfaznim in kavitacijskim modelom.

3.1 Večfazni model

Uporabljen je bil postopek homogenega toka mešanice. Lastnosti posameznih faz so vključene v lastnosti enofazne mešanice. Gostota (en. 2) in

seen inside the attached part of the cavitation on the left two pictures. The back flow is detectable from the cavity closure up to 75 % of its length. It can be seen from the right two pictures (3 and 4) that it causes the separation of the cavitation cloud. The vortex remains present inside the separated cloud, which travels with the flow and collapses in the region with higher pressure. The cavitation-cloud collapse forms a new re-entrant jet, which causes a new cloud separation and the process is repeated.

3 NUMERICAL SIMULATION

The commercial code Fluent 6.1.18 was used to calculate the cavitating flow. It is a 3D structured mesh code that solves time-dependent Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (URANS). The numerical model uses an implicit finite-volume scheme, based on a SIMPLE algorithm, associated with the multiphase and cavitation model.

3.1 Multiphase model

A single-fluid (mixture phase) approach was used. The properties of the individual phases are included in the single-mixture phase properties. The

viskoznost (en. 3) mešanice sta definirani s prostorninskim deležem pare v mešanici α :

$$\rho_m = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l \quad (2)$$

in

and

$$\mu_m = \alpha \mu_v + (1 - \alpha) \mu_l \quad (3).$$

Program rešuje kontinuitetno enačbo (4) in gibalno enačbo (5) za tok mešanice (indeks m) skupaj z enačbo prostorninskega deleža (en. 6) za drugo fazo (indeks k):

The continuity (Eq. 4) and momentum (Eq. 5) equations for the mixture flow (index m) together with the volume-fraction equation (Eq. 6) for the secondary phase (index k) are solved:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (6).$$

3.2 Turbulentni model

Za reševanje prenosnih enačb turbulentne kinetične energije in njene trosilne hitrosti je bil uporabljen turbulentni model RNG k- ε .

Rezultati simulacije, pri kateri smo uporabili običajni turbulentni model RNG k- ε se niso ujemali z eksperimentalnimi rezultati. Pomembnega povratnega toka, ki smo ga opazovali pri preizkusu ni bilo moč simulirati. Poleg tega je bila povprečna dolžina kavitacijske strukture vzdolž profila glede na preizkus za približno 50 odstotkov premajhna. Z namenom, da bi izboljšali simulacijo, smo spremenili člen turbulentne viskoznosti [9]. V območju z velikim deležem pare (majhne gostote mešanice) smo turbulentni model RNG k- ε spremenili z zmanjšanjem turbulentne viskoznosti mešanice (sl. 6):

3.2 Turbulence model

The RNG k- ε turbulence model was applied for solving the transport equations of the turbulent kinetic energy and its dissipation rate.

The results acquired with the use of the standard RNG k- ε turbulence model did not agree well with the experimental results. A significant backflow and cavitation-cloud separation seen during the experiments could not be simulated. Also, the mean cavity-structure length along the hydrofoil was about 50% too small. To improve the simulation a modification of the turbulent viscosity was applied [9]. In regions with higher vapour-volume fractions (lower mixture densities) a modification of the RNG k- ε turbulence model was made by reducing the turbulent viscosity of the mixture (Fig. 6):

$$\mu_t = f(\rho) \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$f(\rho) = \rho_v + \frac{(\rho_m - \rho_v)^n}{(\rho_l - \rho_v)^{n-1}} \quad \text{kjer je / where } n \gg 1 \quad (8).$$

Sprememba omeji kinetično energijo in zaradi tega omogoči nastanek povratnega curka ter trganje kavitacijskega oblaka.

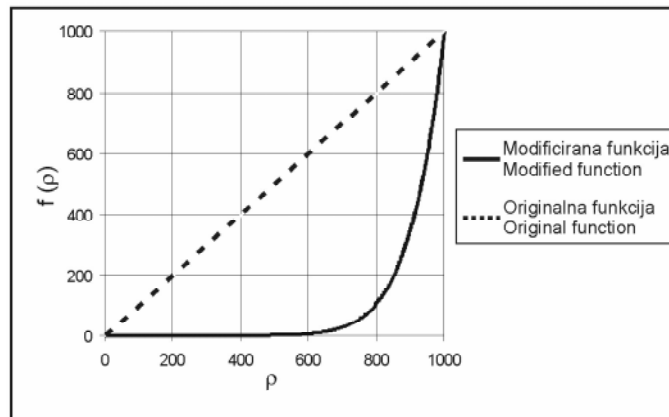
This modification limits the kinetic energy and consequently allows the formation of a re-entrant jet and the cavitation-cloud separation.

3.3 Kavitacijski model

Masni delež pare je podan s prenosno enačbo:

3.3 Cavitation model

The vapour mass fraction is given by the transport equation:



Sl. 6. Sprememba turbulentne viskoznosti
Fig. 6. Modification of the turbulent viscosity

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m f) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m f) = R_e - R_c \quad (9).$$

Izvirna člena R_e in R_c podajata nastajanje (uparjanje kapljavine) in kondenzacijo pare. Člena sta funkciji lokalnih razmer v toku (statičnega tlaka, hitrosti) in lastnosti tekočin (gostota kapljavine in pare, uparjalnega tlaka, površinske napetosti). Izpeljava členov je podana v [3].

Izvorna člena sta podana z:

$$R_e = C_e \cdot \frac{\sqrt{k}}{\gamma} \cdot \rho_l \cdot \rho_v \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{(p_v - p)}{\rho_l}} \cdot (1 - f_v - f_g) ; \quad \text{pri / when } p < p_v \quad (10)$$

- in z:

$$R_c = C_c \cdot \frac{\sqrt{k}}{\gamma} \cdot \rho_l \cdot \rho_l \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{(p - p_v)}{\rho_l}} \cdot f_v ; \quad \text{pri / when } p > p_v \quad (11).$$

kjer sta C_e in C_c empirični stalnici, k lokalna kinetična energija, γ površinska napetost, f_v masni delež pare, f_l masni delež kapljavine in f_g masni delež plinov v vodi.

4 SIMULACIJA IN REZULTATI

Preizkušeni so bili različni tipi in gostote mrež. Nazadnje je bila uporabljena strukturirana mreža tipa C s približno 360000 vozlišči. Ker so bile uporabljene običajne stenske funkcije, je vrednost y^+ ležala med 30 in 80. Za konvergirano rešitev posameznega koraka smo vzeli stanje, ko so ostanki znašali manj ko $5 \cdot 10^{-4}$. Za konvergirano rešitev posameznega časovnega koraka je bilo potrebnih približno 40 iteracij. Pogoji, pri katerih smo izvajali simulacije, so naslednji:

Source terms R_e and R_c define the vapour generation (liquid evaporation) and the vapour condensation, respectively. The source terms are functions of the local flow conditions (static pressure, velocity) and the fluid properties (liquid and vapour phase densities, vapour pressure and surface tension). The derivation of the source terms can be found in [3].

They are given by:

- and by:

where C_e and C_c are empirical constants, k is the local kinetic energy, γ is the surface tension, f_v is the vapour mass fraction, f_l is the liquid mass fraction and f_g is the mass fraction of the gases in the water.

4 SIMULATION AND RESULTS

Different types and resolutions of meshes were tested. A structured C-type mesh with about 360000 nodes was eventually chosen. Standard wall functions were applied, hence the y^+ value lies between 30 and 80. The time-step solution was considered converged when the residuals fell below $5 \cdot 10^{-4}$. Approximately 40 iterations per time step were needed to obtain a converged solution. The conditions applied for the simulation are the following:

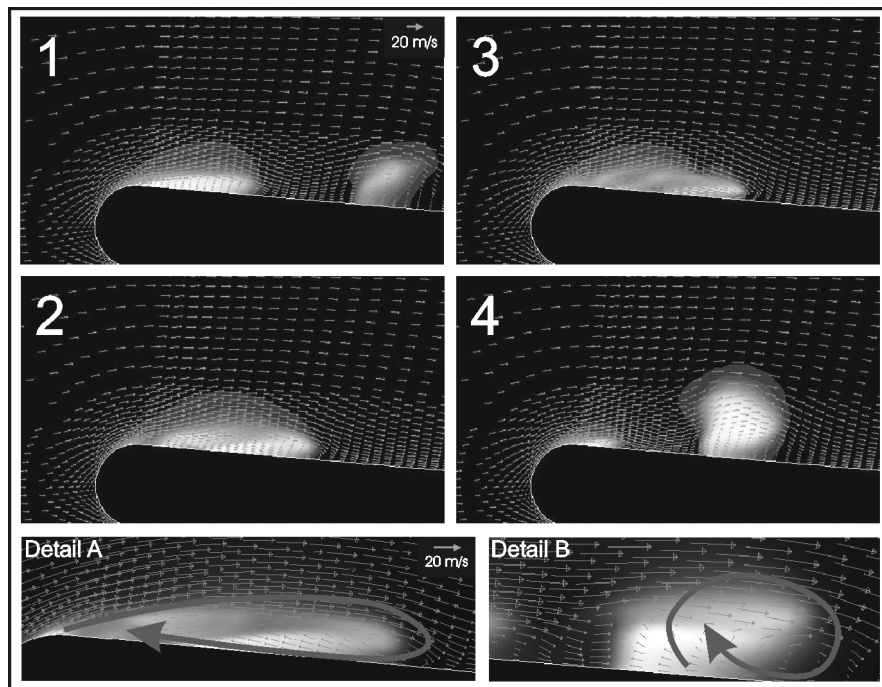
- Robni pogoji: hitrost na vstopu in statični tlak na izstopu. Na začetku simulacije smo predpostavili majhno hitrost toka, pri kateri kavitacije še ni. Hitrost toka smo nato večali, dokler nismo dosegli želenih razmer.
- Ker je bilo kavitacijsko število pri preizkusu določeno na mestu pred profilom, smo morali za določitev numeričnega kavitacijskega števila upoštevati tlačne izgube, ki nastanejo v testnem odseku. Želene razmere (kavitacijsko število) smo dosegli iterativno s primerjavo eksperimentalnega in numeričnega tlaka na mestu pred profilom.
- Preizkusili smo več dolžin časovnega koraka; na koncu smo uporabili korak dolg $2 \cdot 10^{-5}$ s.
- Čeprav lahko mešanica pare in kapljavine doseže zvočno hitrost že pri razmeroma majhnih hitrostih, so bili učinki stisljivosti, zaradi poenostvitve simulacije in zmanjšanja računskega časa, zanemarjeni.
- Boundary condition: Imposed velocity at inlet and static pressure at outlet. Initial transient treatment: A low velocity is initially applied to the flow field, for which no vapour appears. The velocity is then increased until the considered operating point is reached.
- Because the experimental cavitation number is based on upstream pressure, the losses generated in the test section have to be taken into account in the calculation of the numerical cavitation number. The desired operating point (cavitation number) is reached by comparing the experimental and numerical upstream pressures.
- Different time-step values were tested; eventually a time step of $2 \cdot 10^{-5}$ s was used.
- Although the vapour-fluid mixture flow can reach the speed of sound at relatively low velocities, compressibility effects were neglected in order to simplify the calculation and decrease the computational time.

4.1 Profil s PVR

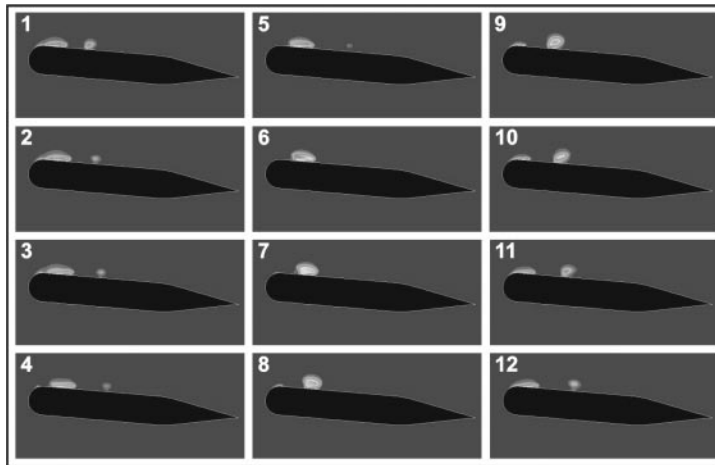
Na sliki 7 so prikazane trenutne porazdelitve prostorninskega deleža pare skupaj s pripadajočim hitrostnim poljem. Tok teče z leve proti desni. Kakor na sliki 5 so prikazani štirje primeri (po odtrganju

4.1 CLE hydrofoil

The instantaneous vapour volume fraction distributions together with the velocity field are shown in Fig. 7. The flow is from left to right. Four cases and two details are shown (like in Fig. 5 – after the cloud separa-



Sl. 7. Primeri numerične napovedi hitrostnega polja in porazdelitve pare (profil s PVR pri $\sigma = 2,0$)
Fig. 7. Examples of numerically predicted flow and vapour field (CLE hydrofoil at $\sigma = 2.0$)



Sl. 8. Zaporedje trenutnih porazdelitev prostorninskega deleža pare pri $\sigma = 2,5$ (pogled od strani)
 Fig. 8. Sequence of instantaneous vapour volume-fraction distributions at $\sigma = 2.5$ (side view)

oblaka (1), tik pred odtrganjem oblaka (2) ter dve stanji med trganjem oblaka (3 in 4)) ter dva detajla. Pred odtrganjem oblaka (leva spodnja slička) lahko vidimo vrtnec (povratni curek). Povratni tok, ki je znotraj pritrjene kavitacije, zasledimo do 75 % v njeni globini. V stanju po odtrganju kavitacijskega oblaka lahko razločimo dva vrtinca. Prvega znotraj pritrjene kavitacije (povratni curek), drugega pa nekoliko za odtrganim kavitacijskim oblakom (nastajajoči povratni curek).

Očitno je, da se v vseh primerih numerično napovedano hitrostno polje dobro ujema s preizkusnimi rezultati (sl. 5, 7).

Na sliki 8 vidimo zaporedje trenutnih porazdelitev prostorninskega deleža pare za profil s PVR pri kavitacijskem številu 2,5. Tok teče z leve proti desni. Časovni korak med sličicami je 0,4 ms. Vidimo, da se pritrjena kavitacija zvečuje, dokler se ne odtrga kavitacijski oblak. Pritrjena kavitacija se nato sprva manjša, odtrgani oblak pa potuje s tokom in izgine v območju z višjim tlakom. Med tem se začne pritrjena kavitacija zopet večati in postopek se ponovi.

Med preizkusom smo lahko opazili značilne podkvaste kavitacijske strukture. Na sliki 9 vidimo dve s preizkusi posneti (levo) in numerično napovedani (desno) kavitacijski strukturi. Tok teče z leve proti desni.

4.3 Profil z NVR

Narejena je bila trirazsežna simulacija kavitacije na profilu s poševnim vpadnim robom. Na

tion (1), just before cavitation-cloud separation (2) and two pictures showing the situation during the separation itself (3 and 4)). A single vortex (re-entrant jet) can be seen in the case before cloud separation (bottom-left picture). The back flow is present only inside the vapour cavity. It penetrates the cavity up to 75% of its length. In the case after the cloud separation, two vortices can be determined. One inside the attached vapour cavity (re-entrant jet) and the other one downstream of the separated cavitation cloud (forming the re-entrant jet).

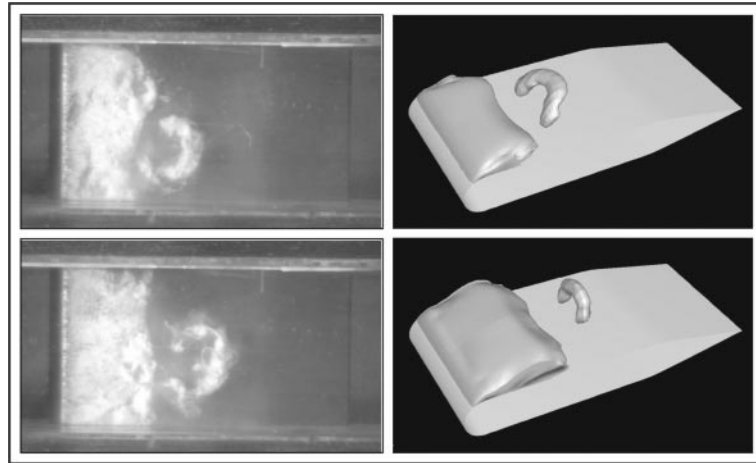
It is obvious that in all cases the numerically predicted velocity field shows a good correlation with the experimental results (Fig. 5 and 7).

A sequence of instantaneous vapour volume fraction distributions for the CLE hydrofoil at cavitation number 2.5 is shown in Fig 8. Flow is from left to right. The time delay between two successive images is 0.4 ms. It is clear that the attached cavitation first grows, until the separation of a cavitation cloud occurs. The attached cavitation part then decreases while the cavitation cloud travels with the flow and collapses in a higher pressure region. Meanwhile, the attached cavitation starts to grow again and the process is repeated.

A typical "horseshoe" vapour structure could be observed during the experiment. Fig. 9 shows two experimentally recorded (left) and numerically predicted (right) cavitation structures. The flow is from left to right.

4.3 ALE hydrofoil

A 3-dimensional simulation of cavitating flow around a hydrofoil with an asymmetric leading



Sl. 9. Eksperimentalni posnetek (levo) in numerična napoved (desno) podkvaste kavitacijske strukture
Fig. 9. Experimental image (left) and numerical prediction (right) of the "horseshoe" cavitation structure

sliki 10 vidimo trenutne poglede na izopovršino z vrednostjo 0,1 prostorninskega deleža pare. Tok teče z leve proti desni. Časovni korak med sličicami je 0,6 ms. Podobno kakor pri preizkusu [10] vidimo v območju blizu prednje stene očitno dinamično obnašanje kavitacije (utripi kavitacije s trganjem kavitacijskega oblaka). Ob zadnji steni ostaja kavitacija ustaljena (brez trganja kavitacijskega oblaka).

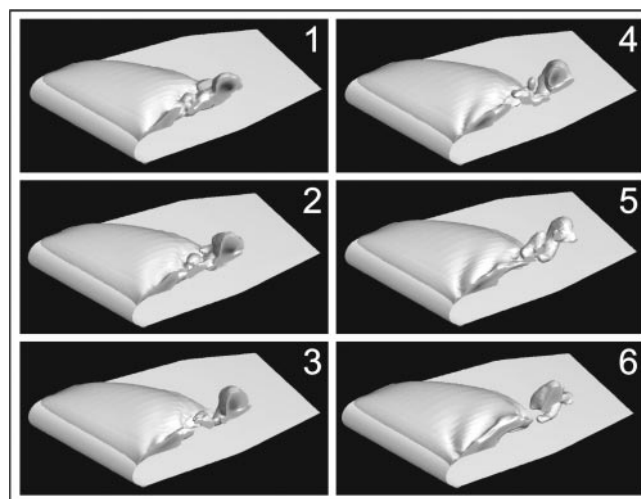
edge was performed. Instantaneous views of the 0.1 vapour volume-fraction isosurface are shown (Fig. 10). The flow is from left to right. The time delay between successive images is 0.6 ms. Similar to the experiment [10] a significant dynamic cavitation behaviour can be seen near the front wall (pulsations of the cavitation region with the separation of a cavitation cloud), while the cavitation at the rear wall remains steady (with no cloud separation).

4.4 Povprečna dolžina kavitacije

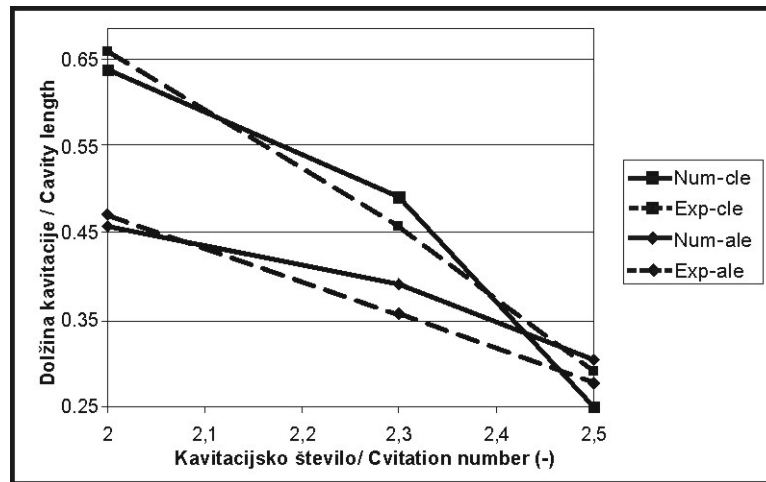
Primerjali smo eksperimentalno izmerjeno in numerično napovedano povprečno

4.4 The mean cavity length

The experimentally measured mean cavity structure length along the hydrofoil was compared to the



Sl. 10. Numerično napovedan časovni razvoj kavitacijske strukture pri $\sigma = 2,0$
Fig. 10. Numerically predicted time evolution of the cavitation structure at $\sigma = 2.0$



Sl. 11. Numerično napovedana in s preizkusi določena povprečna dolžina kavitacije
Fig. 11. Numerically predicted and experimentally determined mean cavity length

dolžino kavitacijske strukture vzdolž profila (sl. 11). Povprečno kavitacijsko strukturo smo določili s povprečenjem 50 trenutnih slik kavitacije. Za profil s PVR smo dolžino določili na sredini profila, za profil z NVR pa na mestu laserske ravnine (5 mm od sprednje stene – kjer je profil najkrajši).

Rezultati kažejo, da se povprečna dolžina kavitacije povečuje, ko manjšamo kavitacijsko število. Odvisnost je pri numerični simulaciji pravilno napovedana. Glede na to, da je določanje povprečne velikosti kavitacijske strukture (eksperimentalne ali numerične) razmeroma nenatančno, so rezultati numerične simulacije sprejemljivi.

4.5 Dinamično obnašanje kavitacije

Na sliki 12 so prikazani eksperimentalni in numerični rezultati vrednosti frekvenc trganja kavitacijskega oblaka v različnih razmerah. Eksperimentalne vrednosti frekvenc trganja za profil s PVR smo dobili s prejšnjih meritev dinamičnih tlakov na površini profila ([11] in [12]). Frekvence trganja za profil z NVR smo dobili s filmov, ki smo jih posneli s hitro kamero (približno 2800 sličic na sekundo). Merili smo frekvence za različna kavitacijska števila med 1,8 in 2,7. Numerične frekvence trganja smo izračunali iz simulacije v trajanju približno 10 ponovitev.

Vidimo (sl. 12), da imajo numerično napovedane in s preizkusi določene frekvence trganja enak značaj. Frekvenca trganja se manjša, ko manjšamo kavitacijsko število. V primeru profila s PVR so napovedi frekvence nekoliko previsoke,

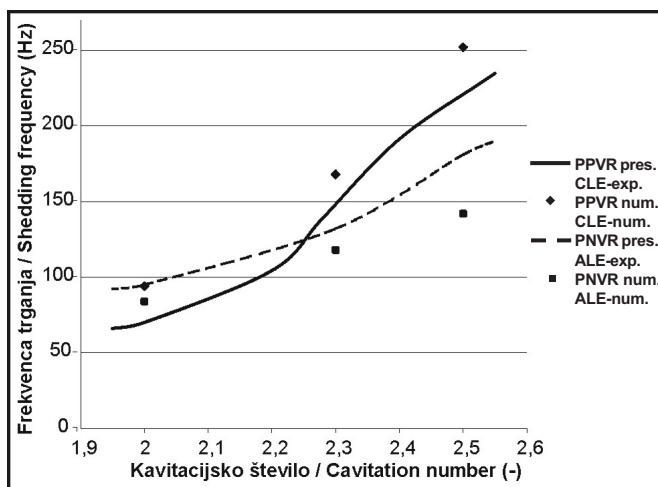
numerically predicted one (Fig. 11). The mean cavitation structure was determined by averaging 50 instantaneous images of the cavitation. For the CLE hydrofoil the length was determined in the middle of the hydrofoil, while for the ALE hydrofoil the length corresponds to the position of the laser light plane (5 mm from the front wall – where the hydrofoil is the shortest).

The results show that the mean cavity length grows when the cavitation number is decreased. The trend is correctly predicted in the numerical simulation. Since the determination of the boundary of the mean cavitation structure (experimental or simulated) is relatively inaccurate, the results of numerical simulation are acceptable.

4.5 The dynamic behaviour of cavitation

Experimental and numerical values for vapour-cloud shedding frequencies for different operating conditions are presented in Fig. 12. The experimental shedding frequencies for the CLE hydrofoil were obtained from similar past measurements of the dynamic pressures on the surface of the hydrofoils ([11] and [12]). The shedding frequencies for the ALE hydrofoil were deduced from the images of a high-speed movie (approximately 2800 fps). Frequencies for different cavitation numbers from 1.8 to 2.7 were measured. The numerical frequencies were deduced from a simulation of about 10 cycles.

It can be seen (Fig. 12) that the numerically predicted and experimental shedding frequencies show the same trend. The shedding frequency decreases when the cavitation number is decreased. In the case of the CLE hydrofoil the predicted frequencies are a little higher,



Sl. 12. Eksperimentalne in numerične frekvence trganja kavitacijskega oblaka

Fig. 12. Experimental and numerical shedding frequencies

v primeru profila z NVR pa nekoliko manjše. Frekvence trganja niso popolnoma nespremenljive. Nihanja v vrednosti lahko ocenimo na $\pm 10\%$ od srednje vrednosti za profil s PVR in $\pm 18\%$ za profil z NVR. Ker je dinamika kavitacije postopek, ki je za simulacijo zelo zahteven, imamo lahko simulacijo za sprejemljivo, če so simulirane in eksperimentalne frekvence trganja enakega velikostnega reda.

while for the ALE case the predicted frequencies are lower. The shedding frequencies are not perfectly constant. Fluctuations can be estimated in a range of $\pm 10\%$ from the mean value for the CLE hydrofoil and $\pm 18\%$ for the ALE hydrofoil. Cavitation dynamics is a particularly complicated process to simulate. The simulation is considered acceptable if numerically simulated shedding frequencies are of the same order of magnitude as the experimentally obtained ones.

5 SKLEPI

Narejeni sta bili numerična in eksperimentalna študija kavitirajočih tokov v različnih razmerah na dveh različnih profilih.

Posneli smo slike kavitacijskih struktur in določili povprečne dolžine kavitacije. Z uporabo razmeroma nove metode PIV-LIF nam je uspelo določiti hitrostno polje zunaj in znotraj kavitacije. S filmov, ki smo jih posneli s hitro kamero, smo določili frekvence trganja kavitacijskih oblakov.

Za simulacijo kavitacije smo uporabili tržni program za računalniško dinamiko tekočin Fluent 6.1.18. Rezultati numerične simulacije kažejo dobro ujemanje z eksperimentalnimi meritvami. Oblike kavitacijskih struktur (na primer podkvasta struktura) so bile pravilno napovedane. Napovedane povprečne dolžine kavitacije se razmeroma dobro ujemajo z eksperimentalno določenimi. Hitrostno polje znotraj kavitacije in zunaj nje je zelo dobro simulirano. Pravilno je napovedan povratni curek, ki povzroči trganje kavitacijskega oblaka. Prav tako

5 CONCLUSIONS

Numerical and experimental investigations of different cavitating flow conditions on two different hydrofoils were performed.

Images of the cavitation structures were recorded and the mean cavitation lengths were determined. With the use of a relatively new PIV-LIF method we were able to determine the velocity fields outside and inside cavitation. From films that were recorded by high-speed camera the cavitation-cloud shedding frequencies were determined.

A commercial CFD program, Fluent 6.1.18, was used for the simulation of the cavitation. The results of the numerical simulation show a good correlation with the experimental measurements. The shapes of the cavitation structures (for example, the "horseshoe" shape) were correctly predicted. The predicted mean lengths of the cavities agree relatively well with the experiment. The velocity fields inside and outside the vapour cavity are particularly well simulated. The backflow phenomenon that causes cavitation-cloud separation was correctly predicted. The simulation also shows good

simulacija dobro napove dinamično obnašanje kavitacijskih oblakov. Simulirane frekvence trganja kavitacijskih oblakov so za primer profila s PVR nekoliko višje za primer profila z NVR pa nekoliko nižje od eksperimentalno določenih.

Naslednji korak je izboljšava simulacije z upoštevanjem učinkov stisljivosti. Izziv je tudi zmanjšanje računskega časa simulacije, ki je presegal 300 ur na osebem računalniku s procesorjem Pentium IV – 2,4 GHz (glej [13]).

Predstavljeni rezultati obetajo možnost napovedi dinamičnih učinkov kavitacije, na primer kavitacijske erozije, z izključno numeričnimi orodji.

prediction of the dynamic behaviour of cloud cavitation. The simulated frequencies of vapour-cloud shedding are generally a bit higher than the experimentally obtained ones for the CLE hydrofoil and lower for the ALE hydrofoil.

The next step is to upgrade the simulation by considering the compressibility effects. Another challenge is to reduce the computational time, which exceeded 300 hours for a simulation using a Pentium IV – 2.4 GHz processor [13].

The presented results promise the possibility of the prediction of dynamic cavitation effects, like cavitation erosion, using only CFD.

6 SIMBOLI 6 NOMENCLATURE

empirična konstanta	C_e	-	empirical constant
empirična konstanta	C_c	-	empirical constant
sila	F	N	force
masni delež	f	-	mass fraction
masni delež pare	f_v	-	vapour mass fraction
masni delež plinov	f_g	-	gas mass fraction
težnostni pospešek	g	m/s ²	gravitational acceleration
turbulentna kinetična energija	k	m ² /s ²	turbulence kinetic energy
masni tok	m	kg/s	mass flow
tlak	p	Pa	pressure
tlak uparjanja	p_v	Pa	vapour pressure
hitrost mešanice	v_m	m/s	mixture velocity
hitrost k -te faze	v_k	m/s	k -th phase velocity
prostorninski delež k -te faze	α_k	-	k -th phase volume fraction
disipacijska hitrost turbulence	ε	m ² /s ³	turbulence dissipation rate
površinska napetost	γ	N/m	surface tension
viskoznost mešanice	μ_m	Pa s	mixture viscosity
gostota kapljevine	ρ_l	kg/m ³	liquid density
gostota k -te faze	ρ_k	kg/m ³	k -th phase density
gostota mešanice	ρ_m	kg/m ³	mixture density
gostota pare	ρ_v	kg/m ³	vapour density
kavitacijsko število	σ	-	cavitation number

7 LITERATURA 7 REFERENCES

- [1] Širok, B., M. Dular, M. Novak, M. Hocevar, B. Stoffel, G. Ludwig, B. Bachert (2002) The influence of cavitation structures on the erosion of a symmetrical hydrofoil in a cavitation tunnel; *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 48, no. 7, Ljubljana, Slovenia.
- [2] Kubota, A., H. Kato, H. Yamaguchi (1992) A new modelling of cavitating flows: A numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section; *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 240, 59-96.
- [3] Sauer, J. (2000) Instationär kavitierende Strömungen - Ein neues Modell, basierend auf Front Capturing (VoF) und Blasendynamik – PhD thesis; *Universität Karlsruhe (TH)*, Karlsruhe.

- [4] Singhal, A.K., Li H., M.M. Atahavale, Y. Jiang Y. (2002) Mathematical basis and validation of the full cavitation model; *Journal of Fluids Engineering*, 124, 617-624.
- [5] Dular, M., B. Širok, B. Stoffel, B. Bachert, R. Bachert (2003) Numerical simulation of cavitation on a single hydrofoil in a cavitation tunnel; *Slovensko društvo za mehaniko*, Kuhljevi dnevi, Zreče.
- [6] Coutier-Delgosha, O., R. Fortes-Patella, J.L. Reboud (2001) Evaluation of turbulence model influence on the numerical simulations on unsteady cavitation; *Proceedings of ASME FEDSM 01, 2001 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, New Orleans, Louisiana, May 29-June 1.
- [7] Hofmann, M., H. Lohrberg, G. Ludwig, B. Stoffel, J.-L. Reboud, R. Fortes-Patella (1999) Numerical and experimental investigations on the self - oscillating behaviour of cloud cavitation - Part 1: Visualisation; *Proceedings of the 3rd ASME / JSME Joint Fluids Engineering Conference*, San Francisco CA.
- [8] Lohrberg, H., B. Stoffel, R. Fortes-Patella, J.L. Reboud (2001) Numerical and experimental investigations on the cavitation flow in cascade of hydrofoils; *Proceedings of the Fourth International Symposium on Cavitation*, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA, 20-23 June,
- [9] Reboud, J.L., B. Stutz, O. Coutier (1998) Two-phase flow structure of cavitation: experiment and modelling of unsteady effects; *Third International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France.
- [10] Bachert, R., B. Stoffel, R. Schilling, M. Frobenius (2003) Three-dimensional, unsteady cavitation effects on a single hydrofoil and in a radial pump – Measurements and numerical simulations; Part one: Experiments; *Proceedings of the Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan, November 1-4.
- [11] Hofmann, M. (2001) Ein Beitrag zur Verminderung des erosiven Potentials kavitierender Stömungen – PhD thesis; *Technische Universität Darmstadt*, Darmstadt.
- [12] Boehm, R. (1998) Erfassung und hydrodynamische Beeinflussung fortgeschrittener Kavitationszustände und ihrer erosiven Aggressivität – PhD Thesis; *Technische Universität Darmstadt*, Darmstadt.
- [13] Frobenius, M., R. Schilling, R. Bachert, B. Stoffel (2003) Three-dimensional, unsteady cavitation effects on a single hydrofoil and in a radial pump – Measurements and numerical simulations; Part two: Numerical simulation; *Proceedings of the Fifth International Symposium on Cavitation*, Osaka, Japan, November 1-4.

Naslova avtorjev: Matevž Dular

prof.dr. Brane Širok
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana
matevz.dular@fs.uni-lj.si
brane.sirok@fs.uni-lj.si

Rudolf Bachert
prof. dr. Bernd Stoffel
Tehnična univerza Darmstadt
Magdalenenstrasse 4
D-64289 Darmstadt, Nemčija
rbachert@tfa.maschinenbau.tu-darmstadt.de
stoffel@tfa.maschinenbau.tu-darmstadt.de

Authors' Addresses: Matevž Dular

Prof.Dr. Brane Širok
University of Ljubljana
Faculty of Mechanical Eng.
Aškerčeva 6
1000 Ljubljana, Slovenia
matevz.dular@fs.uni-lj.si
brane.sirok@fs.uni-lj.si

Rudolf Bachert
Prof.Dr. Bernd Stoffel
Darmstadt University of Tech.
Magdalenenstrasse 4
D-64289 Darmstadt, Germany
rbachert@tfa.maschinenbau.tu-darmstadt.de
stoffel@tfa.maschinenbau.tu-darmstadt.de

Prejeto: 29.6.2004
Received:

Sprejeto: 2.12.2004
Accepted:

Odrpito za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year

Oblikovanje prilagodljivega obdelovalnega sistema z genetskimi algoritmi

A Model for Forming a Flexible Manufacturing System Using Genetic Algorithms

Mirko Ficko - Miran Brezočnik - Jože Balič

Znano je, da je mogoče z dobro razmestitvijo naprav v prilagodljivem obdelovalnem sistemu zmanjšati spremenljive prenosne stroške in s tem skupne izdelovalne stroške in si tako zagotoviti konkurenčno prednost. Do sedaj so bile vpeljane različne metode razporejanja, vendar problem še ni zadovoljivo rešen. V prispevku je opisana metoda za razporejanje strojev in naprav v prilagodljivem obdelovalnem sistemu z metodo genetskih algoritmov. Predpostavljena je črtna razporeditev enot prilagodljivega obdelovalnega sistema. S predlagano metodo je mogoče poiskati optimalno razporeditev glede na postavljeno ciljno funkcijo, ki zajema spremenljive stroške prenosa.

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: sistemi obdelovalni prilagodljivi, algoritmi genetski, prenos notranji, razporeditve strojev)

It is well-known that with a proper layout of devices in a flexible manufacturing system it is possible to reduce the variable transport costs and, consequently, the total manufacturing costs, and thus secure a competitive advantage. So far, a variety of methods of layout have been introduced, but the problem has not been satisfactorily solved. This paper describes a method of placing machines and devices in a FMS using a genetic algorithm method. The line layout of the units of the FMS system is assumed. With the proposed method it is possible to ensure optimum layout with respect to the set target function including variable transport costs.

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: flexible manufacturing systems, genetic algorithms, transport, placement methods, placing machines)

0 UVOD

Do danes so bili narejeni veliki koraki pri razvoju proizvodne tehnologije. V svetu so bili izvedeni mnogi prilagodljivi obdelovalni sistemi (POS). Le-ti so odgovor na zahteve trga po mnogih različicah izdelka in njegovi vedno krajši dobi trajanja. Prilagodljiv obdelovalni sistem je sestavljen iz podsistemov, ki so načrtovani in izvedeni tako, da delujejo kot celota [2]. Vse komponente prilagodljivega obdelovalnega sistema so med seboj povezane in delujejo s ciljno strategijo, da izdelajo izdelke v primernem času in ob primerni učinkovitosti [2]. POS-i imajo na račun visoke avtomatizacije sicer visoke stopnje izkoriščenosti, vendar moramo z njimi izdelati izdelke tudi ceneje kakor z nepovezanimi posameznimi stroji [8].

0 INTRODUCTION

Great steps forward have been made in the development of production technology. Many flexible manufacturing systems (FMSs) have been designed and made all around the world. These systems are an answer to the market requirements for many versions of a product and its ever-shorter service life. A FMS consists of subsystems designed and made in such a way that they operate as a single unit. [2]. All the components of the FMS are interconnected and operate with the target strategy of producing products within a suitable time and with the proper efficiency [2]. Due to high levels of automation the FMSs are very occupied, and they are also expected to make products cheaper than non-connected individual machines [8].

Eden izmed ključnih dejavnikov uspeha pri POS-ih je prenos med posameznimi deli sistema. Tako je razporejanje naprav, strojev in delovnih mest v zadnjih dveh desetletjih predmet živahnega proučevanja [4]. S smotrnim razmeščanjem delovnih naprav (strojev, tehnološke opreme) znotraj nekih meja (npr. tovarniške hale), poskušamo čim bolj zmanjšati stroške ravnanja z materialom, delovnimi sredstvi in s pomožnimi sredstvi [11]. Največkrat za ciljno funkcijo izberemo najmanjše skupne stroške ravnanja s predmeti dela. Ti stroški so v splošnem vsota stroškov prenosa (ti so sorazmerni z intenzivnostjo pretoka in z razdaljami) in preostalih stroškov. Za POS, ki ga načrtujemo na novo, moramo na najboljši mogoči način razmestiti naprave. Kot kolikostni kriterij razmeščanja naprav se uporabljajo skupni spremenljivi prenosni stroški med delovnimi napravami, v določenem časovnem obdobju prenešenih količin surovin, obdelovancev in polizdelkov.

Tako je optimalna razporeditev naprav in strojev v obdelovalnem sistemu ena izmed temeljnih zahtev pri načrtovanju POS-a, saj so dobre rešitve pri načrtovanju takšnega sistema temelj za njegovo učinkovito delovanje in nizke stroške obratovanja. Ocenjeno je bilo, da do 50 odstotkov izdelovalnih stroškov izhaja iz ravnanja s predmeti dela, z dobro razmestitvijo naprav je mogoče omenjene stroške zmanjšati za 10 do 30 odstotkov [10]. Zato je že v zgodnji fazi načrtovanja sistema treba poznati razmestitev naprav.

V tem prispevku predlagamo razporejanje naprav in strojev v POS-u z genetskimi algoritmi. V razdelku 1 je podano trenutno stanje raziskav na tem področju. V razdelku 2 je predstavljena glavna zamisel predlaganega postopka. Prikazuje tudi kodiranje organizma, funkcijo prilagojenosti in ovrednotenje organizmov. V razdelku 3 je podan primer razporejanja naprav v POS-u. V sklepu sledijo razprava in smernice za nadaljnje delo.

1 PREGLED STANJA RAZISKAV

Večina običajnih postopkov pri razporejanju predmetov po površini temelji na predpostavki, da so lege določene vnaprej. Pri razporejanju se držijo vnaprej natančno določenega postopka. Heragu in Kusiak sta opozorila na dejstvo, da se POS-i razlikujejo od običajnih proizvodnih sistemov [5]. POS-i vključujejo stroje in naprave, ki po navadi niso

One of the key factors in the successful operation of a FMS is the transport between the individual parts of the system; the layout of devices, machines and workplaces was extensively studied during the past two decades [4]. The proper placing of working devices (machines, technological equipment) within certain limits (e. g., a workshop) is expected to reduce the costs of handling materials, working means and auxiliary means [11]. In most cases the minimum cost of handling work pieces is selected as the target function. In general these costs are the sum of the transport costs (which are proportional to the flow intensity and distances) and other costs. For a newly designed FMS the devices must be placed in the best possible manner. The total variable transport costs of raw materials, workpieces and semi-finished products transported between the working devices within a certain time period are used as the quantitative criterion of placing of devices.

The optimum layout of devices and machines in the manufacturing system is one of the basic requirements for the design of the FMS, since good solutions in designing such system are a prerequisite for its efficient functioning and low cost of operation. It has been estimated that 20% to 50% of manufacturing costs are due to the handling of work pieces; the proper placing of devices can reduce these costs by 10% to 30% [10]. This means that the placing of devices must be known at an early stage of designing the system.

This paper proposes that the machines and devices in the FMS are placed on the basis of genetic algorithms (GAs). Section 1 discusses the present state of research in this area. Section 2 presents the basic concept of the proposed approach; it also presents the coding of the organisms, the fitness function and the evaluation of organisms. Section 3 gives an example of placing the devices in a FMS. In the Conclusion are the discussion and the guidelines for further work.

1 A SURVEY OF THE STATE OF CURRENT RESEARCH

Most conventional approaches to the placing of objects on surface are based on the assumption that the positions are determined in advance. During placing they adhere to an exactly determined procedure. Heragu and Kusiak pointed out that FMSs differ from conventional production systems [5]. FMSs include devices and machines that do not usually have

enakih mer, prav tako niso trdno določene razdalje med posameznimi napravami [5]. Tako ni mogoče vnaprej določiti položaje in nato po njih razporejati naprave. Zaradi teh dejstev je v POS-u praktično nemogoče razporejati delovne naprave in delovna mesta z metodami, ki delujejo po načelu eno mesto ena naprava.

Zaradi tega so razvili številne heuristične postopke, ki pa ravno tako uporabljajo različne predpostavke in poenostavitve, zaradi česar je rešitev zgolj približna. Vse metode imajo za cilj najmanjše prenosne stroške, razlikujejo pa se po zahtevnosti, predvsem po dolžini postopka. Ni pa mogoče z gotovostjo reči, katera od poglavitnih metod oziroma metod za izboljšanje postavitve je najboljša [9].

Vendar je področje raziskovanja še vedno zanimivo za mnoge raziskovalce, saj se dandanes rešujejo problemi z novimi, sodobnejšimi metodami in z možnostjo uporabe mnogo večje računske moči sodobnih računalnikov. Danes to področje raziskav obsega različne metode in cilje. Glede na cilje, ki jih želimo z razporejanjem naprav doseči, se razlikuje tudi primernost metod razporejanja.

Vsem metodam je skupno, da vzamejo prostor za nespremenljiv, spreminjati je mogoče le razdelitev prostora. Prostor lahko predstavimo glede na značilnosti predmetov, ki jih razporejamo [7]:

- Prostor, razdeljen na ločene dele (v tem primeru poteka razporejanje po načelu: en predmet na eno mesto);
- Prostor, predstavljen kot prosta površina (v tem primeru imamo prirejanje več predmetov na skupno površino);
- Prostor, predstavljen kot površina in oblika.

Računalniško podprto razporejanje naprav terja ovrednotenje razporeditve. Obstajajo trije glavni načini ovrednotenja razporeditve. Po prvem načinu se razporeditev ovrednoti z uporabo ene same stroškovne funkcije. Po navadi je to stroškovna funkcija, po kateri iščemo najmanjše stroške glede na stroške prenosa materiala med napravami. Čeprav v tej stroškovni funkciji niso zajeti mnogi drugi kriteriji razvrščanja, je ta način ovrednotenja najpogostejši. Pri drugem načinu se razporeditev ovrednoti glede na razmerja med sosednjimi napravami. Ta način temelji na teoriji grafov. Tretji način ovrednotenja optimira razporeditev glede na več kriterijev in pri tem upošteva medsebojne odvisnosti. Upoštevani so lahko lega, usmeritev, neposredna okolica, pot, oddaljenost itn.

identical dimensions, and also the distances between the individual machines are not fixed [5]. As a result, it is not possible to determine in advance the locations and then to place the devices at these locations. For this reason it is practically impossible with an FMS to locate the working device and workplaces using methods based on the principle of "one place one device".

Therefore, many heuristic procedures have been developed that also use different assumptions and simplifications, so the solution is only approximate. The target of all the methods is a minimising of transport costs; however, they differ in terms of exactingness, particularly in terms of the length of the procedure. Despite this, it cannot be decided with certainty which basic method and/or method of improvement of the layout is the best [9].

Never the less, this area remains of interest to many researchers, because these days the problems are solved by new methods and with the possibility of applying more powerful, modern computers. This area of research currently covers different methods and objectives. With respect to the objectives to be reached by the placing of the devices the appropriateness of the methods of layout tend differ to.

All methods have in common the assumption that the space is unchangeable, only the division of the space can be changed. The space can be represented in terms of the characteristics of the objects placed [7]:

- Space divided into separate parts (in this type of placing the principle is: one object on one place).
- Space represented as a free surface (in this case several objects are accommodated onto the common surface).
- Space represented as surface and form.

The computer-aided layout of devices requires an evaluation of the layout. There are three principal ways of evaluating the layout. According to the first, the layout is evaluated by means of one cost function only. Usually, this is a cost function according to which the minimum cost with respect to the cost of transporting the material between devices is searched for. Although this cost function does not include many other criteria of the layout, this method of evaluation is the most common. According to the second, the layout is evaluated with respect to the relations between the neighbouring devices. This approach is based on the theory of graphs. The third method of evaluation optimizes the layout with respect to several criteria by taking mutual dependencies into account. The position, orientation, immediate vicinity, path, distance, etc., can be taken into account.

Razporejanje naprav na podlagi načela »ena naprava na eno mesto« je primerna za večino običajnih proizvodnih sistemov. Te metode vsebujejo predpostavko, da obstaja za n delovnih naprav n možnih leg, tako da je mogoče na eno lego namestiti natanko eno napravo. Problem se obravnava kot kvadratični prireditveni problem [1]. Kvadratični prireditveni problem spada med nestacionarne odločitvene probleme. Zaradi tega so bile razvite različne strategije iskanja kakovostnih rešitev. Te strategije bi lahko v splošnem razdelili na tri vrste [7]:

- konstrukcijske – začetne strategije,
- izboljševalne strategije in
- hibridne metode.

Začetne strategije razmestijo naprave eno za drugo na mesta po vnaprej določenih korakih in tako izdelajo končno rešitev. Izboljševalne strategije, nasprotno izhajajo iz začetne rešitve in jo nato po korakih izboljšujejo, metode takšne vrste sta tudi metodi simuliranega ohlajanja in genetskih algoritmov. Hibridne metode združujejo konstrukcijske in izboljševalne strategije.

Metode razporejanja za probleme, pri katerih je prostor razdeljen na enake ločene dele, prirejajo eni lokaciji eno napravo. Vendar je tak način omejen in primeren samo za reševanje nekaterih problemov. Tako tak način ni primeren za oblikovanje POS-a. Prostor, ki ga potrebujejo posamezne naprave v POS-u, je namreč različno velik. Zaradi tega so bili razviti za razporejanje naprav po prostoru, ki se obravnava kot celota, naslednji postopki:

- modularna metoda,
- metoda razporejanja pravokotnikov,
- metoda z omejitvami,
- metoda na temelju teorije grafov,
- metoda z izvedeniškimi sistemi.

Čeprav poteka razvoj računalniško podprtega razporejanja že dolgo, je na tržišču zelo malo uporabnih izdelkov. Resda imajo mnogi programi za računalniško podprto načrtovanje nekatere zmogljivosti razporejanja, vendar največkrat ne gredo dlje od grafičnega vmesnika za ročno risanje razporeditve. Skoraj noben tržno dosegljiv program ne omogoča uporabe informacij o problemu in optimizacijskih postopkov. Sodoben tržni program mora vsebovati algoritem za optimizacijo razporeditve in interaktivni uporabniški vmesnik, tako da ima lahko človek možnost vplivanja na potek optimizacije. Končna razporeditev in tehniška dokumentacija nastaneta torej s sodelovanjem človeka.

The layout of devices on the basis of the principle "one device on one place" is suitable for most conventional production systems. These methods include the assumption that there are n possible locations for n working devices, so that it is possible to place exactly one device onto one location. The problem is treated as a quadratic assignment problem [1]. The quadratic assignment problem belongs to problem of NP (non-polynomial) completeness. For that reason different strategies of searching for high-quality solutions have been developed. In general, these strategies can be divided into three types [7]:

- Construction – opening strategies.
- Improvement strategies.
- Hybrid methods.

The opening strategies place the devices one after another onto their places by steps determined in advance, and in this way they find the end solutions. In contrast, the improvement strategies start from the initial solutions and then they improve the solution, step by step; two of such methods are the method of simulated annealing and the genetic algorithm method. Hybrid methods combine the structural and improvement strategies.

For problems where the space is divided into equal, separate parts the methods of layout assign one device to one location. However, such an approach is limited to, and suitable only for, solving some problems. For example, such an approach is not suitable for forming a FMS. The spaces required by the individual devices in a FMS are of different size. Therefore, the following approaches have been developed for placing the devices in the space treated as a unit:

- Modular method.
- Method of the arrangement of rectangles.
- Method with limitations.
- Method on the basis of the theory of graphs.
- Method with expert systems.

Although development of computer-aided placing has been around a long time, very few commercial products are available on the market. Though many CAD programmes have some capabilities for placing, in most cases they do not proceed beyond the graphical user interface for manual drawing of the layout. Almost no commercially available programme ensures the use of the problem information and of the optimization procedures. A modern commercial programme must contain a algorithms for the optimization of the layout and an interactive user interface, so that a human can influence the optimization process. The final layout and the technical documentation result from cooperation with the human.

2 MODEL OBLIKOVANJA POS-A Z GENETSKIMI ALGORITMI

Problem razporejanja naprav spada med tako imenovane nedeterministične odločitvene probleme, ki niso rešljivi v polinomskem času [3]. Problem razporejanja je kombinatorne narave in zaradi tega primeren za reševanje s heurističnimi metodami. Problem je teoretično rešljiv tudi s preizkušanjem vseh možnosti (tj. s slepim iskanjem), vendar pa izkušnje iz prakse kažejo, da pri takšnem načinu reševanja hitro presežemo zmožnosti, bodisi človeka bodisi računalnika, zaradi prevelikega števila mogočih rešitev. Tako je poglavitni problem pri iskanju rešitev pri kombinatoričnih problemih, obvladovanje eksplozije kombinacij. V preteklih letih so se genetski algoritmi izkazali pri reševanju tovrstnih problemov na najrazličnejših področjih tehnike. Zaradi teh lastnosti smo jih uporabili tudi pri oblikovanju POS-a.

2.1 Osnutek

Pri postavitvi modela smo upoštevali naslednje omejitve:

- delovne naprave oziroma prostor, ki ga potrebujejo, je pravokotne oblike,
- strežba stroja poteka v središču stroja,
- usmeritev strojev je znana in enaka za vse stroje.

Pri oblikovanju modela razporeditve smo se omejili zgolj na razporeditev strojev v eni vrsti in razporeditev strojev v več vrstah. Krožno in sklenjeno razporeditev lahko obravnavamo podobno kakor razporeditev strojev v eni vrsti. Med razporejanjem v dveh ali več vrstah ni bistvenih razlik [6]. Tako lahko ta model s spremembami uporabimo tudi za druge oblike razporeditve naprav.

Oblikovanje POS-a smo razdelili na dva glavna koraka:

- določanje razporeditve in
- izračun koordinat naprav.

Pri tem je določanje razporeditve in vrednotenje le-te prepuščeno genetskemu algoritmu. Tako se v prvem koraku ustvarja z genetskimi opravili zaporedje naprav, v drugem pa se glede na zaporedje in pravila ustvarja dejanska razporeditev z vsemi merami. Osnutek oblikovanja POS-a z genetskimi algoritmi prikazuje slika 1.

2 MODEL FOR FORMING THE FMS USING GENETIC ALGORITHMS

The problem of layout of devices belongs to the decision problems that are not solvable within the polynomial time [3]. The problem of the layout is combinatory in nature and is, therefore, suitable for solving by heuristic methods. The problem is theoretically solvable also by testing all possibilities (i.e., by blind searching), but practical experiences show that in the case of such a way of solving the capacities of either the human or the computer are quickly extended due to the large a number of possible solutions. Thus, the principal problem in searching for the solution in the case of combinatory problems is controlling the explosion of combinations. In recent years genetic algorithms have proved to be appropriate for solving such problems in different areas of technology. Because of these properties, genetic algorithms have been used for forming FMSs.

2.1 Concept

When making the model the following limitations were taken into account:

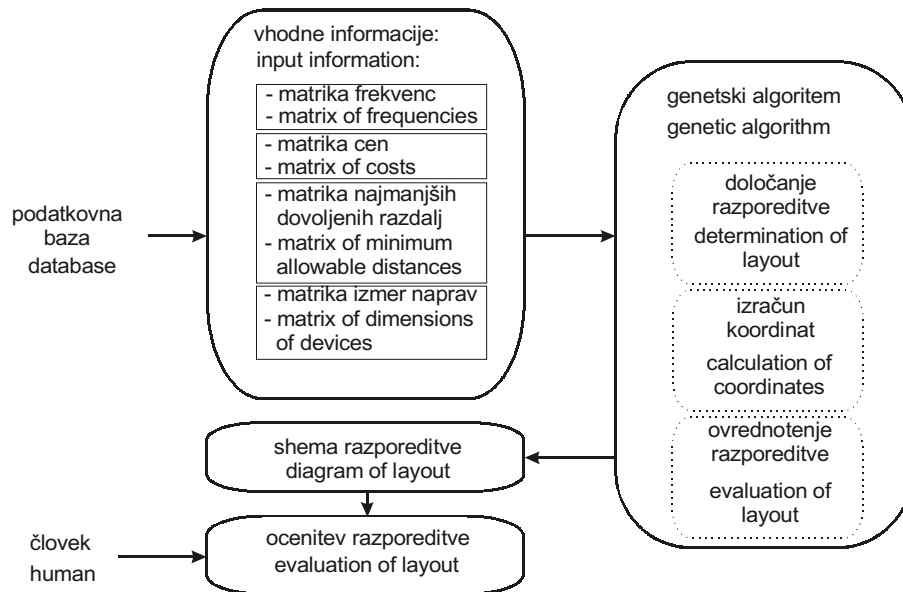
- The working devices and/or the space required by them are of rectangular form.
- The machine is operated in its center.
- The orientation of machines is known and equal for all machines.

For forming the model of the layout we limited ourselves only to the layout of machines in one row and to the layout of machines in multiple rows. The circular and closed layout can be treated similarly as the layout of machines in one row. There are no major differences between the layouts in two or multiple rows [6]. Thus, this model with modifications can also be used for other forms of layout of devices.

The forming of the FMS was divided into two main steps:

- Determination of the layout.
- Calculation of the coordinates of the devices.

The determination of the layout and its evaluation is left to the genetic algorithm. Thus, in the first step the sequence of the machines is created by genetic operation, whereas in the second step the actual layout with all the dimensions is created with respect to the sequence and the rulers. The concept of forming the FMS with genetic algorithms is shown in Figure 1.



Sl. 1. Model reševanja problema oblikovanja prilagodljivega obdelovalnega sistema
Fig. 1. Model of solving the problem of forming the FMS

Za tak način reševanja problema je treba poznati matriko izmer naprav in matriko najmanjših dovoljenih razdalj med napravami. Nadalje je treba poznati matriko prenešenih količin med posameznimi napravami N v nekem časovnem obdobju. Znani morajo biti tudi spremenljivi prenosni stroški, ki so odvisni od uporabljenega prenosnega sredstva. Te informacije pridobimo iz baze podatkov, ki jo moramo predhodno izdelati. Ta baza podatkov se lahko uporabi večkrat pri izdelavi različnih POS-ov. Vsebuje podatke, ki so odvisni od posameznih gradnikov teh sistemov. To so podatki, kakor so cene gibov prenosnih naprav na enoto dolžine, najmanjše zahtevane razdalje med posameznimi stroji in gabaritne mere naprav. Frekvence hodov naprav so odvisne od izdelkov, ki se bodo izdelovali s tem POS-om. Genetski algoritem tako črpa podatke, ki jih potrebuje, iz te baze podatkov. Samo razporeditev določi samodejno z uporabo genetskih opravil in evolucije. Ko genetski algoritem več ne more izboljšati razporeditve, se evolucija ustavi in se izdela shema razporeditve, ki jo nato strokovnjak oceni še glede na kriterije, ki niso bili zajeti v stroškovni funkciji. V primeru, da ni zadovoljen z rešitvijo, se genetski algoritem požene ponovno, saj lahko dobimo po drugi evoluciji drugo razporeditev s podobno vrednostjo stroškovne funkcije.

For such a method of solving the problem it is necessary to know the matrix of dimensions of the devices and the matrix of minimum allowable distances between the devices. Further, it is necessary to know the matrix of transport quantities between the individual devices during a certain time period. Also, the variable transport costs, depending on the means of transport used must be known. This information is gained from the database that is made previously. This database can be used several times for the construction of different FMSs. It contains the data that depend on the individual components of the FMS. These data are, for instance, the prices of motions for the transport devices per unit of length, the minimum required distances between the individual machines, and the overall dimensions of the devices. The frequencies of motions of the transport devices depend on the products to be made by this FMS. Thus, the genetic algorithm takes the data needed from that database. It automatically determines the layout itself by means of genetic operations and evolution. When the genetic algorithm can no longer improve the layout the evolution is stopped and a diagram of the layout is made. The diagram is then evaluated by the expert with respect to the criteria not included in the cost function. If the expert is not satisfied with the solution, it is started again, since after the second evolution another layout with a similar value of cost function can be obtained.

2.2 Stroškovna funkcija

Iščemo minimum stroškovne funkcije, ki zajema spremenljive prenosne stroške:

$$f = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} \cdot c_{ij} \cdot L_{ij} \quad (1),$$

kjer so: n število strojev, f_{ij} frekvenca gibov prenosne naprave oziroma manipulatorja med napravama i in j , c_{ij} spremenljivi prenosni stroški za količinsko enoto v denarni enoti, L_{ij} pa je razdalja med napravama i in j . Prenosne stroške med dvema napravama lahko določimo, če poznamo njuno medsebojno oddaljenost.

V primeru, da razvrščamo naprave v črti, je L_{ij} enak:

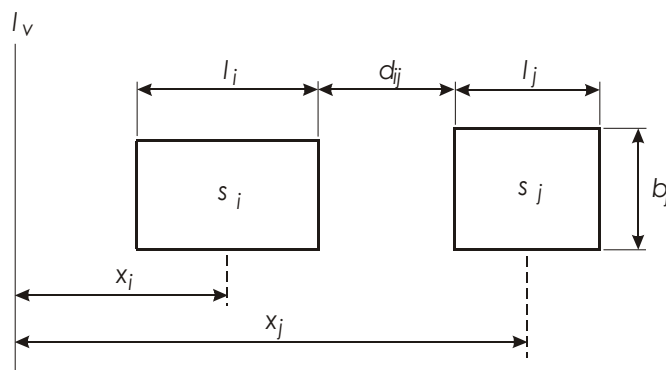
$$|x_i - x_j| = \frac{1}{2} \cdot (l_i + l_j) + d_{ij} \quad i = 1, \dots, n-1 \quad j = i+1, \dots, n \quad (2).$$

V zgornjih izrazih so: f_{ij} frekvenca gibov med napravo i in napravo j , c_{ij} cena giba med napravo i in j na enoto dolžine, l_i dolžina stroja v smeri poteka vrste naprave, d_{ij} najmanjša potrebna razdalja med napravo i in j , x_i razdalja med središčem naprave in izhodiščno točko (izhodiščem koordinatnega sistema).

Parametre l_i , l_j in d_{ij} in spremenljivke x_i in x_j prikazuje slika 2. Izhodiščno črto predstavlja l_v . Da ne dobimo negativnih vrednosti stroškovne funkcije, vzamemo razlike razdalj med strojema i in j ter izhodiščno črto l_v v absolutni vrednosti. Smer, ki jo predstavlja predznak, v tem primeru ni pomembna.

Z upoštevanjem enačbe (2) lahko stroškovno funkcijo 1 napišemo v obliki:

$$f = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot f_{ij} \cdot |x_i^k - x_j^k| \quad (3).$$



Sl. 2. Prikaz parametrov in spremenljivk dolžine
Fig. 2. Representation of parameters and length variables

2.2 Cost function

The minimum cost function comprising variable transport costs is searched for:

where n is the number of machines, f_{ij} is the frequency of motions of the transport device and/or the handling device between the devices i and j , c_{ij} are the variable transport costs for the quantity unit in the monetary unit and L_{ij} is the distance between the devices i and j . The transport costs between the two devices can be determined if their mutual distance is known.

In the case when the devices are placed in a line L_{ij} is equal to:

In the above terms l_i is the length of the device i in the direction of the row of devices, d_{ij} is the minimum required distance between the device i and j , x_i is the distance between the center of the device and the starting point (starting point of the coordinate system).

The parameters l_i , l_j and d_{ij} and the variables x_i and x_j are shown in Figure 2. The starting line is l_v . In order not to obtain negative values for the cost function, the differences of the distances between the machines i and j and the starting line l_v are taken in the absolute value.

By taking equation 2 into account the cost function 1 can be written in the following form:

2.3 Predstavitev organizma

Uporabimo permutacijsko kodiranje. En organizem pomeni eno rešitev problema razporejanja. Zaporedje delovnih naprav je predstavljeno z zaporedjem genov v organizmu. Vsak gen enolično pomeni eno napravo. Če imamo npr. šest delovnih naprav, ki so postavljene v vrsto, je razpored lahko enak:

$$[s_4, s_1, s_6, s_3, s_2, s_5]$$

kjer s_i pomeni stroj i , njegovo mesto v organizmu pa pomeni mesto v dejanskem razporedu. Torej je organizem lahko enak:

$$o_k = [4, 1, 6, 3, 2, 5]$$

kjer je o_k organizem k v trenutni generaciji.

2.4 Ovrednotenje organizma

Populacijo organizmov je treba po opravljenih genetskih opravilih ovrednotiti. V splošnem lahko organizem o_k predstavimo kot:

$$o_k = [s_1^k, s_2^k, s_3^k, s_4^k, s_5^k, s_6^k]$$

kjer pomeni s_i^k delovno napravo, ki je na mestu i v organizmu k . Glede na zaporedje naprav, ki je podano v organizmu, lahko sedaj izračunamo koordinate delovnih naprav (mesta središča delovne naprave).

$$o_k = [s_1^k, s_2^k, s_3^k, s_4^k, s_5^k, s_6^k] \rightarrow X = [x_1^k, x_2^k, x_3^k, x_4^k, x_5^k, x_6^k]$$

x_i^k je razdalja od središča naprave, ki je na mestu i , do izhodiščne črte. X je matrika teh razdalj za vse naprave.

Sedaj, ko imamo razdalje središča delovne naprave od izhodiščne črte, lahko izračunamo skupne stroške prenosa oziroma manipulacije s stroškovno funkcijo 3.

2.5 Genetski operatorji

Za takšno vrsto kodiranja obstaja mnogo različnih genetskih operatorjev. Uporabili smo delno mapirano križanje in obrnjeno ter recipročno mutacijo.

2.3 Representation of the organism

For the representation of the organism, permutation coding is used. One organism represents one possible solution of the problem of the layout. The sequence of working devices is presented with the sequence of genes in the organism. Each gene unambiguously represents one device. If, for example, six working devices placed in a row are in question the layout is as follows:

where s_i represents the device i , and its place in the organism represents its actual arrangement. Thus, the organism can be equal to:

where o_k is the organism k in the current generation.

2.4 Evaluation of the organisms

After the completion of the genetic operations it is necessary to evaluate the population of the organisms. In general, the organism o_k can be represented as:

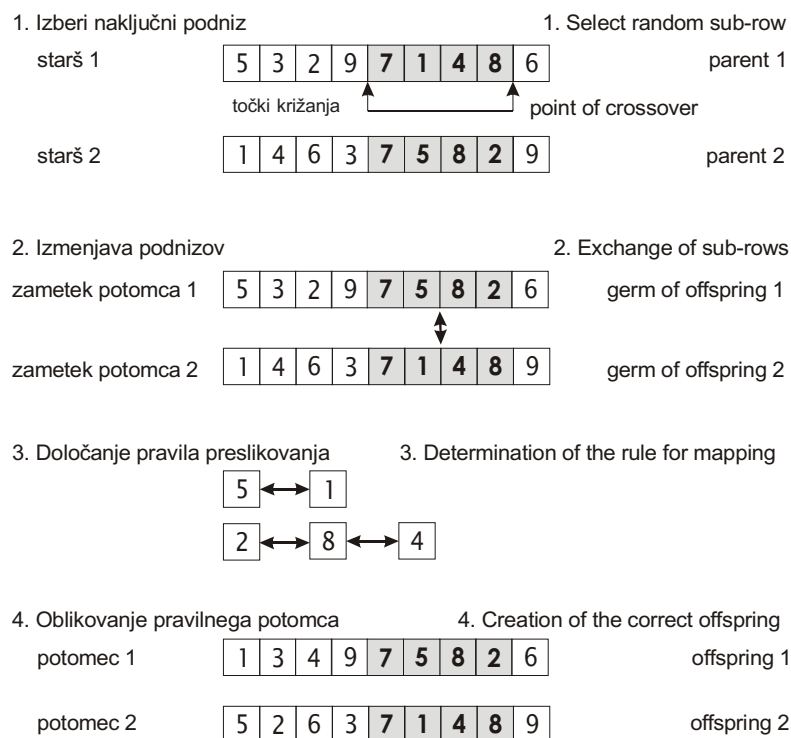
where s_i^k stands for the working device located at the place i in the organism k . With respect to the sequence of the devices given in the organism it is now possible to calculate the coordinates of the working devices.

x_i^k is the distance from the center of the device located at the place i to the starting line. X is the matrix of these distances for all devices.

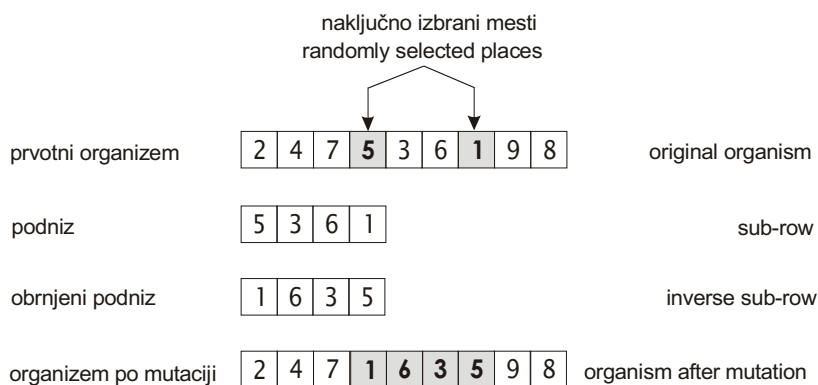
Now that the distances of the center of the working device from the starting line are known, the total handling/transport costs can be calculated according to function 3.

2.5 Genetic operators

There are many different genetic operators for such a type of coding. We used the partial mapped crossover and the inverse and reciprocal



Sl. 3. Delno preslikano križanje
Fig. 3. Partial mapped crossover



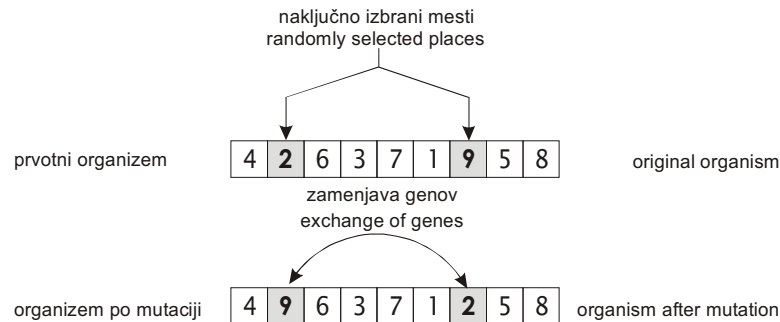
Sl. 4. Obrnjena mutacija
Fig. 4. Inverse mutation

Delno preslikano križanje je podobno preprostu dvotočkovnemu križanju (sl. 3). Vendar pa moramo organizem z ustreznim postopkom še popraviti, saj mora biti vsaka naprava v posamezni razporeditvi natanko enkrat.

Pri obrnjeni mutaciji najprej izberemo dva gena v organizmu. Nato se podniz, ki ga omejujeta ta dva gena, izreže in vstavi nazaj na isto mesto v nasprotnem vrstnem redu (sl. 4). Pri mutaciji z recipročno zamenjavo izberemo dva

mutations. The partial mapped crossover is similar to the simple two-point crossover (Figure 3). However, the organism must still be corrected by a suitable procedure, since each device must be located in the individual layout precisely once.

In the case of an inverse mutation two genes in the organism are selected. Afterwards, the sub-row limited by those two genes is cut out and put onto the same place in the inverse sequence (Figure 4). In the case of the mutation two random genes are



Sl. 5. Recipročna mutacija
Fig. 5. Reciprocal mutation

naključna gena, nato pa zamenjamo njuni mesti (sl. 5).

selected by reciprocal exchange, after which their locations are exchanged (Figure 5).

3 PRIMER

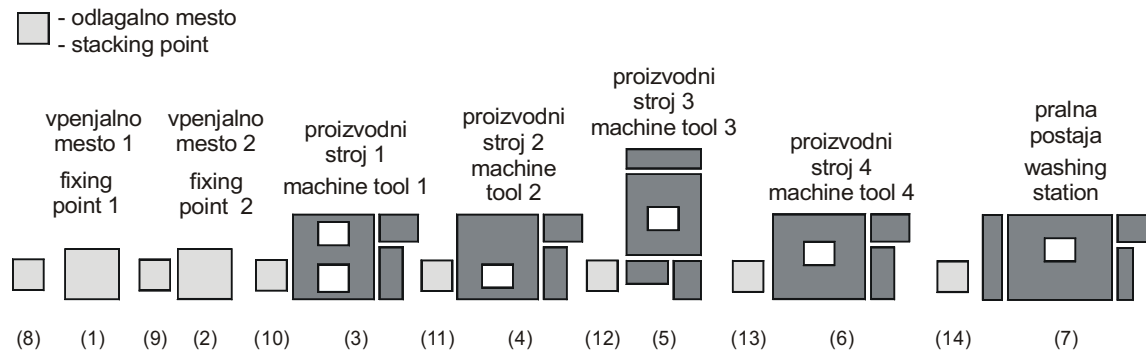
Slika 6 prikazuje POS. Takšna vrhunsko avtomatizirana obdelovalna celica je zmožna obdelati določen spekter obdelovancev brez ustavitve in je primerna za manjša in srednja podjetja. Sestavljajo jo štirje proizvodni stroji, dve vpenjalni mesti, pralna postaja in sedem odlagalnih mest. Vsaka naprava ima ustrezno kodo, ki predstavlja posamezen gen v organizmu. Prikazana je le ena izmed mogočih razporeditev, ki pa zaradi velikih stroškov prenosa ni najboljša. Prenosni stroški so lahko v tem primeru tudi do 5-krat večji od najmanjših (optimalnih).

Za optimiranje konfiguracije POS-a na sliki 6 potrebujemo preglednico imen strojev, matriko mer, matriko frekvenc gibov, matriko stroškov in matriko najmanjših dopustnih razdalj. Potem ko določimo matrike, lahko poženemo genetski algoritem. Za

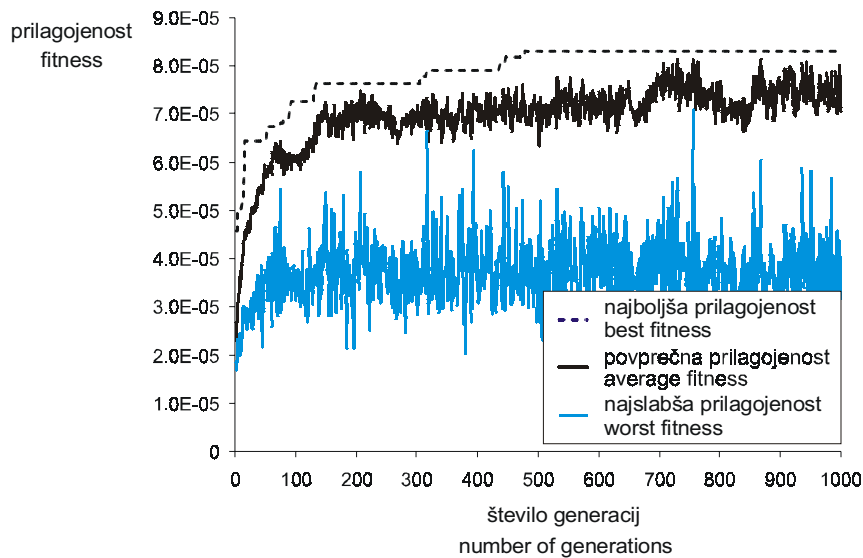
3 EXAMPLE

Figure 6 shows a FMS. Such a highly automated manufacturing cell is capable of machining a certain range of workpieces without interruption, and is suitable for small and medium-sized companies. It comprises four production machines, two fixing points, a washing station and seven stacking points. Each device has its own code representing the relevant gene in the organism. Only one of the possible layouts is shown, which, however, is not the best, due to high transport costs. The transport cost in this case can be up to five times higher than the minimum (optimum) cost.

In order to optimize the configuration of the FMS in Figure 6 the table of names of the machines, the matrix of dimensions, the matrix of frequencies of motions, the matrix of costs and the matrix of minimum allowable distances are needed. When the matrices have been determined, the genetic algorithm can be



Sl. 6. Razporeditev delovnih naprav v prilagodljivem obdelovalnem sistemu
Fig. 6. Layout of working devices in FMS



Sl. 7. Prilagojenost najboljšega, najslabšega organizma in povprečna prilagojenost organizmov v posamezni populaciji

Fig. 7. Fitness of the best and worst organism and average fitness of organisms in the individual population

optimiranje razporeditve smo določili naslednje evolucijske parametre:

- velikost populacije je 100 organizmov,
- verjetnost reprodukcije je 30%,
- verjetnost križanja je 40%,
- verjetnost mutacije organizma je 30%, kar pomeni, da je verjetnost mutacije posameznega gena 2%,
- število generacij, ki se izvedejo med evolucijo, je 1000.

Ker je mogoče, da z vsako evolucijo ne pridemo do optimalne razporeditve, moramo evolucijo večkrat ponoviti. Razlog za to je, da rešitve včasih zaidejo v lokalni optimum, od koder, zaradi pomanjkanja ustreznega genetskega materiala, ni več mogoče napredovati. Zaradi tega določimo največje število generacij, do katere je evolucijo še smiselno izvajati.

Na sliki 7 je prikazan potek evolucije pri enem izmed zagonov. Prikazana je prilagojenost najboljšega in najslabšega organizma ter povprečna prilagojenost organizmov v posamezni populaciji med evolucijo. Prilagojenost je enaka obrnjenim vrednostim stroškovne funkcije. Razvidno je, da so na začetku evolucije spremembe organizmov zelo velike in imajo velike vplive na vrednost stroškovne funkcije. Vrednost stroškovne funkcije se takrat najbolj zmanjša. Ko je rešitev že zelo blizu globalnega optimuma, se

started. For the optimization of the layout the following evolutionary parameters have been determined:

- The size of the population is 1000 organisms.
- The probability of reproduction is 30%.
- The probability of crossover is 40%.
- The probability of the mutation of an organism is 30%, i.e., the probability of mutation of an individual gene is 2%.
- The number of generations during the evolution is 1000.

Since it is possible that the evolution does not result in the optimum layout, the evolution must be repeated several times. The optimum solution is not always reached because sometimes the evolution goes astray into a local minimum, from where the genetic algorithm can no longer progress due to a lack of proper genetic material. Therefore, the greatest number of generations is determined, up to which it is appropriate to carry out evolution.

Figure 7 shows the process of the evolution in one of the runs. The fitness of the best and the worst organisms and the average fitness of the organisms in the individual population during the evolution are indicated. The fitness is equal to the inverse values of the cost function. It is evident that in the beginning of the evolution the changes in the organisms are very great and have great influences on the value of the cost function. The value of the cost function then falls the most. When, however,

Preglednica 1. Rešitve pridobljene v posameznih zagonih evolucije
 Table 1. Solution obtained in the individual runs of the evolution

evolucija št. evolution No.	genotip genotype	fenotip fenotype
1	5 12 4 11 2 9 14 7 8 1 10 3 13 6	12025
2	4 11 2 9 7 14 1 8 10 3 12 5 13 6	13020
3	6 13 4 11 3 10 14 7 9 2 8 1 12 5	13075
4	6 13 3 10 1 8 14 7 9 2 11 4 12 5	12040
5	5 12 4 11 2 9 14 7 8 1 10 3 13 6	12025
6	6 13 3 10 1 8 14 7 9 2 11 4 12 5	12040
7	6 13 4 11 3 10 1 8 14 7 9 2 12 5	13170
8	6 13 3 10 1 8 14 7 9 2 11 4 12 5	12040

vrednost stroškovne funkcije le še malenkostno spreminja.

Ko smo opravili osem zagonov evolucije, smo dobili rezultate, prikazane v preglednici 1. Najboljšo rešitev smo dobili že v prvem in nato še v petem zagonu. Stroji in naprave so si v tej najboljši rešitvi sledili takole: proizvodni stroj 3 (5), odlagalno mesto (12), proizvodni stroj 2 (4), odlagalno mesto (11), vpenjalno mesto 2 (2), odlagalno mesto (9), odlagalno mesto (14), pralna postaja (7), odlagalno mesto (8), vpenjalno mesto 1 (1), odlagalno mesto (10), proizvodni stroj 1 (3), odlagalno mesto (13), proizvodni stroj 4 (6).

Iz rezultatov lahko sklepamo, da je metoda primerna za iskanje dobrih razporeditev. Iz preglednice je razvidno, da so tudi slabše razporeditve povsem uporabne, saj se razlikujejo za manj ko 10 odstotkov od optimalne.

4 SKLEP

Raziskava je pokazala, da z uporabo genetskih algoritmov pri razporejanju naprav v POS pridemo do dobrih rešitev. Pri tem ne potrebujemo nobenih pravil oblikovanja takšnega sistema, ampak moramo samo zbrati podatke, ki so specifični za prenos v POS-u. Z uporabo genetskih algoritmov lahko nato v nekaj minutah dobimo dobre rešitve problema, ki so lahko tudi optimalne.

V nadaljnjem delu je mogoče metodo dopolniti v duhu oblikovanja ciljne funkcije, ki bo zajemala več ekonomsko tehničnih parametrov in ne samo spremenljive prenosne stroške. Tako bi z vključitvijo dodatnih kriterijev ovrednotenja ustvarili realnejšo ciljno funkcijo in s tem izločili navzočnost strokovnjaka, ki na koncu oceni rešitev. S spremembo modula za izračun dolžin poti med

the solution is very near the global optimum, the value of the cost function changes only very slightly.

When the eight runs of evolution were effected, the result shown in Table 1 was obtained. The best solution was reached in the first and fifth runs. The sequence of the individual machines and devices is as follows: machine tool 3 (5), stacking point (12), machine tool 2 (4), stacking point (11), fixing point 2 (2), stacking point (9), stacking point (14), washing station (7), stacking point (8), fixing point 1 (1), stacking point (10), machine tool 1 (3), stacking point (13), machine tool 4 (6).

From the results it can be concluded that the method is suitable for searching for good layouts. The table shows that even the less-favourable solutions are appropriate, since the value of their cost function differs by less than 10% from the value of the cost function of the optimal solution.

4 CONCLUSION

As shown by the results, we have reached good solutions by using genetic algorithms for placing the devices in the FMS. No rules for forming such a system are needed, it is only necessary to collect the data specific to the transport in the FMS. By using genetic algorithms good solutions, which may even be optimal, can be obtained within a few minutes.

In future work the methods might be completed in terms of forming a target function that will include more economical and technical criteria, and not only variable transport costs. Thus, by introducing additional criteria with an evaluation a more real target function would be needed and the need for the expert finally evaluating the solution would be eliminated. By modifying the module for the cal-

posameznimi napravami lahko model nadalje razširimo tudi na področje oblikovanja POS-ov v več vrstah.

culuation of the length of the paths between the individual devices the model can be further expanded to the area of forming the FMS in multiple rows.

5 LITERATURA

5 REFERENCES

- [1] Armour, G. C., E. S. Buffa (1963) A heuristic algorithm and simulation approach to relative allocation of facilities. *Management Science*. Vol. 9, 294-309.
- [2] Balič, J. (2000) Flexible manufacturing systems. *Faculty of mechanical engineering*. Maribor.
- [3] Garey, M. R., D.S. Johnson (1979) Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness. *Freeman*. New York.
- [4] Gen, M., R. Cheng (1997) Genetic algorithms and engineering design. J. *Wiley & Sons, Inc.*. New York.
- [5] Heragu, S., A. Kusiak (1988) Machine layout problem in flexible manufacturing systems. *Operations Research*. Vol. 36, 258-268.
- [6] Kusiak, A. (1990) Intelligent manufacturing systems. *Prentice-Hall, Inc.*. New Jersey
- [7] Liggett, R. S. (2000) Automated facilities layout: past, present and future. *Automation in Construction*. Vol. 9, 197-215.
- [8] Pahole, I. (1997) Planiranje, vodenje in optimiranje inteligentnih fleksibilnih obdelovalnih sistemov z uporabo koncepta pretočne matrike, doktorska disertacija. *Fakulteta za strojništvo*. Maribor.
- [9] Polajnar, A. (1997) Proizvodni management. *Fakulteta za strojništvo*. Maribor.
- [10] Tompkins, J. A. and J.A. White, Y.A. Bozer, E.H. Frazelle, J.M. Tanchoco & J. Trevino (1996) Facilities planning. *John Wiley & Sons*. New York.
- [11] Tratnik, M. (2000) Razmeščanje delovnih naprav pri delavniškem proizvodnem načinu. *Rešitve proizvodnih problemov*. 179-187.

Naslov avtorjev: mag. Mirko Ficko
prof.dr. Miran Brezočnik
prof.dr. Jože Balič
Univerza v Mariboru
Fakulteta za strojništvo
Smetanova 17
2000 Maribor
mirko.ficko@uni-mb.si
mbrezocnik@uni-mb.si
joze.balic@uni-mb.si

Author's Address: Mag. Mirko Ficko
Prof.Dr. Miran Brezočnik
Prof.Dr. Jože Balič
University of Maribor
Faculty of Mechanical Eng.
Smetanova 17
SI-2000 Maribor, Slovenia
mirko.ficko@uni-mb.si
mbrezocnik@uni-mb.si
joze.balic@uni-mb.si

Prejeto: 24.3.2003
Received:

Sprejeto: 2.12.2004
Accepted:

Odprto za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year

Ustvarjanje modela rezalnih sil z uporabo umetne inteligence

Generation of a Model for Cutting Forces Using Artificial Intelligence

Matjaž Milfelner - Uroš Župerl - Franci Čuš

Napovedovanje rezalnih sil pri frezanju z oblikovnim krogelnim frezalom je zelo pomembno za določitev optimalnih rezalnih parametrov pri postopku frezanja. Razviti modeli rezalnih sil pri frezanju z oblikovnim krogelnim frezalom, ki so predstavljeni v raziskavah, temeljijo na analitičnih metodah in so določeni z uporabo teoretičnega in praktičnega znanja ter preizkusov. V prispevku je predstavljen razvoj genetskega modela rezalnih sil za oblikovno krogelno frezalo z umetno inteligenco (genetsko programiranje). V genetskem modelu so upoštevani vsi vplivni parametri, ki vplivajo na velikost rezalne sile med postopkom frezanja. Predstavljeni model je ustvarjen iz preizkusnih podatkov za jeklo Ck45 pri različnih rezalnih parametrih. Dobljeni rezultati prikazujejo, da genetski model rezalne sile ustreza preizkusnim podatkom.

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: modeli genetski, sile rezanja, frezanje, frezala krogelna)

Being able to predict the cutting forces during milling with a ball-end milling cutter is very important for determining the optimal cutting parameters in the milling process. The already developed models of cutting forces in ball-end milling are based on analytical methods and are determined by means of theoretical and practical knowledge as well as experiments. This paper presents the development of a genetic model of cutting forces for a ball-end milling cutter using artificial intelligence (genetic programming). In the genetic model, all the parameters influencing the size of the cutting forces during the milling process are considered. The presented model is generated from experimental data for Ck45 steel with different cutting parameters. The results indicate that the genetic model of the cutting force agrees with the experimental data.

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: genetic models, cutting forces, milling, ball-end mill)

1 UVOD

V prispevku je predstavljen razvoj genetskega modela rezalnih sil z oblikovnim krogelnim frezalom. Postopek frezanja z oblikovnim krogelnim frezalom je v zadnjem času ob razvoju sodobnih večosnih obdelovalnih centrov in postopkov obdelave z velikimi hitrostmi postal eden izmed najpomembnejših postopkov obdelave materiala, s katerim lahko obdelujemo zapletene površine in oblike izdelkov.

Za povečanje zmogljivosti tehnološkega postopka je nujna integracija metod za modeliranje postopkov obdelave ter napovedovanje in optimiranje parametrov v proizvodnem postopku. Nove metode umetne inteligence omogočajo ustvarjanje novih modelov ter iskanje boljših rešitev

1 INTRODUCTION

This paper presents the development of a genetic model of cutting forces for a ball-end milling cutter. With the development of modern multi-axes machining centers and high-speed processes of machining, ball-end milling has become one of the most important processes for the machining of material when complicated product surfaces and shapes need to be machined.

The integration of methods for modelling the machining processes, prediction and the optimization of parameters in the production process are required to increase the capacities of the technological process. The new methods of artificial intelligence ensure the generation of new models and the search for better solutions in the area of cutting.

na področju odrezovanja. Prednosti novih metod so v tem, da so univerzalne in robustne in jih je mogoče uporabiti na vseh raziskovalnih področjih za modeliranje in optimiranje splošnih in zelo zapletenih problemov, kar je postopek odrezovanja. Vključevanje sodobnih metod modeliranja in optimiranja v postopek odrezovanja je še v fazi razvoja. Uporaba le-teh pa omogoča povečanje prilagodljivosti, produktivnosti, zanesljivosti, natančnosti in kakovosti samega postopka ter izdelkov.

1.1 Opis problema

Neugodni pojavi pri odrezovanju so: obraba orodja, lom orodja, nastanek nalepka na rezalnem robu, čezmerna deformacija in vibracije orodja. Ti imajo škodljiv vpliv na postopek odrezovanja in kakovost izdelave. V odvisnosti od rezalnih parametrov in materiala obdelovanca se lahko pojavi eden ali več teh neugodnih pojavov med odrezovanjem. Zato je treba odkriti te pojave čim prej in s spremembo rezalnih parametrov izboljšati postopek odrezovanja. Tem problemom se lahko izognemo, če uporabimo določene rezalne parametre, to so: majhna podajanja, optimalne rezalne hitrosti ter majhna vzdolžna in prečna globina. Vendar pa določeni rezalni parametri ne izkoristijo zmogljivosti in zmanjšujejo izkoristek stroja. Čeprav z izbiro optimalnih rezalnih parametrov odstranimo nekatere probleme pri postopku odrezovanja, to ne zagotovi optimalnega postopka odrezovanja.

Brez teoretičnega razumevanja postopka odrezovanja ter dragih preizkusov ne moremo določiti optimalnih rezalnih parametrov. Z uporabo krmilnih strategij, ki povečujejo zmogljivost obdelave, lahko optimiramo postopek odrezovanja ter znižamo stroške obdelave.

Naš namen je razviti genetski model rezalne sile za oblikovno krogelno frezalo, s katerim lahko zanesljivo opišemo postopek freziranja. Model bo razvit na podlagi zbiranja vplivnih veličin pri postopku freziranja, analitičnega modela rezalnih sil za oblikovno krogelno frezalo, tehnološkega znanja, metod optimiranja na temelju umetne inteligence in izkušenj iz prakse.

1.2 Rezalne sile

Freziranje z oblikovnim krogelnim frezalom je zelo pogost postopek obdelave in se uporablja za obdelavo prosto oblikovanih površin, npr. utopi,

The advantages of the new methods are that they are universal and robust and that they can be used in all research areas for the modelling and optimization of general as well as complicated problems like the cutting process. The integration of modern methods of modelling and optimization into the cutting process is at the development stage. The use of such modelling methods ensures an increase in flexibility, productivity, reliability, accuracy and the quality of the process and the products.

1.1 Description of the problem

The unfavourable phenomena in cutting are as follows: tool wear, tool breakage, built-up edge formation, excessive deformation and tool vibrations. These phenomena negatively influence the cutting process and the quality of manufacture. Depending on the cutting parameters and the workpiece material one or several of these unfavourable phenomena can occur during cutting. Therefore, it is necessary to detect these phenomena as soon as possible and to improve the cutting process by changing the cutting parameters. These problems can be avoided if the specified cutting parameters, such as small feed rates, optimum cutting speeds and small axial and radial depth, are used. However, the anticipated cutting parameters do not make use of the capacity and reduce the machine's efficiency. Although proper selection of the optimum cutting parameters eliminates some problems in the cutting process, this does not ensure an optimum cutting process.

Without a theoretical understanding of the cutting process and expensive experiments the optimum cutting parameters cannot be determined. However, by using control strategies and increasing the machining capacity the cutting process can be optimized and the machining costs reduced.

The aim of this study is to develop a genetic model of the cutting force for a ball-end milling cutter, enabling us to reliably describe the milling process. The model's development will be based on collecting the influencing variables in the milling process, an analytical model of the cutting forces for the ball-end milling cutter, technological know-how, methods of optimization based on artificial intelligence and experience from practice.

1.2 Cutting forces

Milling with a ball-end milling cutter is a very common machining process and is used for machining freely shaped surfaces such as dies,

matrice, votlice, kalupi, turbine, propelerji in letalski konstrukcijski elementi. Geometrijske oblike izdelkov postajajo vedno bolj zahtevne in jih lahko izdelamo le z oblikovnim krogelnim frezanjem na sodobnih RNK obdelovalnih centrih.

Napovedovanje rezalnih sil pri frezanju z oblikovnim krogelnim frezalom je zelo pomembno. V fazi načrtovanja rezalnega postopka znanje o rezalnih silah pomaga tehnologu pri določevanju rezalnih parametrov za obdelavo. Napovedovanje rezalnih sil je v podporo pri načrtovanju postopka, izbiri primernih rezalnih razmer za zmanjšanje obrabe, deformacije in loma orodja ter pri konstruiranju boljših vpenjalnih priprav, kar izboljša kakovost izdelka.

Glavni modeli rezalnih sil pri frezanju z oblikovnim krogelnim frezalom, ki so bile predstavljene v raziskavah, so določene z uporabo teoretičnega in praktičnega znanja ter preizkusov ([2] in [3]).

Za določitev modela rezalnih sil pri frezanju z oblikovnim krogelnim frezalom potrebujemo vhodne parametre, to so: rezalni parametri, geometrijska oblika frezala, material frezala in obdelovanca. Izhodni parameter oz. rezultat modela je rezalna sila. Predstavljen je analitični model rezalne sile za oblikovno krogelno frezalo.

Rezalna sila na rezalnem robu frezala je:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} K_R \\ K_T \\ K_A \end{bmatrix} f_z \cdot \sin[\Psi] \cdot dz \quad (1)$$

kjer je

$$[T] = \begin{bmatrix} -\sin \kappa \sin \Psi & -\cos \Psi & -\cos \kappa \sin \Psi \\ -\sin \kappa \cos \Psi & \sin \Psi & -\cos \kappa \cos \Psi \\ \cos \kappa & 0 & -\sin \kappa \end{bmatrix} \quad (2),$$

in: dz - debelina vzdolžnega diferencialnega elementa, f_z - podajanje na zob, Ψ - kot rezalnega roba pri odrezovanju v smeri vrtenja frezala, κ - kot v smeri osi z od središča polkrožnega dela do točke na rezalnem robu, K_T - obodni koeficient materiala, K_R - prečni koeficient materiala, K_A - vzdolžni koeficient materiala.

2 MODELIRANJE POSTOPKA FREZANJA

2.1 Uvod

Modeliranje in optimiranje postopka odrezovanja sta pomembna elementa v proizvodnem

moulds, turbines, screw propellers and structural components for aircraft. The geometrical shapes of the product become more and more complex and can be made only with ball-end milling on modern CNC machining centers.

The prediction of the cutting forces during milling with a ball-end milling cutter is very important. In the cutting-process planning stage a knowledge of the cutting forces helps the technologist to determine the cutting parameters for machining. A prediction of the cutting forces supports the process planning, the selection of suitable cutting conditions to reduce wear, tool deformation and breakage and the design of better fixing devices that improve the product quality.

The basic models for cutting forces in milling with a ball-end milling cutter, presented in previous research, are determined by means of theoretical and practical knowledge and experiments ([2] and [3]).

The input parameters, such as cutting parameters, cutter geometry, cutter and workpiece material, are needed for the determination of the model of cutting forces in ball-end milling. The output parameters and/or the model results are the cutting force. The analytical cutting-force model for a ball-end milling cutter is presented in our work.

The cutting force on the cutting edge of the cutter is:

2 MODELING OF MILLING PROCESS

2.1 Introduction

Modeling and optimization of the cutting process are important elements in the production

postopku. Proizvodni postopek je ovrednoten z dinamičnimi in med seboj povezanimi spremenljivkami [7]. Zahteva po natančnosti, kakovosti, učinkovitosti in gospodarnosti v proizvodnem postopku je vedno večja. Glede na to je zelo pomembna natančna določitev modela in opis postopka ter izbira optimalnih rezalnih parametrov. Razvoj modela rezalnih sil za napovedovanje in optimiranje postopka frezanja terja podrobno raziskavo vplivnih parametrov in robnih pogojev ([1] in [8]). V zadnjem obdobju so se za optimiranje rezalnih parametrov začele uporabljati metode umetne inteligence, npr.: nevronske mreže, genetski algoritmi [9] in mehka logika ([10] in [11]). Število modelov za optimiranje rezalnih parametrov z genetskimi algoritmi je v literaturi zelo omejeno ([4] in [5]). Večina modelov je matematičnih in empiričnih, ki temeljijo na eksperimentalnih rezultatih. Splošno gledano imajo ti modeli zelo celovito zgradbo in temeljijo na medsebojni povezavi med rezalnimi parametri, materialom obdelovanca in orodjem.

Opis postopka odrezovanja z uporabo umetne inteligence je nova metoda za določevanje modelov ter napovedovanje in optimiranje postopkov na področju strojništva [1]. Iz tega razloga smo za določitev genetskega modela rezalnih sil uporabili metodo genetskega programiranja, ki temelji na načelu naravne biološke evolucije. V prispevku je predstavljen genetski model za določitev oz. napovedovanje rezalnih sil pri frezanju z oblikovnim krogelnim frezalom.

2.2 Evolucijske metode

Evolucija je temelj sodobne teorije o razvoju življenja. Sama beseda evolucija pomeni postopno spreminjanje neke veličine (ali več veličin) običajno v boljše, popolnejše oblike. Darwinistična biološka misel je, da razvoj življenja določajo postopki, kakor so reprodukcija, mutacija, križanje, tekmovanje in selekcija. Reprodukcijska je glavno načelo nadaljevanja vrste živih organizmov. Mutacija je tista komponenta evolucije, ki prinaša novosti. Tekmovanje in selekcija sta postopka, ki se vedno pojavljata tam, kjer ima več osebkov na voljo omejene količine dobrin. Tako lahko evolucijo opredelimo kot postopek optimiranja, pri katerem postajajo organizmi čedalje bolj prilagojeni na okolje, v katerem živijo [12]. Pri tem pojem evolucije ni omejen samo na žive organizme. Evolucijo lahko

process. The production process is evaluated with dynamic and interconnected variables [7]. The requirements for accuracy, quality and cost-effectiveness in the production process is of increasing importance. In this respect a precise determination of the model, a process description and the selection of optimum cutting parameters are very important. The development of a cutting force model for the prediction and optimization of the milling process requires detailed research of the influencing parameters and the boundary conditions ([1] and [8]). Recently, artificial intelligence methods, such as neural networks, genetic algorithms [9] and fuzzy logic ([10] and [11]), have started to be introduced for the optimization of cutting parameters. The number of models for the optimization of the cutting parameters using genetic algorithms is very limited in the literature ([4] and [5]). Most models are mathematical and empirical and are based on experimental results. In general, these models have a very complex structure and are based on interconnections between the cutting parameters, the workpiece and the tool material.

A description of the cutting process using artificial intelligence is a new method for the determination of modes and the prediction and optimization of processes in the area of mechanical engineering [1]. For this reason the genetic programming method based on the principle of natural biological evolution has been used to determine of the genetic model of cutting forces. This paper presents a genetic model for the determination and/or prediction of the cutting forces in ball-end milling.

2.2 Evolutionary methods

Evolution is the basis for the modern theory of the development of life. The term evolution itself means gradual changing of some value (or several values), usually into better, more perfect forms. The Darwinian biological idea implies that the development of life is determined by processes such as reproduction, mutation, crossover, competition and selection, with reproduction being the basic principle for the continuation of a species of living organisms. Mutation is the component of evolution that brings novelties. Competition and selection are two processes that occur whenever several organisms have available a limited quantity of goods. Thus, evolution can be defined as the optimization process that applies when organisms become increasingly adapted to the environment in which they exist [12]. Here, the term

simuliramo tudi na računalniku in jo izkoristimo za reševanje problemov na najrazličnejših področjih [12].

Glavni značilnosti evolucijskih metod sta v tem, da se rešitve ne iščejo po vnaprej postavljenih (determinističnih) poteh in da se sočasno obravnava množica preprostih predmetov [12]. Strukturna rešitev je prepuščena evolucijskemu postopku. Ker smo pri reševanju z evolucijskimi metodami zvesti biološkemu izhodišču, pravimo rešitvam organizmi ali kromosomi. Zaradi verjetnostne narave metod evolucijskega računanja ni nobenega zagotovila, da prav vsaka evolucija pripelje do zadovoljivega izida.

Obstaja več različnih metod evolucijskega računanja. Najbolj znane so:

- genetski algoritmi;
- genetsko programiranje, to je razširitev genetskih algoritmov. S to metodo se ustvarjajo programi, išče se tisti program, ki najbolje reši dano nalogo;
- evolucijske strategije, te temeljijo na populaciji s samo enim članom in samo enim opraviлом (mutacijo);
- evolucijsko programiranje, to napoveduje, na podlagi prejšnjih členov, neke vrste naslednji člen vrste.

2.3 Genetsko programiranje

Genetsko programiranje je posebna veja strojnega učenja, ki ga definiramo kot učenje računalniškega programiranja s posnemanjem naravne evolucije. Začetnik genetskega programiranja je J. R. Koza [13]. Pri genetskem programiranju je uporabil zamisel o genetskih algoritmi, pri katerih populacijo sestavljajo računalniški programi, ki se med evolucijo s selekcijo, križanjem in mutacijo avtomatsko izpopolnijo. Za genetsko programiranje se uporabljajo programski jeziki C, Lisp in Java, pri katerih je programe mogoče predstaviti v obliki dreves.

Glavni algoritem genetskega programiranja se ne razlikuje veliko od genetskega algoritma. Vhodni parametri genetskega programiranja so:

- M - velikost populacije,
- G - število generacij,
- p_r - verjetnost reprodukcije,
- p_c - verjetnost križanja,
- p_m - verjetnost mutacije.

Pri genetskem programiranju je populacija sestavljena iz računalniških programov. Pri tem je

evolution is not limited only to living organisms. Evolution can also be simulated on the computer and can be used to solve problems in a variety of areas [12].

The two main characteristics of evolutionary methods are that the solutions are not searched for in ways defined in advance (deterministic), and that a large variety of simple objects are dealt with simultaneously [12]. The structural solution is left to the evolutionary process. As when solving with evolutionary methods we stick to biological starting points, the solutions are called organisms or chromosomes. Due to the probabilistic nature of the evolutionary computation methods there is no guarantee that each evolution will lead to a satisfactory outcome.

From the several available evolutionary computation methods, the most widely known are as follows:

- genetic algorithms,
- genetic programming – an extension of genetic algorithms, where programmes are created and the programme that best solves the set task is searched for,
- evolutionary strategies - based on a population with only one member and only one operation (mutation),
- evolutionary programming - on the basis of previous members of a species it predicts the next member of the species.

2.3 Genetic programming

Genetic programming is a special branch of machine learning, defined as the learning of computer programming by simulating the natural evolution. The father of genetic programming is J. R. Koza [13]. In genetic programming he used the idea of genetic algorithms where the population is formed by computer programmes automatically improving in the course of evolution by means of selection, crossover and mutation. For genetic programming the programme languages C, Lisp and Java are used, where the programmes can be represented in the form of trees.

The basic algorithm of genetic programming does not differ much from the genetic algorithm. The input parameters of genetic programming are:

- M - population size,
- G - number of generations,
- p_r - probability of reproduction,
- p_c - probability of crossover,
- p_m - probability of mutation.

In genetic programming the population consists of computer programmes. Here it is necessary to

treba poudariti pomembno razliko med bitnimi nizi nespremenljive dolžine in programi, pri katerih se oblika in vsebina dinamično spreminjata med evolucijskim postopkom. Torej velikost in oblika programov ni vnaprej definirana, kakor je to v primeru bitnih nizov nespremenljive dolžine. Prostor iskanja je prostor vseh programov, ki jih lahko sestavimo s funkcijami in sklepnimi simboli, primernimi za uporabo. Program sestavimo iz množice funkcij $F = \{f_1, f_2, \dots, f_{N_f}\}$ in množice sklepov $T = \{a_1, a_2, \dots, a_{N_t}\}$, pri čemer ima vsaka posamezna funkcija f_i iz nabora F določeno število argumentov $z(f_i)$. Ustrezno število argumentov za funkcije iz nabora F je potemtakem določeno s seznamom $P = \{z(f_1), z(f_2), \dots, z(f_{N_f})\}$. Primeri funkcij so lahko:

- aritmetična opravila (+, -, *, /),
- matematične funkcije (sin, cos, exp, ln),
- logična opravila (AND, OR, NOT),
- krmilni operatorji (npr. IF-THEN-ELSE),
- druge funkcije.

V množici terminalov običajno najdemo spremenljivke, ki pomenijo vhodne podatke, zaznavala, spremenljivke sistema, in stalnice.

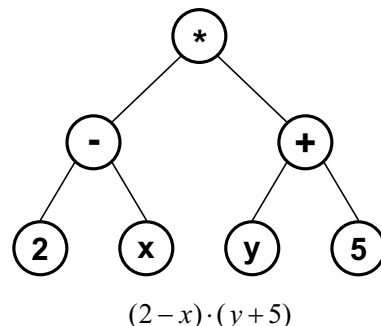
Na začetku je treba najprej naključno ustvariti začetno populacijo programov z zahtevo, da je raznolikost začetne populacije 100%. Programi so prikazani v obliki hierarhičnega programskega drevesa, ki so omejeni z globino. Program je sestavljen iz osnovnih računskih opravil in številskih stalnic ter spremenljivk. Na sliki 1 je prikazan primer sestave iz treh notranjih in štirih zunanjih vozlišč. Notranja vozlišča predstavljajo funkcije +, - in *, zunanja pa sklepi x , y , 2 in 5. Program sestavljajo funkcije iz nabora $F = \{+, -, *\}$ in sklepi iz nabora $T = \{x, y, N\}$. Simbol N pomeni naravna števila. Množici funkcij F določimo tudi seznam argumentov $P = \{2, 2, 2\}$.

emphasize the important difference between the bit strings of constant length and the programmes, where the form and contents dynamically change in the course of the evolutionary process. Consequently, the size and form of programme is not defined in advance like in the case of bit strings of constant length. The search space is the space of all programmes that can be composed with functions and terminal symbols that are suitable for use. The programme is composed of a set of functions $F = \{f_1, f_2, \dots, f_{N_f}\}$ and a set of terminals $T = \{a_1, a_2, \dots, a_{N_t}\}$, each individual function f_i from string F having a certain number of arguments $z(f_i)$. Thus, the appropriate number of arguments for functions from the string F is determined by the list $P = \{z(f_1), z(f_2), \dots, z(f_{N_f})\}$. The examples of functions can be as follows:

- arithmetic operations (+, -, *, /),
- mathematical functions (sin, cos, exp, ln),
- logical operations (AND, OR, NOT),
- control operators (e.g. IF-THEN-ELSE),
- other functions.

In the set of terminals the variables representing the input data, sensors, system variables and constants are usually found.

In the beginning it is necessary to first generate the random initial population of programmes with the requirement that the multiplicity of the initial population must be 100%. The programmes are presented in the form of a hierarchical programme tree limited in depth. The programme consists of basic arithmetic operations, number constants and variables. In Figure 1 the case shows the structure from three internal and four external nodes. The internal nodes are represented by the functions +, - and * and the external ones by terminals x , y , 2 and 5. The programme consists of functions from the string $F = \{+, -, *\}$ and terminals from the string $T = \{x, y, N\}$. The symbol N represents the natural numbers. Moreover, the list of arguments $P = \{2, 2, 2\}$ is determined by the set of functions F .



Sl. 1. Primer programskega drevesa
Fig. 1. Example of programme tree

Po ustvarjanju začetne populacije je treba za posamezne programe določiti funkcijo uspešnosti. Uspešnost oz. prilagojenost je gonilna sila naravne selekcije. Uspešnost posameznega programa določimo glede na napako oz. razdaljo do rešitve. Čim manjša je napaka, tem bolj je rešitev uspešna. Po ovrednotenju oz. določitvi uspešnosti vsakega posameznega programa sledi postopek selekcije in uporabe operatorjev, ki modificirajo posameznika v populaciji. Pri genetskem programiranju operatorje delimo na primarne in sekundarne operatorje. Primarna operatorja sta reprodukcija in križanje, sekundarni operatorji pa so mutacija, permutacija in poenostavljanje.

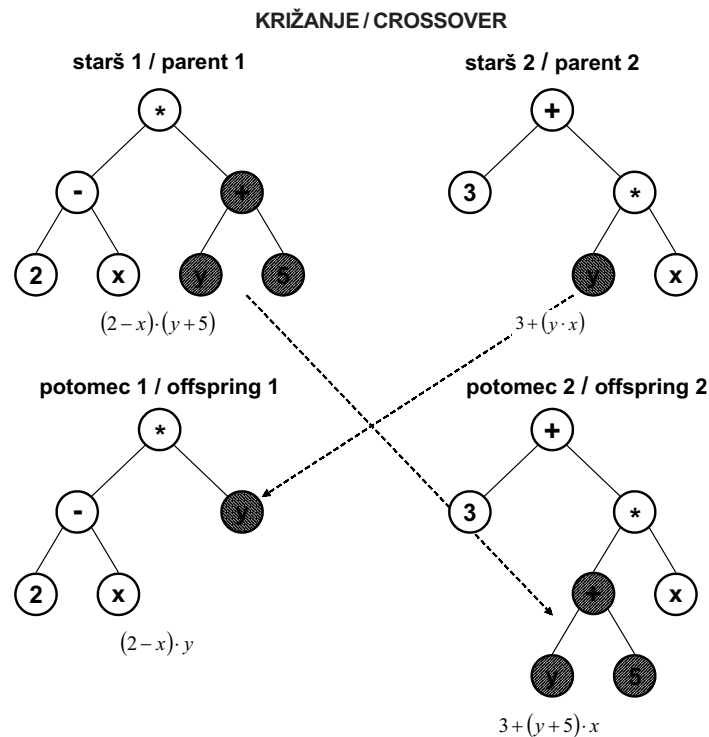
Pri reprodukciji se program, ki je izbran na podlagi selekcije, prenese v naslednjo generacijo nespremenjen. Odstotek reprodukcije p_r je vhodni parameter algoritma genetskega programiranja in običajno znaša 10%, kar pomeni, da bo približno 10% programov celotne populacije v naslednji generaciji nespremenjenih.

Križanje je najpomembnejši operator pri genetskem programiranju. Glede na uspešnost v postopku selekcije izberemo dva programa ter naključno izberemo dve točki križanja. Podprevesi,

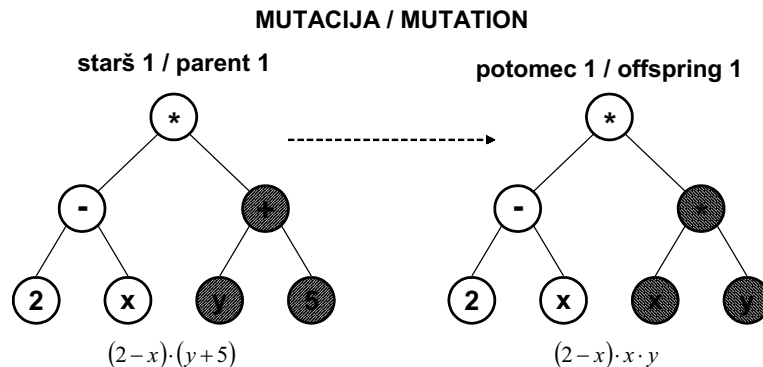
After generation of the initial population it is necessary to determine the fitness function for the individual programmes. Success and/or adaptation are the driving force of natural selection. Success of the individual programme is determined with respect to the error and/or distance from the solution. The smaller the error the more successful is the solution. The evaluation and/or determination of success for each individual programme are followed by the selection process and the use of operators modifying the individual in the population. In genetic programming the primary and secondary operators are distinguished. The two primary operators are reproduction and crossover; the secondary operators are mutation, permutation and simplification.

In the reproduction the programme selected on the basis of selection is transferred unchanged into the next generation. The percentage of reproduction p_r is an input parameter of the genetic programming algorithm and usually amounts to 10%; this means that about 10% of the programmes of the entire population will be unchanged in the next generation.

Crossover is the most important operator in genetic programming with respect to success in the selection process two programmes are selected and two crossover points are randomly selected. The



Sl. 2. Križanje
Fig. 2. Crossover



Sl. 3. Mutacija
Fig. 3. Mutation

ki sta določeni s točkama križanja, v obeh starših zamenjamo (sl. 2).

Pri mutiranju se v drevesu naključno določi točka mutiranja. Poddrevo, ki je določeno s točko mutiranja, se odstrani in se naključno ustvari novo poddrevo. Globina poddrevesa, ki ga lahko vstavimo pri mutiranju, je običajno enaka največji globini drevesa začetne populacije. Globina drevesa, ki ga dobimo, ne sme preseči največje globine drevesa, ki je določena pri operatorju križanja (sl. 3).

Po določenem številu generacij so programi vedno bolj prilagojeni glede na vhodne podatke. Zadana naloga je rešena, ko vsaj en program v populaciji izpolni ustavitveno merilo kar pomeni, da najboljši program pomeni rešitev problema.

Cilj genetskega programiranja je najti tisti program iz ogromne množice računalniških programov, ki najbolje reši postavljeno nalogo.

3 GENETSKI MODEL REZALNIH SIL

Za določitev genetskega modela rezalne sile in določitve odvisnosti rezalne sile od rezalnih parametrov smo uporabili metodo genetskega programiranja. V nadaljevanju je opisan razvoj genetskega modela rezalnih sil z genetskim programiranjem (sl. 4).

Potek razvoja genetskega modela rezalnih sil z genetskim programiranjem:

- iz preizkusov dobimo vrednosti rezalnih sil F_x , F_y in F_z pri pripadajočih rezalnih parametrih (različni rezalni hitrosti V_c , podajanju f_z , globini frezanja A_D , širini frezanja R_D);

two sub-trees, determined by the two crossover points, are interchanged in both parents (Fig. 2).

In the mutation, the mutation point is randomly determined in the tree. The sub-tree, determined by the mutation point, is removed and a new sub-tree is randomly generated. The depth of the sub-tree, which can be put in during mutation, is usually equal to the maximum depth of the initial population tree. The tree depth obtained must not exceed the maximum tree depth determined in the case of the crossover operator (Fig. 3).

After a certain number of generations the programmes are better and better adapted with respect to the input data. The set task is solved when at least one programme in the population meets the stopping criterion, which means that the best programme represents the solution to the problem.

The aim of genetic programming is to find the programme from the vast multitude of computer programmes that best solves the set task.

3 GENETIC MODEL OF CUTTING FORCES

The genetic programming method was used to determine the genetic model of the cutting force and to determine the dependence of the cutting force on the cutting parameters. The development of the genetic model of cutting forces by genetic programming is described below (Fig. 4).

Stages of development of the genetic model of cutting forces by genetic programming:

- values of the cutting forces F_x , F_y and F_z with relevant cutting parameters (different cutting speed V_c , feeding f_z , milling depth A_D , milling width R_D) are obtained from experiments,

- določimo vhodne parametre za genetsko programiranje (velikost populacije, število generacij, verjetnost reprodukcije p_r , verjetnost križanja p_c in mutacije p_m);
- izberemo vhodne spremenljivke - množica sklepov $T = \{R_D, A_D, f_z, V_c, R\}$, nabor računskih opravil - množica funkcij $F = \{+, -, *, /\}$ in število argumentov $P = \{2, 2, 3, 2\}$;
- naključno ustvarimo začetno populacijo s stvarjenjem naključnih računalniških programov, ki so sestavljeni iz matematičnih funkcij in sklepov;
- ovrednotimo populacijo, tako da izračunamo prilagojenosti posameznikov na okolje;
- izberemo programe za reprodukcijo. Program, ki je izbran na podlagi selekcije, se v naslednjo generacijo prenese nespremenjen - verjetnost reprodukcije;
- križamo programe - glede na uspešnost v postopku selekcije izberemo dva programa, ki jih bomo križali;
- mutiramo programe;
- celoten postopek ponavljamo tako dolgo dokler ni izpolnjeno ustavitveno merilo, kar pomeni, da najboljši program pomeni rešitev problema.

Rezultat je genetski model največje rezalne sile F_{max} v odvisnosti od rezalnih parametrov širine frezanja R_D , globine frezanja A_D , podajanja f_z in rezalne hitrosti V_c .

4 GENETSKI MODEL REZALNIH SIL ZA OBLIKOVNO KROGELNO FREZALO

Za določitev genetskega modela rezalnih sil smo opravili obsežno število preizkusov na NK frezalnem stroju, pri različnih parametrih frezanja. V tem poglavju so predstavljeni rezultati preizkusov in prikaz rezalnih sil v odvisnosti od rezalnih parametrov.

4.1. Uporabljena preizkusna oprema

Za preizkuse smo uporabili:

- RNK frezalni center **MORI SEIKI FRONTIER - M**,
- merilno ploščo **KISTLER 9259A**,
- material obdelovanja **Ck45**,
- oblikovno krogelno frezalo tip **R216.44-10030-040-AL10G** s premerom 10 mm, kotom vijačnice 30° in štirimi rezalnimi robovi,
- material frezala **GC 1010**.

- input parameters for genetic programming (population size, no. of generations, probability of reproduction p_r , probability of crossover p_c and mutation p_m) are determined,
- input variables - set of terminals $T = \{R_D, A_D, f_z, V_c, R\}$, the string of arithmetic operations - set of functions $F = \{+, -, *, /\}$ and the number of arguments $P = \{2, 2, 3, 2\}$ are selected,
- the initial population is randomly generated by creating random computer programmes consisting of mathematical functions and terminals,
- the population is evaluated by computing the adaptations of individuals to the environment,
- the programmes for reproduction are selected. The programme selected in accordance with the selection is transferred unchanged into the next generation - probability of reproduction,
- the crossover of programmes - depending on the success in the selection process. Two programmes, which will be crossed over, are selected,
- the programmes are mutated,
- the entire process is repeated until the stopping criterion has been met, which means that the best programme represents the solution of the problem.

The result is the genetic model of the maximum cutting force F_{max} , depending on the cutting parameters: milling width R_D , milling depth A_D , feeding f_z , and cutting speed V_c .

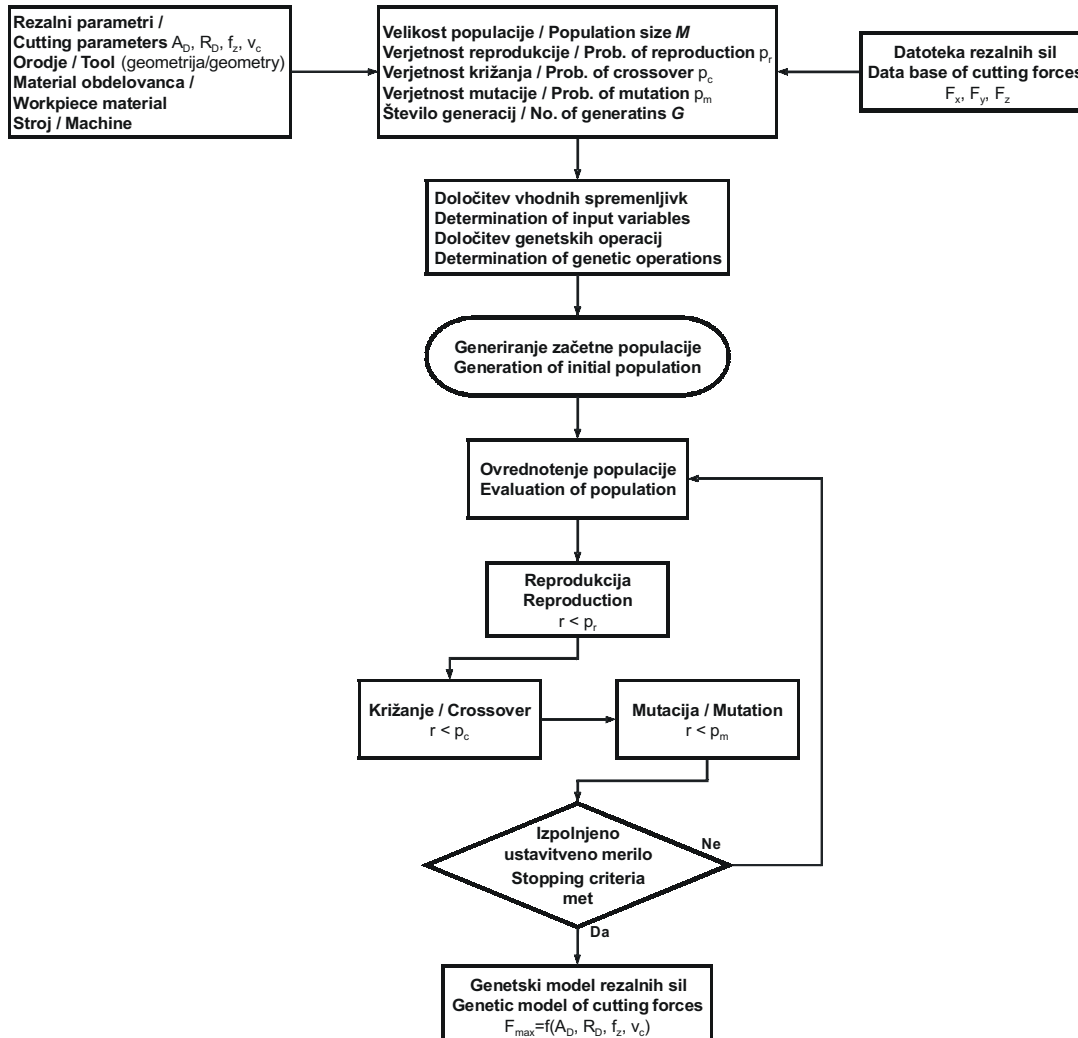
4 GENETIC MODEL OF CUTTING FORCES FOR BALL-END MILLING CUTTER

An enormous number of experiments on an NC milling machine with different milling parameters have been carried out to determine the genetic model of the cutting forces. This chapter presents the results of experiments and the cutting forces depending on the cutting parameters.

4.1 Experimental equipment used

The following equipment was used for the experiments:

- CNC milling center **MORI SEIKI FRONTIER - M**,
- measuring plate **KISTLER 9259A**,
- workpiece material **Ck45**,
- ball-end milling cutter type **R216.44-10030-040-AL10G**, diameter 10 mm, helix angle 30° and four cutting edges,
- milling cutter material **GC 1010**.



Sl. 4. Genetski model rezalnih sil
Fig. 4. Genetic model of cutting forces

4.2 Genetski model rezalnih sil pri frezanju z oblikovnim krogelnim frezalom

Za določitev povezave med rezalno silo in rezalnimi parametri smo razvili genetski model rezalne sile na podlagi genetskega programiranja.

Za določitev genetskega modela rezalne sile z genetskim programiranjem smo pri frezanju s frezalom R216.44-10030-040-AL10G izbrali 45 preizkusnih podatkov. Vrednosti največjih rezalnih sil smo izmerili pri različnih rezalnih parametrih (širina frezanja $R_D = 0,2$ do $0,6$ mm, globina frezanja $A_D = 0,2$ do $0,6$ mm, podajanje $f_z = 0,08$ do $0,12$ mm/zob in rezalna hitrost $V_c = 125$ do 250 m/min).

4.2 Genetic model of cutting forces during milling with a ball-end milling cutter

The genetic model of cutting forces was developed on the basis of genetic programming to determine the relation between the cutting force and the cutting parameters.

To determine the genetic model of the cutting force by genetic programming the data from 45 experiments were selected during milling with the cutter R216.44-10030-040-AL10G. The values of the maximum cutting forces were measured with different cutting parameters: milling width $R_D = 0.2$ to 0.6 mm, milling depth $A_D = 0.2$ to 0.6 mm, feeding $f_z = 0.08$ to 0.12 mm/tooth and cutting speed $V_c = 125$ to 250 m/min).

Na podlagi vhodnih in eksperimentalnih podatkov in ob izbiri ustreznih računskih opravil ustvarimo model za določitev rezalne sile:

$$F_{\max} = f(R_D, A_D, f_z, V_c) \quad (1).$$

Za določitev genetskega modela izberemo vhodne spremenljivke - množica sklepov:

$$T = \{x, y, z, w, R\}$$

kjer je x - širina frezanja R_D , y - globina frezanja A_D , z - podajanje f_z , w - rezalna hitrost V_c in R - realna števila na intervalu od -10 do 10, nabor računskih opravil - množica funkcij: $F = \{+, -, *, /\}$, kjer so "+" - opravilo seštevanja, "-" - opravilo odštevanja, "*" - opravilo množenja in "/" - računsko opravilo deljenja, in število argumentov: $P = \{2, 2, 3, 2\}$.

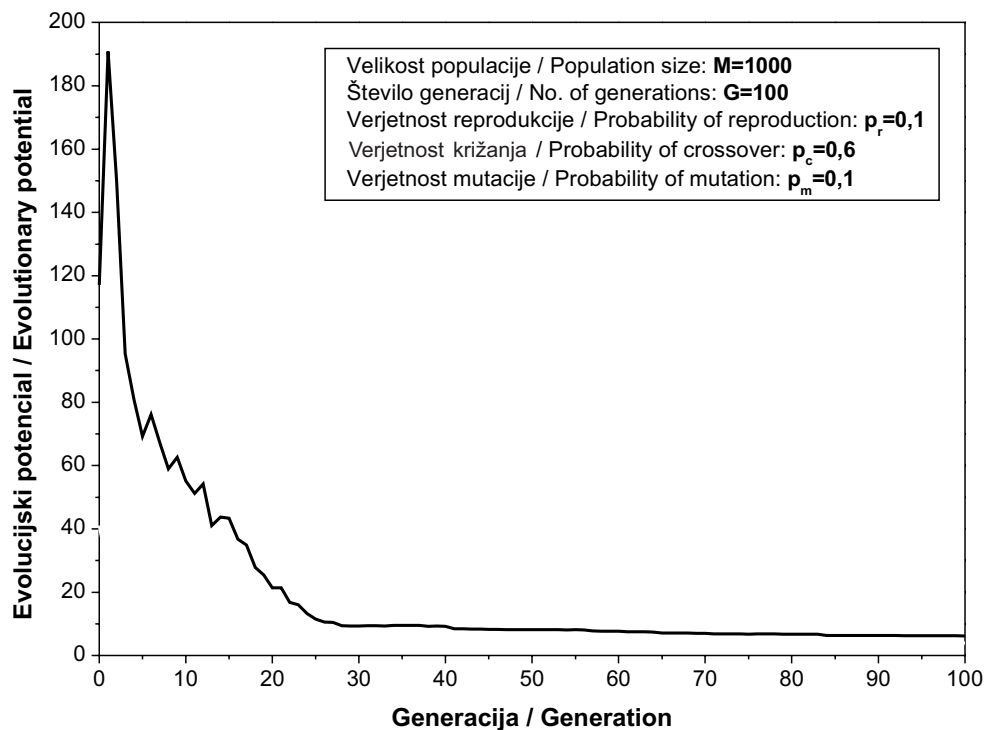
Za določitev genetskega modela rezalnih sil smo izbrali velikost populacije organizmov $M = 1000$ in število generacij $G = 100$. Uporabili smo genetske operacije: reprodukcijo, križanje in mutacijo. Verjetnost reprodukcije $p_r = 0,1$, križanja $p_c = 0,6$ in

On the basis of the input and the experimental data and by selecting suitable arithmetic operations the model for the determination of the cutting force is generated:

For the determination of the genetic model the input variables - terminal set are selected:

where x is the milling width R_D , y is the milling depth A_D , z is the feeding f_z , w is the cutting speed V_c , and R are real numbers over the interval from -10 to 10, the string of the arithmetic operation - function set is selected: $F = \{+, -, *, /\}$, where "+" is the operation of addition, "-" is the operation of subtraction, "*" is the operation of multiplication and "/" is the operation of division and the number of arguments is selected: $P = \{2, 2, 3, 2\}$.

The size of the population of organisms $M = 1000$ and the number of generations $G = 100$ were selected for the determination of the genetic model of cutting forces. The genetic operations of reproduction, crossover and mutation were used. The



Sl. 5. Krivulja evolucijskih potencialov najboljših organizmov
Fig. 5. Curve of evolutionary potentials of best organisms

mutacije je $p_m = 0,1$.

Razvoj modela je končan, ko je doseženo največje predpisano število generacij.

Slika 5 prikazuje krivuljo evolucijskih potencialov najboljših organizmov. Pri frezanju s frezalom R216.44-10030-040-AL10G dosežemo najboljšo prilagojenost v osemindesetdeseti generaciji, ta je 3,83%.

V osemindesetdeseti generaciji dobimo najboljšo prilagojenost organizma, ki ustreza eksperimentalnim podatkom. Genetski model rezalne sile pri frezanju z oblikovnim krogelnim frezalom R216.44-10030-040-AL10G prikažemo z enačbo:

$$F_{\max} = 11,0486 + R_D - A_D + V_c \cdot R_D \cdot A_D - 58,5012 \cdot (-8,2466 + A_D) \cdot A_D + \frac{58,5012 \cdot (-8,2524 + A_D) \cdot (0,0058 + A_D) + V_c \cdot (-0,7975 - 0,2868 \cdot f_z)}{V_c \cdot (2,802 + R_D) \cdot (2,7956 - A_D) \cdot f_z^2} + \frac{V_c \cdot R_D \cdot (2,802 + R_D)}{0,1012 \cdot V_c - 2 \cdot R_D - A_D + f_z - 0,5736 \cdot V_c \cdot f_z} \quad (2).$$

Primerjava preizkusnih vrednosti z vrednostmi genetskega modela rezalne sile je prikazana v diagramu (sl. 6).

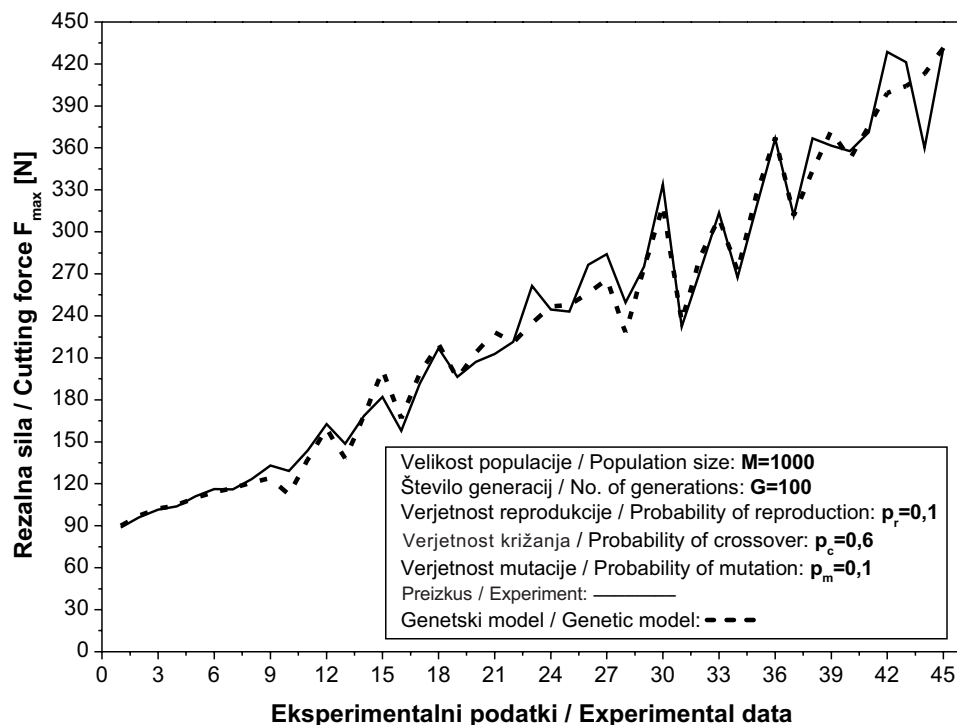
probability of reproduction is $p_r = 0.1$, that of crossover $p_c = 0.6$ and that of mutation $p_m = 0.1$.

The development of the model is finished when the greatest specified number of generations has been reached.

Figure 5 shows the curve of the evolutionary potentials of the best organisms. During milling with the cutter R216.44-10030-040-AL10G the best adaptation is reached in the 98th generation, i.e., 3.83%.

In the 98th generation the best adaptation of the organism agreeing with the experimental data is obtained. The genetic model of the cutting force during milling with the ball-end milling cutter R216.44-10030-040-AL10G is represented by the equation:

A comparison of the experimental values with the values of the genetic model of the cutting force is shown in a diagram (Fig. 6).



Sl. 6. Primerjava preizkusnih vrednosti z vrednostmi genetskega modela
Fig. 6. Comparison of experimental values with the values of the genetic model

5 SKLEP

V prispevku je predstavljen razvoj genetskega modela rezalnih sil pri postopku freziranja z oblikovnim krogelnim frezalom. Model je namenjen za napovedovanje rezalnih sil in optimiranje rezalnih parametrov pri postopku freziranja. Ustvarjen in preizkušen je na podlagi velikega števila preizkusov, z različnimi rezalnimi parametri.

Osnovna zamisel, ki je predstavljena v prispevku, je prikaz odnosov med orodjem in obdelovancem med postopkom obdelave, ki je opisan z genetskim modelom rezalnih sil.

Predstavljen model lahko uporabimo za napovedovanje rezalnih sil, optimiranje rezalnih parametrov, zmanjšanje celotnega časa obdelave, povečanje natančnosti, zanesljivosti, produktivnosti in zmanjšanje stroškov obdelave.

5 CONCLUSION

This paper presents the development of a genetic model of the cutting forces in the process of milling with a ball-end milling cutter. The model is intended for the prediction of cutting forces and the optimization of the cutting parameters during milling. It has been generated and tested on the basis of a large number of experiments with different cutting parameters.

The basis of the paper is the presentation of the relations between the tool and the workpiece during the machining process described with the genetic model of cutting forces.

The presented model can be used for the prediction of cutting forces, the optimization of cutting parameters, the reduction of the total machining time, for an increase of accuracy, reliability, productivity and for decreasing the machining costs.

6 LITERATURA

6 REFERENCES

- [1] Lutervelt, V., T. H. C. Childs, I. S. Jawahir, F. Klocke, P.K. Venuvinod (1998) Present situation and future trends in modeling of machining operations, *Annals of CIRP*, Vol. 47(2), 578-626.
- [2] Yucesan, G., Y. Altintas (1993) Mechanics of ball end milling postopks, *ASME Winter Annual Meeting, PED*, Vol. 64, 543-551.
- [3] Tai, C. C., K.H. Fuh (1994) A predictive force model in ball-end milling including eccentricity effects, *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, Vol. 34(7), 959-979.
- [4] Hinduja, P. J., D.J. Petty, M. Tester, G. Barrow (1985) Calculation of optimum cutting conditions for turning operations, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 199(B2), 81-92.
- [5] Arsecularatne, J. A., S. Hinduja, G. Barrow (1992) Optimum cutting conditions for turned components, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 206(B2), 15-31.
- [6] Milfelner, M., F. Čuš (2003) Simulation of cutting forces in ball-end milling. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 19 (1/2), 99-106.
- [7] Liao, T. W., L.J. Chen (1998) Manufacturing process modeling and optimization based on multi-layer perceptron network, *ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, 109-119.
- [8] Motghare, P. R.: Monitoring of cutting tools by the estimation of tool wear, Masters Thesis, *Indian Institute of Technology*, Delhi, India.
- [9] Čuš, F., J. Balič (2003) Optimization of cutting postopks by GA approach, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 19, (1/2), 113-121.
- [10] Liu, Y., T. Chen, L. Zuo, S. Yang (1996) K-L optimization of cutting parameters in machining, *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, Vol. 24(5), 50-52.
- [11] Xu, X. (1996) Fuzzy optimization of metal cutting parameters, *Journal of Huabei Power Institute*, Vol. 23(3), 65-69.
- [12] Brezočnik, M. (2000) Uporaba genetskega programiranja v inteligentnih proizvodnih sistemih, *Fakulteta za strojništvo*, Maribor.
- [13] Koza, J. R. (1994) Introduction to genetic programming. in: Advances in genetic programming, *The MIT Press*, Cambridge, Massachusetts.

Naslov avtorjev: dr. Matjaž Milfelner
dr. Uroš Župerl
prof. dr. Franci Čuš
Univerza v Mariboru
Fakulteta za strojništvo
Smetanova 17
2000 Maribor
matjaz.milfelner@uni-mb.si
uros.zuperl@uni-mb.si
franc.cus@uni-mb.si

Authors' Address: Dr. Matjaž Milfelner
Dr. Uroš Župerl
Prof. Dr. Franci Čuš
University of Maribor
Faculty of Mechanical Eng.
Smetanova 17
SI-2000 Maribor, Slovenia
matjaz.milfelner@uni-mb.si
uros.zuperl@uni-mb.si
franc.cus@uni-mb.si

Prejeto: 22.6.2004
Received:

Sprejeto: 2.12.2004
Accepted:

Odprto za diskusijo: 1 leto
Open for discussion: 1 year

Poročila - Reports

1955 - leto rojstva Strojniškega vestnika 1955 - Year of Birth of Journal of Mechanical Engineering

Po velikem uspehu Strojniškega priročnika profesorja inž. Bojana Krauta (prva izdaja je izšla l. 1954), ki je predvsem študirajočemu rodu nadomestil dotedaj skoraj standardna priročnika Dubbel in Hütte, je razumljivo, da je ta avtor z izrednim čutom za potrebe strojne stroke v Sloveniji zasnoval tudi nič manj pomembno izhajanje strojniške revije in jo tudi udejanil. Druge tehniške stroke z ustaljeno preteklostjo so že imele svojo periodiko (npr. Elektrotehniški vestnik, Rudarsko-metalurški zbornik), mlado strojništvo pa se jim je pridružilo s Strojniškim vestnikom. Časi, ko so se še poznale posledice vojne, niso bili ugodni za tiskovne podvige. Niso bila težka le denarna vprašanja, težave so bile tudi z reprodukcijskim materialom in z obremenjenostjo tiskarn. Po drugi strani pa posameznik takrat takega projekta tudi ne bi zmoget. Profesor Kraut pa je najprej ustvaril zadostno zaledje, da Strojniški vestnik ne bi izdihnil po nekaj številkah. Po drugi svetovni vojni je bilo strojnih inženirjev malo, vsi so bili na pomembnih mestih in do kraja obremenjeni, na srečo pa so se skoraj vsi dobro poznali. K temu je veliko pripomoglo Društvo strojnih inženirjev in tehnikov, s podružnicami po podjetjih, ki je prirejala strokovna in tudi prijateljska druženja, ki so bila dobro obiskana, saj so edina omogočala oddih od dela.

Po bogatih izkušnjah s priročnikom je prof. Kraut za uresničitev ideje o Strojniškem vestniku zbral uredniški odbor petih članov, sam pa je bil glavni in odgovorni urednik. Člani odbora so bili akademik prof. dr. Anton Kuhelj sen., prof. Albert Struna, prof. dr. Branko Kozina, doc. Boris Černigoj in Miroslav Pečornik, vsi tudi dipl.inž. strojništva. Zasnova vestnika se do danes ni bistveno spremenila, kar ne preseneča, saj so jo zasnovali inženirji, ki so bili takrat najtesneje povezani z



»operativo«, kot se je takrat imenovalo neposredno delo v industriji in za njo. Jasno pa je, da je vestnik v teku let sledil razvoju znanosti doma in po svetu, kolikor ta posega na področje strojništva – to področje pa je silno široko in pestro. V prvih letih tudi ni bilo težav s prispevki, tudi inozemskimi, saj so bili po večini iz prakse in za prakso, vendar na visoki ravni

Vedno najobčutlivejši pogoj za normalno izhajanje, to je denarna sredstva, je bil takrat rešen zelo spretno, predvsem ker so se strokovnjaki strojne stroke po vsej Sloveniji poznali, nemalo

zaradi zgoraj omenjene društvene dejavnosti (ki pa je z leti, tako kakor v sorodnih strokah, povsem zamrla). Dohodki so prihajali iz naslova, da je Strojniški vestnik glasilo društva strojnih inženirjev in tehnikov LRS, glasilo Oddelka za strojništvo Tehniške fakultete Univerze v Ljubljani, glasilo Inštituta za turbostroje (Št. Vid pri Ljubljani). Svoje plačane strani pa so imeli že prvo leto Titovi zavodi Litostroj v Ljubljani in Tovarna avtomobilov v Mariboru. Člani društev strojnih inženirjev in tehnikov so imeli vestnik plačan že s članarino. Tudi oglasov, v zelo koristni obliki, ni manjkalo. Vsi so namreč podrobno podajali svoj proizvodni program. Zelo donosni so bili tudi recenzijski izvodi tehnične literature, ki so jih vestniku pošiljale tuje založbe, saj je bil dostop do tuje literature (razen ruske) iz deviznih razlogov zelo otežen.

Uredniški odbor je imel z vestnikom le malo dela, ne glede na to, da je bilo to delo predvsem ljubiteljsko in da denar takrat (predvsem zaradi inflacije) ni imel takega učinka kot ga ima dandanes. Ob koncu kaže še enkrat poudariti: prof. dipl.inž. Bojan Kraut je tisti, ki je Strojniškemu vestniku ustvaril temelje, na katerih varno stoji že pol stoletja.

prof.dr. Boris Černigoj

5 desetletij - minila so kot trenutek 5 Decades - They Passed as One Moment

Dobro se spominjam jeseni leta 1955, ko smo, kot bruci, prvič vstopili na Oddelek za strojništvo Tehniške fakultete Univerze v Ljubljani (sedaj Fakulteta za strojništvo). Bilo nas je več kot 150 in med njimi skoraj 40% starejših študentov iz tedanje JA ali podjetij iz drugih republik. Med prvimi predavanji so bila predavanja iz Tehnologije kovin pri prof. Bojanu Kraut-u. Že na prvem ali drugem predavanju je padel predlog iz poslušalstva, ali ne bi bila predavanja v srbskohrvatskem jeziku, saj je bila slovenščina za mnoge slabo razumljiva. Odgovor je bil kratek in jasen: na slovenski univerzi predavamo v slovenščini. Nato nam je razložil napore, ki jih Oddelek za strojništvo posveča razvoju slovenske tehniške besede. Predstavil nam je prvo številko Strojniškega vestnika (SV) in vsakemu od nas položil na srce, da moramo biti, kot bodoči inženirji strojništva, vsi njegovi naročniki. Ko smo dobili še informacije o edini slovenski literaturi za strojne elemente, to so bili Litostrojski standardi, ki jih je uredil in večino tudi pripravil on sam, je bilo jasno, da poslušamo predavanja pri učitelju, kateremu razvoj slovenske tehniške besede ni samo želja, ampak stvarnost, saj jo je s sodelavci sam oblikoval.

Njegove besede so se nam mnogim vtisnile v spomin in danes ima marsikdo iz naše generacije doma celotno 50-letno zbirko SV. Za bralce teh vrstic naj omenimo, da tedaj ni bilo v slovenskem jeziku praktično ničesar, kar bi nam omogočilo hitrejši študij. Izposojali smo si znameniti nemški priročnik Dubbel, kot največjo svetinjo, saj brez njega ni bilo mogoče narediti skoraj nobenega programa – konstrukcije.

Prva številka SV je izšla marca 1955, kot skupno glasilo na novo ustanovljenega Društva strojnih inženirjev in tehnikov LRS (DSIT LRS), Oddelka za strojništvo Tehniške fakultete, Inštituta za turbo stroje in Titovih zavodov Litostroja ter Tovarne avtomobilov Maribor, z naslovno sliko sedanje stare stavbe Fakultete za strojništvo.

Prof. Bojan Kraut, kot prvi urednik, je v svoji uvodni besedi med ostalim zapisal:

»Strojniški vestnik« naj bi bil obveščevalec o razvoju strojne stroke doma in na tujem, objavljaj naj bi izvirne znanstvene in strokovne razprave domačih avtorjev ter pomagal inženirjem in tehnikom pri delu v podjetjih z obveščanjem o

strokovnih novostih in izmenjavo izkušenj med podjetji. Pozorno naj bi spremljal tudi strokovno literaturo« ter na koncu doda: **«Kolikor tesnejši bo vaš stik z glasilom, tembolj bo vaše.»**

Mislim, da danes po 50 letih izhajanja temu poslanstvu, ki smo ga vsi uredniki skušali v čim večji meri uresničevati, ni kaj dodati.

Naj citiram še eno pomembno misel iz uvodne besede tedanjega predsednika DSIT LRS, ing. B. Guština:

» Področja dela strojnih inženirjev in tehnikov so prav gotovo med najbolj raznolikimi na področju tehnike.....« in nato v naslednjem odstavku:

»Tudi o vlogi inženirjev in tehnikov samih v našem gospodarstvu bo treba slej ali prej spregovoriti tehtno besedo. V planskem obdobju naše obnove in graditve so le-ti uspešno posegali v izpolnjevanje najzahtevnejših nalog, pogosto z neizkoriščanjem pravice do omejenega delovnega časa in letnega dopusta. Po decentralizaciji gospodarstva (! Pišemo leto 1955-op.p.) pa se je njihov vpliv – ne da bi mogli analizirati prave vzroke – očitno zmanjšal. In vendar je nedvomno, da vloga inženirja in tehnika ne sme biti podrejena, če hoče imeti družba od takih svojih članov največjo možno korist. Saj danes njuno delovno področje niti ni več samo izrazito tehniško, temveč prav tako gospodarsko in politično.«

Tudi danes lahko v celoti pritrdimo tem mislim. Kot sta bila oba avtorja vizionarska, tako se zgodovina ponavlja. Žal predstavlja tehniška inteligenca tudi danes drugorazredni sloj v družbi, čeprav predstavniki družbe razglašajo, da je njen napredek odvisen predvsem od tehnološkega razvoja in uporabe znanja. Resnica je, da ne glede na tehniško disciplino, na glede na vrsto proizvoda, za vse potrebujemo stroj, napravo ali pripravo. Konstruirajo in izdelujejo jih na osnovi znanj strojništva v tesni naslonitvi na elektrotehniko in informatiko (mehatronika). Na koncu je treba izdelek narediti in tu so strojniki v proizvodnem procesu nepogrešljivi, da ne rečem, primarni.

Mislim, da je prišel čas, ko moramo obrniti aksiom: »ni problem narediti, problem je prodati«, v: »kar znamo narediti, morate prodati«. Ob tem pa moram reči, da je »znati narediti« odvisen od deleža

sredstev vloženih v razvoj in pridobivanje znanj in ne nazadnje od nagrad ustvarjalcem novih izdelkov, tehnologij in RR projektov.

Vsebina SV, ki je bila oblikovana v prvem letu, se do leta 1992 ni bistveno spreminjala. Stalne rubrike, po člankih, so bile: poročila, standardi, tehniška beseda, zakoni in uredbe, društvene vesti, strokovna literatura in ocene knjig. Na koncu pa so sledila strokovna poročila soizdajateljev. Povzetki člankov in vsebina so bili predstavljeni tudi v srbohrvaškem, angleškem, francoskem in nemškem jeziku. Že v prvi številki so bili tudi oglasi (državnih podjetij in privatnikov) - 15 po številu, kar dokazuje tedanjo tesno povezanost uredništva in izdajateljev z industrijo.

Ob trideseti obletnici izhajanja, ko se je poslovil prvi odgovorni in glavni urednik, B. Kraut, ugotavlja Svet SV:

»Strojniški vestnik je bil v svojem začetku – na ravni inženirjev in tehnikov – prvo samostojno glasilo za strojništvo v Jugoslaviji, v Sloveniji pa je od vsega začetka (do sredine 80-let, op.p.) edino domače strokovno glasilo za strojništvo, ki izpod peresa domačih avtorjev in objavlja razprave in poročila za domače bralce, s tujejezičnimi prilogami pa omogoča, da je z delom in dosežki pri nas doma seznanjena tudi tujina.« Nadaljuje pa z še danes veljavno ugotovitvijo o sodelovanju domačih znanstvenih in strokovnih delavcev v njem:

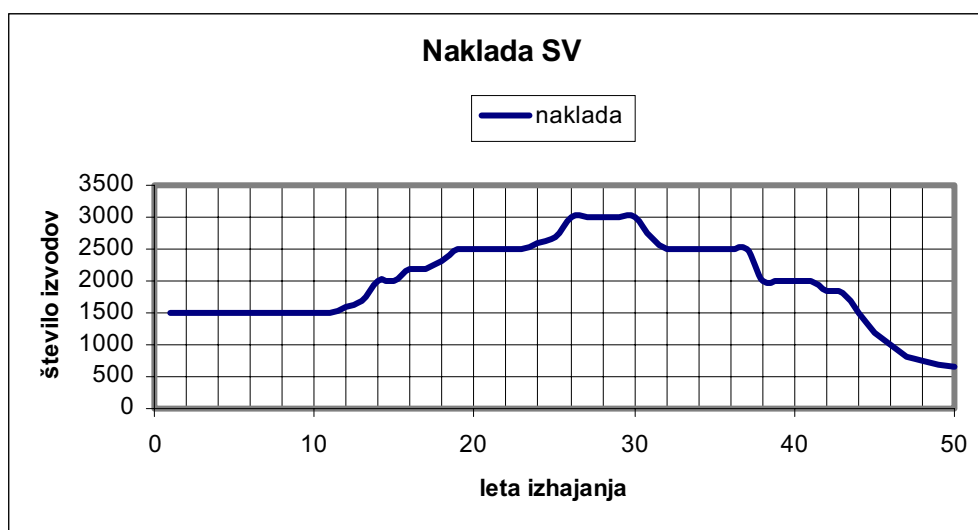
... «v njem ni zajeta večina našega znanstveno-raziskovalnega dela, niti strokovnjakom v praksi ne prinaša vsega tega, kar

bi ti nujno potrebovali. Vzroki zato so – med drugim – v tem, da večina naših raziskovalcev ... o svojem raziskovalnem delu strokovni javnosti sploh nikjer ne poroča, ali pa objavlja zadevna poročila kvečjemu v majhnih nakladah zbornikov o posvetovanjih, seminarjih, ipd., ki so praktično dostopni le ozkemu krogu strokovnjakov. Vzroki pa so tudi v tem, da poklicani strokovnjaki – zlasti univerzitetni učitelji – zelo neradi pišejo razumljivo za širše potrebe prakse, ker se pri sedanjem vzdušju na visokošolskih ustanovah ocenjujejo taki sestavki omalovažujoče za avtorjev »znanstveni profil« (in to kljub stalnim parolam o potrebi povezave univerze s prakso).«

Danes, dvajset let pozneje, so mnoge stvari drugačne, toda težko bi oporekali gornjim ugotovitvam, saj še vedno v veliki meri držijo.

V celotnem obdobju izhajanja SV smo izdali do konca 2004 skupno 476 števil v 278 zvezkih in 15 posebnih števil (v začetku so bile to posebne izdaje izbranih člankov v tujih jezikih, nato pa posebne številke kot zborniki konferenc).

Naklada SV se je spreminjala v odvisnosti od števila naročnikov, pomoči države, Fakultete za strojništvo ter industrije. Natančnih podatkov sicer ni, vendar je podana ocena gibanja naklade tekom let. Točni podatki so za zadnjih 12 let. V začetku je bila naklada 1500 izvodov, da bi v 70 letih porasla na cca 3000 izvodov in nato postopoma padala s propadanjem slovenske strojne industrije na današnjih 650 izvodov. O vzrokih za tako stanje nekoliko kasneje.



Prav je, da se ob 50 letnici izhajanja spomnimo, kdo so bili, poleg avtorjev, ustvarjalci SV. Naj pričnemo z uredniki: prof. Bojan Kraut (gl. in odg. urednik 1955 – 1985); prof.dr. Jože Puhar (gl. in odg. urednik 1985 – 1992); prof.dr. Peter Novak (gl. urednik 1992 – 1999); prof.dr. Andro Alujevič (odg. urednik 1992 – 2002); prof.dr. Franc Kosel (gl. urednik 2000 – 2002); prof. dr. Matija Fajdiga (gl. urednik 2002) in od 2003 dalje prof.dr. A. Alujevič, ki je sedaj glavni in odgovorni urednik ter od 1992 doc.dr. Zoran Kariž, njegov namestnik.

Strokovno delo so opravljali v uredništvu: Marja Bleiweis (1955 – 1960), Anja Baras, roj. Kraut, lektorica za slovenski jezik (1958 hon.; 1968 – 1997 tudi tehnična urednica; do danes hon.), Hilda Miklič (1960 – 1982), Milica Pavlin (1960 – 1978), Jožica Novak (1978 – 1983), za finančne zadeve, Jožefa Puhar (hon.: 1962 – 1992) za strokovne ilustracije (slike, diagrame), Ksenija Davidovič (hon.: 1988 – 1993), Vidka Mužar (1992 – 1998), Suzana Domjan kot tehnična urednica (1997 – danes), Tončka Poličnik (1998 – danes), Alan McConnell Duff (hon.: 1992 – 1999) in dr. Paul McGuinness (hon.: 1999 – danes), lektorja za angleščino.

S spremembo družbenih odnosov in industrijske aktivnosti, so se spremenili tudi ustanovitelji. Po uveljavitvi novega zakona o društvih v 80-letih, je SV izgubil pravno samostojnost. Pod svoje okrilje ga je prevzela Fakulteta za strojništvo v Ljubljano, kot svojo delovno enoto. Iz ustanoviteljstva so izpadla industrijska podjetja, namesto njih je vstopila GZS – Združenje kovinske industrije. Tako so danes ustanovitelji in izdajatelji: ZSIS, UL - FS Ljubljana, UM - FS Maribor in GZS – ZKI. Poleg Uredniškega odbora s 23 člani ima Svetovalni mednarodni odbor s sedmimi člani in Izdajateljski svet z 12 člani.

V življenju vsake revije prihaja do vzponov in padcev, do sprememb uredniške politike in/ali celo namena revije. SV je v začetku izhajal četrt-letno, nato je v 60 letih prešel na dvomesečno izhajanje (z večjimi in manjšimi zamudami) in po letu 1999 izhaja redno mesečno v dveh jezikih. Sedanji letni obseg tekstov je cca 400 strani.

Kakor je iz diagrama razvidno je naklada rasla od začetka izdajanja do sredine 70-let skoraj vzporedno z vzponom slovenske industrije (Litostroj, Metalna, TAM, Tomos, IMV, Hidromontaža, Emo, Gorenje itd.). Naročniki so bili podjetja, njihove strokovne knjižnice, razvojni oddelki, člani DSIT in študenti. Ker je bil SV pogosto

prvi vir informacij o novih tehnologijah (spominjamo se preglednih člankov o sejmskih novostih prof. Gologranca), vir informacij o spremembah in uspehih študija (razprave, ki jih je vodil prof. Kraut ob stopenjskem študiju), o razvoju FS (nova gradnja) itd. je bilo število naročnikov veliko. Z odpiranjem meja bivše Jugoslavije po letu 1972, so se povečali tudi stiki tehnične inteligence z inozemstvom. Možnosti za nakup tuje literature in knjig so močno narasle. To je imelo za posledico, da SV ni bil več tako aktualen in vedno v toku časa.

Študenti so, kljub nizki naročnini, postali vedno bolj redki naročniki, saj jih k temu ni stimuliralo niti pedagoško osebje na obeh fakultetah. Avtorji so morali za objavo svojih del v 80-letih sofinancirati tisk, saj je bila finančna podpora države minimalna. To je mnoge odvrnilo od pisanja. Finančna situacija je bila slaba tudi zaradi manjšega števila oglasov. Zato je bilo potrebno zmanjševati stroške z manjšo naklado.

Hiter razvoj informatike, posebno svetovne spletne mreže, je bistveno spremenil razmere. Nenadoma so postale informacije hitro dostopne široki množici uporabnikov. Tudi SV se je moral vključiti v ta razvoj, **zato ga lahko od leta 2002 prebiramo preko spletne strani brezplačno.** To pomeni, da je študentom strojništva (3408 vpisanih na obeh univerzah v letu 2003) na razpolago vsak trenutek in to brez naročnine. Podobno velja za člane ZSIS in industrijske uporabnike. Vprašanje, koliko časa bo v Sloveniji še primerno izdajati strokovni časopis v papirnati obliki, je močno odvisno od nacionalne politike do znanstvenega tiska in tehnične kulturne dediščine. Verjetnost, da bi naklada porasla nad 1500 izvodov, je v sedanjih pogojih relativno majhna, čeprav bi to moral biti cilj uredništva, da bi ohranili njegov mednarodni ugled in doseženi nivo razširjenosti. SV tudi izmenjujemo s 45 revijami iz vsega sveta.

Po letu 1992 je SV doživel organizacijske in vsebinske spremembe. Ker je ameriško načelo »piši ali zbriši« pri napredovanju v univerzitetne nazive postalo zelo pomembno, je bilo potrebno zagotoviti slovenskim avtorjem v strojništvu kvalitetno revijo z mednarodnim priznanjem. Revija SV je postopoma prerasla iz pretežno strokovne v pretežno znanstveno. S tem je izgubila del bralcev v industriji in projektivi. Vključitev v mednarodni sistem indeksacije je postala nuja. Jasno je bilo, da kljub odličnim člankom v slovenščini, ne bomo mogli vstopiti v ta krog. Na predlog glavnega urednika

prof. P. Novaka je Svet SV v letu 1992 odločil, da se SV tiska dvojezično, v slovenskem in angleškem jeziku in preide iz dvomesečne na enomesečno izdajo (1999). Istočasno smo predhodno zagotovili ustrezno sofinanciranje s strani MŠZŠ in strogo spoštovanje mednarodnih meril za opremo znanstvenih revij. Nato smo zaprosili SCI za sprejem SV v indeksacijo. Po prvotni zavrnitvi in našem vztrajanju z objavo odličnih člankov, dvojezičnim tiskom, je SV bil končno sprejet v sistem SCI in dosegel danes vrednost indeksa SCI 0,05. To je omogočilo SV na drugi strani, da si je pridobil visoko mesto pri financiranju znanstvenega tiska s strani MŠZŠ in s tem rešil finančne probleme, ki so pestili prejšnja uredništva. SV je prva znanstvena revija v Sloveniji, ki je izhajala dvojezično in mesečno.

Odločitev, da preidemo na dvojezično izdajo je imela dva cilja: prvič, da postanejo članki slovenskih avtorjev takoj dostopni bralcem v tujini in drugič, da pomagamo slovenski strokovni javnosti pri pravilni uporabi angleške terminologije v strojništvu, saj je za mnoga podjetja, ki izvažajo, angleščina postala prvi tuj jezik.

Z doseženimi rezultati smo lahko zadovoljni, celo več, na njih smo, kot Slovenci, lahko ponosni. Vendar nizek indeks SCI bode v oči. Je kakovost člankov slaba, so teme nezanimive in izven toka pomembnih raziskovalnih smeri v svetu, so neuporabni za industrijo, so sami sebi namen ali pa se najboljše rezultati naših raziskovalcev tiskajo v tujih revijah?

Odgovori niso enostavni, saj je vsakega nekaj. Naj mi bo dovoljeno ob tej priliki in na tem mestu izreči nekaj kritičnih misli in ugotovitev, zakaj je tako.

Po osamosvojitvi je slovenska strojna industrija doživela velik kakovostni padec. Številni razvojni oddelki in industrijski raziskovalni inštituti so bili ukinjeni. Raziskovalno delo na Univerzi je bilo odrezano od korenin. Mnogi raziskovalci so po načelo raziskovalne svobode raziskovali, kar jim je bilo všeč, ali za kar so dobili partnerja v tujini (EU projekti). Zaradi tega so se mnogi odločali, da objavljajo v tujih revijah z višjim indeksom SCI. Temu je največ pripomogla sama Univerza s svojim

sistemom ocenjevanja primernosti učiteljev za napredovanje. Oba senata Fakultete za strojništvo v Ljubljani in Mariboru nista priznavala objav v SV (ki je že imel svoj SCI indeks), kot objave z SCI indeksom. Kako je to mogoče, si ne zna razložiti nihče v Evropi, čeprav sem mnoge spraševal. Dva ključna izdajatelja SV ne priznata kakovosti svojega glasila pri napredovanju svojih učiteljev! Če bi vsi članki, ki so jih v zadnjih 10 letih učitelji teh ustanov objavili v tujih revijah, izšli najprej, četudi morda v nekoliko krajši obliki, v SV, potem sem prepričan, da bi bil danes SCI indeks že blizu 0,2 ali vsaj 4x boljši. Kdor sam sebe ne ceni, naj ne pričakuje, da ga bodo cenili drugi, pravi pregovor in o njem naj razmišljata vodstvi obeh fakultet.

V kolikor pa mi bo dana možnost, bom na Agenciji za znanost, ki sofinancira raziskovalne projekte in tisk revije, striktno zagovarjal stališče, da morajo biti rezultati raziskovalnega dela, predvsem pa doktorati in magisteriji mladih raziskovalcev (ki jih plačujejo slovenski davkoplačevalci) primarno objavljeni v **domaćih, mednarodno priznanih revijah, kar SV brez dvoma je**, in šele nato v tujini. Kdor se tega ne bo držal, naj ne zahteva denarja za raziskovalno delo, niti za tisk. Izbira je svobodna.

To je ena izmed poti, da povečamo ugled revije, ki je ponesla v svet slovensko tehniško besedo in rezultate naše znanosti ter slovenske industrije.

Druga, za Slovenijo še pomembnejša rešitev pa je, da se pri pisanju člankov stimulira stotnica magistrstrov v industriji in nekaj deset doktorjev, ki v njej še vztrajajo. Njihovi članki bodo odraz stanja v industriji, bodo odraz rezultatov vzgoje mladih raziskovalcev. Če člankov ne bo, je nekaj hudo narobe. O tem pa morda ob naslednji okrogli obletnici SV, saj mu želimo vsi dolgo in uspešno življenje.

Vsem, ki so kakorkoli sodelovali pri njegovu rasti, kot avtorji, uredniki in strokovni sodelavci gre velika zahvala, saj vsi vemo, da trud, ki so ga imeli pri tem ni bil nikoli materialno poplačan. Moralno zadoščenje in priznanje pa gre prav vsem.

*Prof. dr. Peter Novak
Bivši glavni urednik, krivec za dvojezičnost in
vključitev v SCI.*

Ob 50. obletnici Strojniškega vestnika On the 50th Anniversary of Journal of Mechanical Engineering

Marca 1955 je izšla prva številka Strojniškega vestnika, ki ga je zasnoval in potem do 1985 urejal Bojan Kraut. V prvem letu so izšli 4 zvezki. V takratnem uredniškem odboru so bili Anton Kuhelj st., Albert Struna, Branko Kozina, Boris Černigoj in Miroslav Pečornik.

Kasneje je izhajalo po 6 zvezkov, dandanes pa imamo 11 zvezkov (oziroma 12 števil, saj je ena dvojna). Od 1985 do 1992 je Strojniški vestnik urejal Jože Puhar, v uredniškem odboru pa so se v tem obdobju zvrstili Igor Emri, Jože Hlebanja, Bojan Kraut, Evgen Marek, Erik Mohor, Hinko Murn, Pavel Šmarčan in Želimir Dobovišek.

Kot glavni urednik je bil 1992 – 1999 Peter Novak, 2000 – 2002 Franc Kosel in 2002 – 2003 Matija Fajdiga, odgovorni urednik pa od 1992 naprej podpisani, ki sem bil 2003 imenovan za glavnega in odgovornega urednika. Ves čas od 1992 je moj namestnik oz. pomočnik Zoran Kariž, občasno pa so kot souredniki posameznih zvezkov nastopali še Matija Tuma, Iztok Golobič, Anton Jezernik, Janko Remec, Janez Kopač, Dragica Noe, Peter Novak, Alojz Poredoš, Ferdinand Trenc, Matija Fajdiga, Anton Bergant in Matjaž Četina. V uredniškem odboru so sedaj poleg predstavnikov Zveze strojnih inženirjev in Gospodarske zbornice redni profesorji obeh Fakultet za strojništvo v Ljubljani in Mariboru, ki so se strinjali s sodelovanjem kot recenzenti recenzij (glej podatke v kolo fonu vsakega zvezka).

Uredniška politika sloni na izdajanju splošnih in tematskih zvezkov skupinskih prispevkov (tehnologija, konstrukterstvo, energetika, mehanika in materiali). V nekaterih primerih smo objavili tudi izbrane prispevke s posameznih znanstvenih sestankov, ki so jih avtorji v načelu



predelali po navodilih, ki so objavljena na koncu vsakega zvezka Strojniškega vestnika.

Ker od 1992 izhajamo dvojezično, so bili vsi prispevki prevedeni v angleščino, razen tistih, ki so kot strokovne objave lahko samo v slovenščini. Tujim avtorjem (izvirnih, preglednih in kratkih) znanstvenih člankov je v letu 2004 Izdajateljski svet dovolil objavo samo v angleščini, medtem ko morajo biti strokovni

članki prvenstveno v slovenskem jeziku.

Strojniški vestnik finančno podpira pristojno Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo. Od 2004 smo vpisani v razvid medijev pri Ministrstvu za kulturo R. Slovenije. Od leta 1998 je Strojniški vestnik indeksiran v SCI in je imel v letu 2003 količnik vpliva 0,048.

V mesecu marcu 2005 bomo pripravili svečanost ob 50. obletnici izhajanja Strojniškega vestnika. Vabila bomo vsem naročnikom in drugim prijateljem razposlali 1.3.2005 po pošti v Ljubljani, pri čemer bomo uporabil poseben priložnostni poštni žig. Ob tej priliki bo v avli glavne pošte postavljena ustrezna filatelistična razstava slovenskih znamk, dopisnic in žigov s tehnično motiviko (železnice, letalo, ladijski vijak, črpalka, kamšt, mlin, plavž, tramvaj, kolo, avtomobili), ki si jo bo možno ogledati v obdobju prvih 14 dni na glavni pošti na Slovenski cesti 32, kasneje pa v prostorčku SV na FS. O prostorskih stiskah in finančnih problemih SV menim, da jih bodo soustanovitelji in izdajatelji morali čimprej rešiti, saj po tej plati ne moremo še naprej delovati mimobežno.

*Glavni in odgovorni urednik
Andro Alujevič*

Osebnosti - Personal Events

Doktorati, magisteriji, diplome - Doctor's, Master's and Diploma Degrees

DOKTORATI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani sta z uspehom zagovarjala svoji doktorski disertaciji:

dne 7. decembra 2004: **mag. Matija Jezeršek**, z naslovom: "Laserski sistem za tridimenzionalno merjenje hitro spreminjajoče se oblike teles";

dne 21. decembra 2004: **mag. Primož Podržaj**, z naslovom: "Krmiljenje procesa električnega uporovnega varjenja".

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru sta z uspehom zagovarjala svoji doktorski disertaciji:

dne 10. decembra 2004: **mag. Iztok Palčič**, z naslovom: "Model razvoja, organizacije in prenosa znanja ter tehnologij v industrijskih grozdih";

dne 16. decembra 2004: **mag. Mihael Brunčko**, z naslovom: "Sprememba električne upornosti kovinskih materialov med oksidacijo pri visoki temperaturi".

S tem so navedeni kandidati dosegli akademsko stopnjo doktorja znanosti.

MAGISTERIJI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani je z uspehom zagovarjal svoje magistrsko delo:

dne 8. decembra 2004: **Danijel Langus**, z naslovom: "Impulzno obločno varjenje s taljivo elektrodo v zaščitnem plinu".

S tem je navedeni kandidat dosegel akademsko stopnjo magistra znanosti.

DIPLOMIRANCI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani so pridobili naziv univerzitetni diplomirani inženir strojništva:

dne 23. decembra 2004: Aleksander JENKO, Saša MARUŠIČ, Bodan PREGELJ, Robert REBEC, Igor RANT.

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru je pridobil naziv univerzitetni diplomirani inženir strojništva:

dne 23. decembra 2004: Tomaž BRAJLIH.

*

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani so pridobili naziv diplomirani inženir strojništva:

dne 16. decembra 2004: Tomaž KOBE, Samo LEČNIK, Jure MARTINJAK, Marjan Janez MUC, Denis OBLAK, Sebastjan SMRKOLJ, Robert STAREŠINIČ, Samo ŽNIDARŠIČ;

dne 17. decembra 2004: Boštjan ČEBRON, Klemen KOKALJ, Primož PRIMEC;

dne 20. decembra 2004: Tomaž LOGAR, Matjaž MEDVEŠČEK, Matej MEJAČ, Aleš ŠOŠKO, Tilen ŠTREMFLJ.

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru so pridobili naziv diplomirani inženir strojništva:

dne 23. decembra 2004: Marko FILIPIČ, Marjan KOZINC, Bojan LAUKO, Bojan MALEK, Jernej MARKIČ, Andrej MOČILNIKAR, Boris STRELEC, Boštjan ŠIFRER, Drago ŽUPANC.

Doktorske disertacije 1962 - 2004

Doctor's Degrees 1962 - 2004

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

1. Vdovič Jurij: Problem lastnih vrednosti večkrat statično nedoločenih nosilcev s posebnim ozirom na uporabo v strojništvu, 1962
2. Baloh Tone: Eksergetska raziskava sladkorne tovarne, 1962
3. Jurišič Dragoš: Račun napetosti in deformacij v elastično-plastičnem področju, 1964
4. Muršič Milan: Koncentracije napetosti na robovih lukenj v zmerno debelih elastičnih ploščah, 1965
5. Škerlj Marko: Splošna rešitev osnosimetričnega stabilitetnega problema krožne stene s centrično krožno odprtino, 1967
6. Hlebanja Jože: Uporabnost cikličnih krivulj za boke zob zobnikov, 1967
7. Krušič Bogdan: Reševanje Lamejevega sistema diferencialnih enačb v različnih pravokotnih koordinatnih sistemih, 1967
8. Oprešnik Miran: Splošne in posebne zakonitosti pri kvantitativni in kvalitativni oceni toplotnih črpalk, 1968
9. Gašperšič Branko: Termodinamične lastnosti dimnih plinov nastalih pri popolnem in nepopolnem zgorevanju goriv, 1970
10. Čižman Vincenc: Analitična obravnava toplega valjanja ploščatih profilov najmanjših debelin, 1970
11. Kos Marko: Raziskava pojava zajedanja bokov zob čelnih zobnikov pri majhnih hitrostih, 1971
12. Vidregar Franc: Optimalni parametri izvažalnih naprav za vertikalni transport in njihove odvisnosti od tehničnih in ekonomskih faktorjev, 1971
13. Poljak Dušan: Nestacionarni termoelastični procesi pri realnih robnih in začetnih pogojih, 1972
14. Pertot Bogomil: Problemi elasto-plastičnih deformacij pri ravninskih elementih s posebnim ozirom na stabilnostne razmere, 1972
15. Kuhelj Anton, ml.: Instabilitetni problemi rotirajoče gredi, 1972
16. Šmarčan Pavel: Oblike dotikalnih ploskev med zobmi pri stožčastih zobnikih z ločnimi zobmi, 1972
17. Justin Borut: Raziskava optimalnih impulznih odgovorov odrezovalnega procesa litin s posebnim ozirom na mehanizem samovzbujalnih nihanj in stabiliteto sistema, 1973
18. Leskovar Polde: Analiza transformacijskega procesa pri odrezavanju lahkih kovin s pomočjo transfernih funkcij glede na fizikalne in geometrične vhodne in izhodne slučajnostne procese, 1973
19. Roethel Franc: Adaptivno krmiljenje sistema za notranje brušenje in on-line identifikacija brusilnega procesa z ozirom na geometrične slučajnostne vhodne in izhodne funkcije, 1973
20. Seljak Zoran: Raziskave identificiranja procesa odrezovanja jekel s sistemsko analizo in metodo stohastičnega optimiranja odrezovalne storilnosti, 1973
21. Tomšič Mihael Gabriel: Zvočni pojavi pri vrenju, 1973
22. Opara Mirko: Poraba moči in časi mešanja pri homogeniziranju newtonskih tekočin, 1973
23. Kostnapfel Aleksander: Optimizacija vlečnih in trdo vpetih nosilnih vrvi pri žičnicah s posebno aplikacijo za gozdarske žičnice in obdelavo ustreznega napenjalnega in merilnega sistema, 1973
24. Košak Karl: Posebni termoelastični robni pogoji pri ravninskih problemih, 1974
25. Kosel Franc: Stabilnostni problem dvakrat sovisne stene z uporabo funkcij kompleksne spremenljivke, 1974
26. Obsieger Vilka: Interferometrijsko istraživanje prelaza mješovite prisilne i prirodne konvekcije kod horizontalnog cilindra u poprečnoj struji zraka, 1974
27. Fajdiga Matija: Vpliv jalove moči na bremenitveni kolektiv transmisije terenskih vozil, 1975
28. Mrdović Momir: Analiza nihanj štiriktaktnega Diesel motorja tovarne motorjev "Famos" iz Sarajeva in njihova primerjava z enačbami za reducirane dolžine gredi, 1975
29. Žun Iztok: Trodimenzijski mehurčkast tok nizkih kvalitet, 1975
30. Gregl Dominik: Optimalna oblika profila kril za jadralna letala z maksimalnim območjem majhnega upora, 1976
31. Janežič Igor: Nosilnost dinamično

- obremenjenih vijčenih prirobnic, 1976
32. Sušnik Janez: Analiza in sinteza zanesljivosti varnostnih sistemov v jedrski elektrarni, 1975
33. Kranjc Janez: Analiza interacijskih metod za reševanje problemov prenosa toplote, 1975
34. Kariž Zoran: Analiza uporabnosti relejnega PI regulatorja, 1976
35. Velenšek Boris: Sprememba vstopnega vrtnca v pojemalni kaskadi ter njegov vpliv na karakteristiko aksialnega turbinskega stroja, 1976
36. Bertoncelj Julij: Raziskava razdelitve napetosti v vijaku z metriskim navojem, vpliv navojnice na torzijske obremenitve in vpliv povaljanja žleba na trdnost, 1977
37. Bajd Marin: Vpliv debeline tokovne plasti na hitrostno polje v rotorju Francisove turbine, 1977
38. Fatur Vladimir: Raziskava kompleksnega vpliva sprememb sekundarnih parametrov na performanse plinskega turbinskega sistema, 1976
39. Traven Furio: Numerička analiza stabilnosti ravninskih problema udajanjem velikih deformacija, 1977
40. Grum Janez: Avtomatsko klasificiranje obdelovancev v proizvodnem strojništvu, 1977
41. Čaušević Mehmed: Dinamička analiza mostova sa zategama primjenom matematičkih modela, 1977
42. Tireli Enco: Otpor trenja i prijelaz topline u cijevima sa umjetno stvorenom hrapavošću, 1977
43. Šukarov Aleksandar: Višeredne kaskade aplicirane u rotorima radialnih turbostrojeva, 1977
44. Grželj Andrej: Razvoj in raziskava merilnih metod za avtomatsko merjenje dimenzij obdelovanca za adaptivno krmiljenje, 1977
45. Starbek Marko: Generalizacija modela za optimalno razvrstitev obdelovancev na strojih, 1978
46. Mede Janko: Kriteriji za mehansko utrujanje kovin na osnovi notranjega trenja, 1978
47. Crnjac Ante: Stabilnostni problem lupin z odprtinami, 1979
48. Esmail Elsayed Ahmed: Akustična emisija med faznimi premenami v kovinah in zlitinah, 1979
49. Vižintin Jože: Raziskava konkavno-konveksnih profilov za polzasto dvojico in optimizacija polzevega gonila glede na toplotno obremenitev, 1978
50. Trnkoczy Amadej: Študij mehanskega delovanja skočnega sklepa pod vplivom električne stimulacije v prisotnosti naključnih motilnih vplivov, 1979
51. Kranjc Karel: Analiza konvektivnega prenosa toplote in snovi v enofaznih sistemih, 1979
52. Duhovnik Jože: Raziskava torzijskih nihanj na štrcljih gredi enostopenjskega reduktorja in njihov vpliv, 1980
53. Možina Janez: Akustična emisija pri energijskih pretvorbah na površini kovin, 1980
54. Emri Igor: Vpliv dinamičnih obremenitev na mehanske lastnosti visokoelastičnih materialov, 1981
55. Ovsenik Avgust: Kritične razmere pri suspendiranju trdnih delcev v posodi z mešalom, 1981
56. Zazula Stanislav: Vpliv načina vpetja enovalnega batnega motorja na ravninsko nihanje okvirja motocikla, 1981
57. Štok Boris: Reševanje robnih problemov upogiba neskončne plošče z metodo preslikave, 1981
58. Radović Vladeta: Raziskave specialnih ozobij pri hiperboloidnih zobnikih, 1983
59. Živkov Peter: Raziskave trdnostnih lastnosti brusilnih orodij pod dinamičnimi obremenitvami z mehanskim generatorjem, 1983
60. Čudina Mirko: Zamenjava delovnega medija pri dvotaktnih Ottovih motorjih z notranjo pripravo zmesi iz dveh plinastih medijev, 1983
61. Kuzman Karl: Metodika vnaprejšnje določitve vplivnih veličin na proces periodičnega valjanja kratkih surovcev v ovalnem kalibru, 1984
62. Drobnjak Vladimir: Toplotni učinki pri izdelavi špiralnih svedrov pri brušenju v polno, 1984
63. Vodeb Dušan: Optimizacija procesa ogrevanja vložka v plinskih metalurških pečeh, 1984
64. Pratnekar Anton: Razvoj metode za tehnološko optimizacijo proizvodnih celic, 1984
65. Popovski Kiril: Uporaba sončne energije in hranilnika toplote v zemlji za ogrevanje rastlinjakov, 1984
66. Zgonik Miran: Vpliv osnovnih veličin delovnega procesa na prenos toplote s sevanjem v valju dieselskega motorja, 1984
67. Garbajs Vito: Raziskava lokalnih porazdelitev parametrov elektroerozijskega procesa, 1985
68. Cvetaš Franc: Analiza rešitve osnosimetričnih lupin z robnimi in lokalnimi motnjami, 1984

69. Prebil Ivan: Vpliv zaostalih plinov na proces v valju dizelskega motorja, 1984
70. Sopta Luka: Modeliranje gibanja vode v zalivih pod vplivom vetra, plime in oseke, 1984
71. Nikolić Ilija: Elastodinamična analiza mehanizmov za industrijske robote, 1984
72. Junkar Mihael: Raziskave identifikacije brusilnega procesa s korelacijskimi funkcijami, 1986
73. Kovač Miran: Kontinuirano ugotavljanje zaostalih napetosti v površinah v odvisnosti od postopkov obdelave, 1986
74. Kopač Janez: Pojavi utrjanja avstenitnih jekel pri odrezavanju, 1986
75. Rituper Rafael: Optimizacija parametrov za najmanjšo toplotno in snovno izmenjavo med tankim zračnim curkom in toplo vodno površino, 1986
76. Zupančič Jože: Porazdelitev toplotnih tokov v neenakomerno ogrevanih prostorih zgradbe, 1986
77. Kramar Janez: Prispevek k elastomehanski rešitvi splošne ortotropne toroidne lupine, 1987
78. Rant Jože: Raziskave možnosti uporabe radiografskih metod za analizo površin, 1986
79. Bajić Nedjo: Identifikacija parametrov brušenja za adaptivno krmiljenje, 1986
80. Al-Mansour Fouad: Optimizacija investicij in obratovanja energetskih postrojenj v industriji, 1986
81. Petelin Stojan: Termohidrodinamični popis tokov vodnega filma in vlažnega zraka, 1987
82. Bosanac Miroslav: Metoda za optimizacijo termičkih solarnih sistema na osnovu analognih električnih shema, 1987
83. Sluga Alojzij: Načrtovanje tehnoloških procesov z ekspertnim sistemom, 1987
84. Petrišič Jože: Študij deformacije snovi z elastodinamičnim diskretnim modelom, 1987
85. Marinšek Zoran: Vpliv tlačnih nihanj na nastajanje mehurčkov pri vrenju, 1987
86. Marčič Milan: Vpliv disperzije curka vbrizganega goriva in razmernika zraka na samovžig zmesi v dizelskem motorju, 1988
87. Kunc Pavel: Določitev meje hlajenja hladilnih stolpov na naravni vlek pri nizkih temperaturah hladilnega zraka, 1988
88. Oman Janez: Direktna absorpcija sončnega sevanja s trdnimi delci v plinu, 1989
89. Milisavljevič Branko M.: Dvoparametrski problem bočne stabilnosti konzole z geometrijsko in obremenitveno neidealnostjo, 1989
90. Kažić Nenad: Model porazdelitve toplotnih in zračnih tokov v zgradbah, 1989
91. Poredoš Alojz: Posplošeni model za preračun lamelnih prenosnikov toplote, 1990
92. Kumelj Tomaž: Stabilnost tankih anizotropnih krožnih kolobarjev, 1989
93. Skeiker Kamal: Dinamična analiza prenosa toplote v zgradbi s posebnim ozirom na sevanje, 1990
94. Jin Chen: Stabilnostni problem kolobarja z nezvezno delujočo obremenitvijo, 1990
95. Diaci Janez: Mehanski pojavi pri lasersko induciranih transformacijah snovi, 1990
96. Širok Brane: Fizikalno modeliranje transporta trdnih delcev z metodami kaotične dinamike, 1990
97. Butala Peter: Sistem orodij za modularno računalniško integrirane obdelovalne sisteme, 1991
98. Noe Dragica: Računalniško podprto načrtovanje vpenjanja pri struženju, 1991
99. Jakupović Esad: Metodologija energijske bilance biomase, 1991
100. Rihar Gabriel: Model neposrednega legiranja navarov, 1991
101. Tušek Janez: Raziskava procesov pri varjenju in navarjanju z dvojno in s trojno elektrodo pod praškom, 1991
102. Polajnar Ivan: Raziskava uporovnega točkovnega varjenja ob uporabi detekcije akustične emisije, 1991
103. Trenc Ferdinand: Analiza temperaturnega stanja na valju zračno hlajenega motorja, 1991
104. Arh Slavko: Večnamenski absorpcijski toplotni transformator, 1992
105. Milašinović Tanja: Dinamične razmere v klimatizacijski napravi z odprtim absorpcijskim hladilnim procesom, 1991
106. Logar Bojan: Raziskava vmesnika med računalniško podprtim načrtovanjem procesa izdelave (CAPP) in konstruiranjem (CAD), 1991
107. Kljenak Ivo: Prehod iz mehurčkastega v čepasti tok, 1992
108. Zupančič Danilo: Raziskave vpliva parametrov rezalnega procesa na akustično emisijo, 1992
109. Zgonc Kornelija: Razvoj nevronske mreže za analizo akustične emisije, 1992
110. Kampuš Zlatko: Analiza natančnosti procesa stanjševalnega vlečenja votlih teles z dnom, 1993

111. Bergant Anton: Kavitacijski tok med prehodnimi režimi v cevni sistemih, 1992
112. Golobič Iztok: Modelna analiza največjih toplotnih tokov v dvofaznih zaprtih termosifonih, 1993
113. Suhadolnik Alojz: Sistem senzorjev z optičnimi vlakni za nadzor parametrov v procesni tehniki, 1993
114. Hafner Jože: Tokovne in temperaturne razmere toka tekočine v snopu cevi kotelnega prenosnika toplote, 1994
115. Pipan Janez: Proces preoblikovanja cevi z notranjim tlakom in aksialnim pritiskom, 1993
116. Zgalei Abdullatif Salim: Hlajenje zgradb s sončno energijo, 1994
117. Bizjan Frančišek: Zaznavanje tlačnega poteka s tipali vključenimi v tesnilo glave motorja, 1994
118. Grad Ladislav: Optoakustična detekcija in analiza pri laserskih obdelovalnih procesih, 1994
119. Nastran Vinko: Dinamično vodenje hladilnega sistema, 1994
120. Govekar Edvard: Uporaba nevronske mreže za napoved časovno odvisnih parametrov tehniških procesov, 1994
121. Bernard Franc: Raziskave temperaturnih razmer na lamelnih prenosnikih toplote, 1994
122. Bombač Andrej: Karakteristike struktur faznega stika pri aeraciji v posodi z mešalom, 1994
123. Dolinšek Slavko: Sprotna identifikacija rezalnega procesa na makro nivoju, 1994
124. Medič Marijan: Raziskava skobljanja lesa s poševnim rotirajočim skobeljnim vretenom in vpliv na kvaliteto površine, 1994
125. Bundara Borut: Upogib enoosnih konstrukcijskih elementov iz materiala z oblikovnim spominom, 1995
126. Perpar Matjaž: Karakteristike struktur faznega stika v kapalnem reaktorju, 1995
127. Boltežar Miha: Analiza nihanja kompleksnega nelinearnega mehanskega sistema, 1995
128. Remec Janko: Prestop toplote in snovi pri absorpciji v absorpcijskih toplotnih napravah, 1995
129. Senegačnik Andrej: Zanesljivost delovanja elektram, 1995
130. Hrovatin Rok: Optodinamska karakterizacija interakcije med laserskimi pulzi in snovjo, 1995
131. Batista Milan: Analiza zaostalih napetosti v kovinskih delih po toplotni in mehanski obdelavi, 1995
132. Kuštrin Igor: Uporabnost dimetil etra pri prenosu energije v krožnih procesih, 1996
133. Bučar Bojan: Modulacija rezalne sile pri periodičnem krožnem odrezavanju lesnega tkiva kot samovzbujevalnem sistemu, 1996
134. Jurkovič Jože: Razvoj konstrukcijskih elementov iz sestavljenih materialov in analiza njihove uporabnosti za gradnjo kapitalnih delov strojev, 1995
135. Taljat Boštjan: Določanje $[\sigma]$ - $[\eta]$ diagrama gradiv z neporušno metodo z enostopenjskim vtiskanjem kroglice, 1996
136. Mihelič Aleš: Računalniško podprto optimiranje pri procesih hladnega masivnega preoblikovanja, 1996
137. Susič Egon: Uporaba nevronske mreže za oceno lastnosti brušene površine na osnovi akustične emisije, 1996
138. Blagojevič Bogdan: Modeliranje turbulentnega transporta z vodno prho, 1996
139. Musemić Raifa: Prispevek k razvoju matematičnega modela penetrativne turbulentne dvojne difuzije v nestabilno stratificiranem fluidu, 1996
140. Nemanič Vincenc: Vakuumska ploskovna izolacija, 1996
141. Babnik Aleš: Nove vrste odbojnostnih senzorjev z optičnimi vlakni, 1997
142. Butala Vincenc: Zgorevanje premoga v kosih, 1997
143. Lunar-Peček Bojana: Uporaba nevronske mreže za predikcijo potrošnje električne energije, 1997
144. Modic Jurij: Polje hitrosti in koncentracija škodljivih snovi v predorih, 1997
145. Pezdernik Jože: Raziskava vpliva translatorskih nihanj na tribološke lastnosti batnih drsniških ventilov, 1997
146. Zuljan Darjo: Toplotni pojavi pri laserskem rezanju avstenitnega nerjavnega jekla, 1997
147. Pogačnik Marjan: Vstopno izstopne razmere pri visokohitrostnem čelnem stružilnem frezanju, 1997
148. Goli Drago: Opredelitev energetske in higienske optimalnega zakona upravljanja s količino zraka v klimatizaciji, 1997
149. Balantič Zvone: Dinamični model pljuč z upoštevanjem mehanike dihanja in delovanja pljučne ventilacije, 1997
150. Medved Sašo: Prenos toplote in snovi v poševni planparalelni regi s sifonom, 1997
151. Šturm Roman: Integriteta površin pri laserskem pretaljevanju sive in nodularne litine, 1998

152. Nagode Marko: Predvidevanje porazdelitve verjetnosti obremenitvenih stanj, 1998
153. Jurejevčič Tomaž: Model toka moči v transmisijah z razvejišči in visco elementi, 1998
154. Žavbi Roman: Razvoj izdelka s povezavo funkcije in delovnih principov, 1998
155. Prek Matjaž: Znižanje šumnosti v hidravličnih mrežah, 1998
156. Kmecl Tomaž: Vpliv oblike difuzorja na delovne karakteristike radialnega kompresorja, 1998
157. Sekavčnik Mihael: Radialna turbina za manjše moči, 1998
158. Kalin Mitjan: Mehanizmi freting obrabe v kontaktu jekla in keramike iz silicijevega nitrida, 1998
159. Horvat Andrej: Poševno rezanje pločevine z Nd:YAG laserskim izvorom, 1998
160. Bervar Goran: Prispevek k sistemizaciji projektiranja krmilnikov na principih abstrakcije, 1999
161. Kušar Janez: Integrirani računalniško podprti model planiranja in vodenja proizvodnje, 1999
162. Dovč Marjan: Optodinamska deformacija kovinske plošče pri osvetlitvi z laserskim bliskom, 1999
163. Šali Samo: Algoritem optimizacije akustičnega odziva lesa, 1999
164. Tavčar Jože: Metode za klasifikacijo modelov pretoka informacij v konstrukcijsko-razvojni fazi, 1999
165. Gradišek Janez: Raziskave možnosti karakterizacije rezalnega procesa z metodami kaotične dinamike, 1999
166. Potočnik Primož: Uporaba nevronske mreže in genetskih algoritmov pri modeliranju in prediktivnem vodenju procesov, 1999
167. Lipej Andrej: Analiza toka v gonilnikih aksialnih vodnih turbin ter optimizacija hidravličnih oblik, 1999
168. Gjerkeš Henrik: Medsebojni vpliv nukleacijskih jeder pri vrenju tekočin v posodi, 1999
169. Stritih Uroš: Pospeševanje prenosa toplote pri spremembi agregatnega stanja, 1999
170. Žerovnik Pavle: Raziskava integritete površin z magnetnimi metodami, 2000
171. Okorn Ivan: Raziskava bočne nosilnosti zobnikov s progresivno ukrivljeno ubirnico, 2000
172. Koc Pino: Numerično reševanje časovno odvisnih inverznih problemov v mehaniki trdnin, 2000
173. Podgornik Bojan: Vpliv kemotermične priprave podlage na tribološke lastnosti trdih prevlek pri drsenju, 2000
174. Kisin Marija: Vpliv strukture materialov na energijske kvante in entropijo pri odrezovanju, 2000
175. Kožuh Mitja: Odkrivanje in vrednotenje latentnih pomanjkljivosti v kompleksnih tehnoloških sistemih, 1999
176. Besednjak Dean: Interakcija filma kondenzata in vlažnega zraka v križnem toku, 2000
177. Kosel Tadej: Slepno ločevanje neodvisnih virov akustične emisije, 2000
178. Pukl Boris: Obratovalna trdnost mehanskih zvez delov iz jekla in aluminijevih zlitin, 2000
179. Varga Željko: Prenos toplote v kotlih za centralno ogrevanje, 2000
180. Cerkenik Boštjan: Uporaba korenskega kriterija za dvig učinkovitosti sorpcijskih hladilnih naprav, 2001
181. Mencinger Jure: Numerična simulacija taljenja in strjevanja z uporabo samoprilagodljive računske mreže, 2001
182. Ciglaric Iztok: Modeliranje vozil in potnikov za analizo cestno prometnih nezgod, 2001
183. Pepelnjak Tomaž: Zapis tehnološkega okna pri globokem vleku krojenih prirezov s konvencionalnim pridrževanjem pločevine, 2001
184. Klemenc Jernej: Napovedovanje obremenitvenih stanj konstrukcij v eksploataciji, 2001
185. Mandelj Simon: Nelinearno statistično modeliranje stohastičnih polj, 2001
186. Mole Nikolaj: Računalniška simulacija procesa preoblikovanja kovin v testnem stanju, 2002
187. Jakšič Nikola: Identifikacija parametrov avtonomnih dinamičnih sistemov drugega reda, 2002
188. Rodman Oprešnik Samuel: Raziskave turbulentnih struktur radialnega vtoka olja v ozek vodoravni kanal, 2002
189. Simonovski Igor: Valčna analiza nelinearnih nestacionarnih nihanj elektromotorja, 2002
190. Lebar Andrej: Modeliranje obdelave z abrazivnim vodnim curkom, 2002
191. Bračun Drago: Meritev oblike teles na osnovi laserske triangulacije, 2002
192. Noč Razinger Mojca: Adaptivno krmiljenje rezalnega procesa, 2002
193. Kunc Robert: Malociklična nosilnost tečine

- ležaja z utrjeno kotalno površino, 2002
194. Kolšek Tomaž: Modeliranje specifičnih oblik v hidravličnih pretočnih elementih, 2002
 195. Strgar Simon: Optodinamski opis in novi načini laserskega označevanja, 2002
 196. Gantar Marjan: Tokovne razmere v stranskih prostorih rotorjev pri hidravličnih turbostrojih in njihov vpliv na aksialne obremenitve, 2002
 197. Cimerman Franc: Odzivnost dotikalnih temperaturnih zaznaval, 2002
 198. Knez Jure: Zanesljivost delovanja strojev na osnovi meritev vibracij, 2002
 199. Rus Primož: Paralelno reševanje fizikalno sklopljenih sistemov, 2002
 200. Prodan Ted: Vpliv hidrostaticnega tlaka in temperature na strižni modul časovno odvisnih materialov, 2002
 201. Furlan Martin: Karakterizacija magnetnega hrupa enosmernega elektromotorja, 2003
 202. Orbanić Petar: Napovedovanje zdržljivosti izdelkov v razvoju, 2003
 203. Nastran Miha: Prispevek k stabilizaciji procesa hladnega preoblikovanja žice, 2003
 204. Kitanovski Andrej: Dvofazni trdno-kapljevinski tok vode in ledu za transport hladilne energije, 2003
 205. Kutin Jože: Modeliranje in razvoj Coriolisovega merilnika, 2003
 206. Bremec Boštjan: Geometrijska optimizacija stabilnosti dvakrat povezane plošče v elasto-plastičnem območju, 2003
 207. Vovk Avšič Mira: Modeliranje subjekta v adaptivnem distribuiranem delovnem sistemu, 2003
 208. Trstenjak Marjan: Razvoj modela vzdrževanja na osnovi zanesljivosti obratovanja delovnih sredstev, 2003
 209. Šajn Viktor: Optimiranje oblike profila deformabilnega letalskega krila glede na aerodinamične sile, 2003
 210. Kuselj Boris: Razslojevanje in lokalno izbočenje večslojnih plošč, 2003
 211. Hlebanja Gorazd: Raziskava matematičnega modela za dimenzioniranje drsnih površin pri hladnem zajedanju, 2003
 212. Valentinčič Joško: Model izbire parametrov EDM procesa glede na velikost erodirane površine, 2003
 213. Žnidaršič Matjaž: Lasersko legiranje tankega površinskega sloja maloogljčnega jekla, 2003
 214. Markelj Franc: Matematično modeliranje toplotnih in strukturnih procesov pri TIG varjenju feritnega nerjavnega jekla, 2003
 215. Hočevvar Marko: Eksperimentalno modeliranje turbulentnega polja z vizualizacijo in nevronskimi mrežami, 2003
 216. Vezjak Anton: Vpliv režimov mazanja in topografije na nosilnost tesnilnih obročev drsnih tesnil, 2003
 217. Zupan Samo: Model nosilnosti vrtljive kotalne zveze v realnih obratovalnih pogojih, 2003
 218. Kostanjevec Andrej: Napovedovanje lastnosti tesnilnih materialov z neparametričnimi metodami, 2004
 219. Nardin Blaž: Model dinamične porazdelitve dela v povezanih orodjarnah, 2004
 220. Tomc Janko: Vloga površinske napetosti taline pri varjenju A-TIG in vpliv na trdnostne lastnosti zvarnega spoja, 2004
 221. Suban Marjan: Razvoj naprave in tehnologije varjenja s tremi žicami s skupnim virom varilnega toka, 2004
 222. Gantar Gašper: Povečanje stabilnosti in optimizacija postopkov globokega vleka, 2004
 223. Videnič Tomaž: Ovirana povračljivost v konstrukcijskih elementih iz materiala z oblikovnim spominom, 2004
 224. Katrašnik Tomaž: Numerično modeliranje prehodnih pojavov v tlačno polnjenem dizelskem motorju, 2004
 225. Jezeršek Matija: Laserski sistem za tridimenzionalno merjenje hitro spreminjajoče se oblike teles, 2004
 226. Podržaj Primož: Krmiljenje procesa električnega uporovnega varjenja, 2004

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru

1. Brešar France: Študij upogiba neskončne elastične plošče z ravnimi zarezi na eni premici, 1978
2. Oblak Maks: Trdnost in stabilnost nosilne konstrukcije tovornega vagona kbs, 1979
3. Hudina Marjan: Prenos toplote in padec tlaka na hrapavih površinah, 1980
4. Kumperščak Vitodrag: Posplošitev stevensonovega modela upogiba ravne homogene plošče z aplikacijami, 1981
5. Puhar Jože: Izračun in meritve krivih ploskev na primeru standardnih in posebnih valjastih polžev, 1981
6. Acquah Newton Isaac: Meritev spektralnih

- indeksov nekaterih aktivacijskih detektorjev, ki se uporabljajo pri nadzoru reaktorskih tlačnih posod, 1981
7. Žezlina Aleksander: Mehanika lupine tesnega hrama reaktorja, 1981
 8. Flašker Jože: Raziskava širjenja razpok v robnikih po metodi končnih elementov, 1982
 9. Lep Jože: Tretji robni problem upogiba zmerno debele plošče, 1982
 10. Polajnar Andrej: Poseben način oblikovanja optimalne ocene uvajanja numerično krmiljenih strojev v proizvodnjo, 1982
 11. Krobe Jurij: Optimizacija temperature in tlaka v toplovodnih cevni omrežjih, 1983
 12. Škerget Leopold: Robni elementi za nelinearne potencialne probleme in tok viskoznega fluida, 1984
 13. Marek Evgen: Meje energijske delovne obremenitve povprečnega človeka ob uporabi vnaprej določenih časov, 1984
 14. Dedović Slavica: Neustaljeno temperaturno polje v debelostenih tlačnih sodih za nuklearne, kemijske in petrokemijske reaktorje, 1985
 15. Stritar Andrej: Matematični model dvofaznega toka vode v sistemih jedrske elektrarne, 1986
 16. Čuš Franc: Vplivi različnih geometričnih oblik rezila na odrezovalne razmere pri čelnem frezanju, 1988
 17. Hong Ging Lou: Erozijska materialov, uporabnih za črpalke za glinico, 1988
 18. Trkov Andrej: Prispevek k reševanju dvogrupne enačbe ustaljene difuzije nevtronov v reaktorju s postopkom robnih elementov, 1989
 19. Gebert Krešimir: Analiza propustnosti prilagajajočih se sklopov vbrizgalnega sistema pri uporabi emulzij diesel goriva z alkoholi, 1990
 20. Šarler Božidar: Prispevek k reševanju nelinearne difuzijske enačbe neustaljenega osnosimetričnega toplotnega polja v deformabilni geometriji z metodo robnih elementov, 1990
 21. Butinar Branko: Analiza obnašanja mehanskega sistema pri spremembah nekaterih parametrov, 1991
 22. Kegl Marko: Optimalno projektiranje konstrukcij na osnovi nelinearnega modela, 1991
 23. Žagar Ivan: Robno območna integralska metoda za dinamiko tekočin lamirnega in turbulentnega toka, 1992
 24. Kegl Breda: Inverzna računsko pot za določitev konstruktivnih parametrov vbrizgalnega sistema dieselskega motorja, 1992
 25. Aberšek Boris: Analiza modela širjenja kratkih utrujenostnih razpok na zobeh zobnikov, 1993
 26. Goričanec Darko: Optimalna namestitve črpalk v različno oblikovane cevne mreže, 1993
 27. Rek Zlatko: Robno območna integralska metoda dinamike turbulentnega toka tekočin, 1994
 28. Hribernik Aleš: Modeliranje robnih pogojev dvonatočne turbine turbokompresorja vozilskega diesel motorja, 1994
 29. Predin Andrej: Prispevek k analizi sil na vodilni lopatici modelske reverzibilne črpa lne turbine v črpalnem obratovalnem režimu, 1994
 30. Pehan Stanislav: Širjenje razpoke v zobnem korenu valjastega zobnika na podlagi slike nošenja, 1994
 31. Hriberšek Matjaž: Iterativne metode v robnoobmočni integralski metodi za dinamiko tekočin, 1995
 32. Tržan Franc: Prispevek h konstrukciji in sistemizaciji z analizo natančnosti vpenjalnih naprav za prizmatične obdelovance, 1995
 33. Mikluš Ivo: Fizikalno matematični model posledic modifikacijskih posegov, ki vplivajo na začetno fazo dieselskega vbrizgavanja, 1995
 34. Glodež Srečko: Model utrujanja zobnih bokov z upoštevanjem parametrov lomne mehanike, 1996
 35. Dolšak Bojan: Prispevek k inteligentni izbiri mreže za analize po MKE, 1996
 36. Primec Čedomir: Elasto plastične analize lomne mehanike upogibnih preizkušancev s plitvo razpoko, 1996
 37. Ulbin Miran: Prispevek k raziskavi kontaktnih problemov na zobnikih z metodo končnih elementov, 1996
 38. Buchmeister Borut: Vodenje proizvodnje z dinamičnim oblikovanjem čakalne vrste po spremenljivih strategijah, 1996
 39. Samec Niko: Numerično modeliranje in simulacija kinetičnega zgorevanja vodika, 1996
 40. Ačko Bojan: Metoda za analizo merilne nezanesljivosti koordinatnih merilnih naprav, 1997
 41. Dinevski Dejan: Optimiranje oblike dinamično obremenjenih linijskih konstrukcij, 1997
 42. Pahole Ivo: Planiranje, vodenje in optimiranje inteligentnih fleksibilnih obdelovalnih sistemov z uporabo koncepta pretočne matrike, 1997
 43. Gubeljak Nenad: Vpliv razlike meje plastičnosti med osnovnim materialom in heterogenim

44. Praunseis Zdravko: Vpliv znižane trdnosti strjenega zvara z vključenimi heterogenimi področji na lomne lastnosti zvarnega spoja visokotrdnostnega jekla, 1998
45. Ulaga Samo: Razširjen algoritem za analizo kontaktnih problemov po metodi končnih elementov, 1998
46. Gašperšič Janez: Večkriterijsko optimiranje planetnih gonil z uporabo genetskih algoritmov, 1998
47. Drstvenšek Igor: Model tehnološke baze obdelovalnih operacij v postopkih optimiranja rezalnih pogojev z uporabo genetskih algoritmov, 1998
48. Fošnarič Samo: Vpliv ergonomskih obremenitev na opravljanje dela z vizualnimi prikazovalniki, 1998
49. Gubenšek Ivan: Analiza občutljivosti lineariziranih mehanskih sistemov, 1998
50. Brežočnik Miran: Modeliranje tehnoloških sistemov z uporabo genetskih metod, 1998
51. Vrečer Gorazd: Sistem strateškega odločanja distribucije orodij za pogoje fleksibilne proizvodnje, 1999
52. Avsec Jurij: Izračun termodinamičnih veličin stanja nekaterih inženirsko pomembnih vlaken, 1999
53. Kalpič Branko: Modeliranje entitet v projektno organiziranem podjetju, 1999
54. Kramer Branko: Določanje nestabilnih območij nelinearnih nihanj s periodičnim vzbujanjem, 1999
55. Lakota Miran: Prispevek k zgodnjemu odkrivanju razpok na enostopenjskih gonilih, 1999
56. Slokar Yness March: Optimiranje razbarvanja tekstilnih reaktivnih barvil s H₂O₂/UV, 2000
57. Lesnika Aleš: Optimiranje naključno vzbujanih nelinearnih dinamičnih sistemov, 2000
58. Muršec Bogomir: Integralni model izbire optimalnih rezalnih pogojev v računalniško podprtem sistemu upravljanja orodij, 2000
59. Pandža Krsto: Strateški proces akumulacije sposobnosti v proizvodnem podjetju, 2000
60. Požarnik Matej: Robno območna integralska metoda za numerično modeliranje lebdečih slojev, 2000
61. Fajdiga Gorazd: Prispevek k širjenju utrujenostne razpoke na bokih zob zobnikov pri upoštevanju EHD obremenitve, 2001
62. Harl Boštjan: Minimizacija sklepnih sil kinematičnih verig, 2001
63. Šraml Matjaž: Modeliranje kontaktnega utrujanja strojnih delov, 2001
64. Kramberger Janez: Širjenje razpok v zobnikih s tankim vencem, 2001
65. Rojs Tomaž: Oblikovanje simulacijskega modela za optimiranje in nadzorovanje proizvodnih procesov, 2001
66. Jošt Dragica: Numerični izračun školjčnega diagrama izkoristka francisove turbine, 2001
67. Rudolf Rebeka: Notranja oksidacija diskontinuiranih kompozitov iz sistema Cu-C, 2002
68. Lojen Gorazd: Sinteza tiksotropnih mešanic, 2002
69. Leber Marjan: Model dinamičnega osvajanja izdelkov, 2003
70. Gusel Leo: Modeliranje mehanskih lastnosti pri hladnem preoblikovanju materiala z metodo genetskega programiranja, 2003
71. Korošec Marjan: Optimiranje izdelave poljubnih prostorskih oblik z uporabo nevronske mreže, 2003
72. Hren Gorazd: Računalniški model povezovanja sistemov navidezne resničnosti in cax sistemov s pomočjo razširjene baze podatkov, 2003
73. Rojko Danilo: Izoblikovanje mikrostruktur večvarkovnega zvara s stališča termičnega vpliva varjenja, 2003
74. Pučko Bogdan: Učinki podresonančnega vibriranja med varjenjem na žilavost zvarov, 2003
75. Milfelner Matjaž: Spremljanje in optimiranje procesa frezanja z oblikovnim krogelnim frezalom z uporabo genetskih algoritmov, 2003
76. Delić Marjan: Numerično modeliranje tokov pastastih snovi, 2003
77. Kastrevc Mitja: Analiza dinamike pogonske zveze asinhronskega elektromotorja in hidravlične zobniške črpalke, 2003
78. Novak Marina: Inteligentni računalniški sistem za pomoč pri optimiranju konstrukcij, 2004
79. Zafošnik Boštjan: Energijski model napovedovanja širjenja površinske razpoke na zobnih bokih, 2004
80. Ficko Mirko: Inteligentni sistem za napovedovanje tehnoloških značilnosti izdelave orodij, 2004
81. Miha Kovačič: Programiranje numerično krmiljenih strojev z uporabo evolucijskih metod, 2004

82. Vujica Herzog Nataša: Razvoj sistema kazalnikov za vrednotenje prenove proizvodnih procesov, 2004
83. Uroš Župerl: Dinamično optimiranje rezalnih pogojev med postopkom frezanja z uporabo hibridnih nevronske-evolucijskih tehnik, 2004
84. Matjaž Ramšak: Večobmočna metoda robnih elementov za dvoenačbne turbulentne modele, 2004

Nostrifikacije doktorskih disertacij

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani

1. Pelan Staš, Tehniška visoka šola v Stuttgartu, ZR Nemčija, 1965
2. Peklenik Janez, Rensko-Vestfalska tehniška visoka šola v Aachnu, ZR Nemčija, 1967
3. Schweiger Franc, Univerza v Glasgowu, Velika Britanija, 1971
4. Jezernik Anton, Univerza v Londonu, Velika Britanija, 1972
5. Voj Peter, Tehniška univerza v Berlinu, ZR Nemčija, 1972
6. Alujevič Andro, Univerza v Londonu, Velika Britanija, 1973
7. Prosenc Viktor, Tehniška univerza v Hannovru, ZR Nemčija, 1975
8. Gologranc Franc, Univerza v Stuttgartu, ZR Nemčija, 1976
9. Štoviček Svatopluk, Tehniška univerza v Berlinu, ZR Nemčija, 1978
10. Tuma Matija, Zvezna tehniška visoka šola v Zürichu, Švica, 1979
11. Florjančič Dušan, Zvezna tehnična visoka šola v Zürichu, Švica, 1992
12. Zavadlav Emil, Univerza v Cornellu, Ithaca,

New York, ZDA, 1994

13. Godler Ivan, Univerza Kyushu, Japonska, 1996
14. Herakovič Niko, Rensko-Vestfalska tehniška visoka šola v Aachnu, Nemčija, 1996
15. Soković Mirko, Šlezijaska politehnika v Gliwicu, Poljska, 1998
16. Leskovšek Vojteh, Univerza v Zagrebu, Hrvaška, 1999
17. Perme Tomaž, Tehniška univerza na Dunaju, Avstrija, 2000
18. Novak Matej, Univerza v Hertfordshiru, Velika Britanija, 2002
19. Anatoli Nikonov, Saratovska državna univerza "N.G. Černiševski", Rusija, 2004

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru

1. Šostar Adolf, Tehniška visoka šola, Gradec, Avstrija, 1979
2. Potrč Iztok, Univerza Friedrich Alexander Erlangen-Nürnberg, ZR Nemčija, 1987
3. Marn Jure, Univerza v Kaliforniji, Los Angeles, ZDA, 1993
4. Ren Zoran, Univerza v Walesu, Velika Britanija, 1994
5. Kovač Igor, Tehniška univerza v Gradcu, Avstrija, 1994
6. Gotlih Karl, Tehniška univerza Dunaj, Avstrija, 1996
7. Detiček Edvard, Tehniška univerza v Gradcu, Avstrija, 1998
8. Šauperl Igor, Tehniška univerza v Gradcu, Avstrija, 1998
9. Lovrec Darko, Tehniška univerza v Gradcu, Avstrija, 2001
10. Bezenšek Boštjan, Univerza v Glasgowu, Velika Britanija, 2004

Navodila avtorjem - Instructions for Authors

Članki morajo vsebovati:

- naslov, povzetek, besedilo članka in podnaslove slik v slovenskem in angleškem jeziku,
- dvojezične preglednice in slike (diagrami, risbe ali fotografije),
- seznam literature in
- podatke o avtorjih.

Strojniški vestnik izhaja od leta 1992 v dveh jezikih, tj. v slovenščini in angleščini, zato je obvezen prevod v angleščino. Obe besedili morata biti strokovno in jezikovno med seboj usklajeni. Članki naj bodo kratki in naj obsegajo približno 8 strani. Izjemoma so strokovni članki, na željo avtorja, lahko tudi samo v slovenščini, vsebovati pa morajo angleški povzetek.

Za članke iz tujine (v primeru, da so vsi avtorji tujci) morajo prevod v slovenščino priskrbeti avtorji. Prevajanje lahko proti plačilu organizira uredništvo. Če je članek ocenjen kot znanstveni, je lahko objavljen tudi samo v angleščini s slovenskim povzetkom, ki ga pripravi uredništvo.

VSEBINA ČLANKA

Članek naj bo napisan v naslednji obliki:

- Naslov, ki primerno opisuje vsebino članka.
- Povzetek, ki naj bo skrajšana oblika članka in naj ne presega 250 besed. Povzetek mora vsebovati osnove, jedro in cilje raziskave, uporabljeno metodologijo dela, povzetek rezultatov in osnovne sklepe.
- Uvod, v katerem naj bo pregled novejšega stanja in zadostne informacije za razumevanje ter pregled rezultatov dela, predstavljenih v članku.
- Teorija.
- Eksperimentalni del, ki naj vsebuje podatke o postavitvi preskusa in metode, uporabljene pri pridobitvi rezultatov.
- Rezultati, ki naj bodo jasno prikazani, po potrebi v obliki slik in preglednic.
- Razprava, v kateri naj bodo prikazane povezave in posplošitve, uporabljene za pridobitev rezultatov. Prikazana naj bo tudi pomembnost rezultatov in primerjava s poprej objavljenimi deli. (Zaradi narave posameznih raziskav so lahko rezultati in razprava, za jasnost in preprostejšo bralčevo razumevanje, združeni v eno poglavje.)
- Sklepi, v katerih naj bo prikazan en ali več sklepov, ki izhajajo iz rezultatov in razprave.
- Literatura, ki mora biti v besedilu oštevilčena zaporedno in označena z oglatimi oklepaji [1] ter na koncu članka zbrana v seznamu literature. Vse opombe naj bodo označene z uporabo dvignjene številke¹.

OBLIKA ČLANKA

Besedilo članka naj bo pripravljeno v urejevalniku Microsoft Word. Članek nam dostavite v elektronski obliki.

Ne uporabljajte urejevalnika LaTeX, saj program, s katerim pripravljamo Strojniški vestnik, ne uporablja njegovega formata.

Enačbe naj bodo v besedilu postavljene v ločene vrstice in na desnem robu označene s tekočo številko v okroglih oklepajih

Papers submitted for publication should comprise:

- Title, Abstract, Main Body of Text and Figure Captions in Slovene and English,
- Bilingual Tables and Figures (graphs, drawings or photographs),
- List of references and
- Information about the authors.

Since 1992, the Journal of Mechanical Engineering has been published bilingually, in Slovenian and English. The two texts must be compatible both in terms of technical content and language. Papers should be as short as possible and should on average comprise 8 pages. In exceptional cases, at the request of the authors, speciality papers may be written only in Slovene, but must include an English abstract.

For papers from abroad (in case that none of authors is Slovene) authors should provide Slovenian translation. Translation could be organised by editorial, but the authors have to pay for it. If the paper is reviewed as scientific, it can be published only in English language with Slovenian abstract, that is prepared by the editorial board.

THE FORMAT OF THE PAPER

The paper should be written in the following format:

- A Title, which adequately describes the content of the paper.
- An Abstract, which should be viewed as a mini version of the paper and should not exceed 250 words. The Abstract should state the principal objectives and the scope of the investigation, the methodology employed, summarize the results and state the principal conclusions.
- An Introduction, which should provide a review of recent literature and sufficient background information to allow the results of the paper to be understood and evaluated.
- A Theory
- An Experimental section, which should provide details of the experimental set-up and the methods used for obtaining the results.
- A Results section, which should clearly and concisely present the data using figures and tables where appropriate.
- A Discussion section, which should describe the relationships and generalisations shown by the results and discuss the significance of the results making comparisons with previously published work. (Because of the nature of some studies it may be appropriate to combine the Results and Discussion sections into a single section to improve the clarity and make it easier for the reader.)
- Conclusions, which should present one or more conclusions that have been drawn from the results and subsequent discussion.
- References, which must be numbered consecutively in the text using square brackets [1] and collected together in a reference list at the end of the paper. Any footnotes should be indicated by the use of a superscript¹.

THE LAYOUT OF THE TEXT

Texts should be written in Microsoft Word format. Paper must be submitted in electronic version.

Do not use a LaTeX text editor, since this is not compatible with the publishing procedure of the Journal of Mechanical Engineering.

Equations should be on a separate line in the main body of the text and marked on the right-hand side of the page with numbers in round brackets.

Enote in okrajšave

V besedilu, preglednicah in slikah uporabljajte le standardne označbe in okrajšave SI. Simbole fizikalnih veličin v besedilu pišite poševno (kurzivno), (npr. v , T , n itn.). Simbole enot, ki sestojijo iz črk, pa pokončno (npr. ms^{-1} , K, min, mm itn.).

Vse okrajšave naj bodo, ko se prvič pojavijo, napisane v celoti v **slovenskem jeziku**, npr. časovno spremenljiva geometrija (ČSG).

Slike

Slike morajo biti zaporedno oštevilčene in označene, v besedilu in podnaslovu, kot sl. 1, sl. 2 itn. Posnete naj bodo v ločljivosti, primerni za tisk, v kateremkoli od razširjenih formatov, npr. BMP, JPG, GIF. Diagrami in risbe morajo biti pripravljeni v vektorskem formatu.

Pri označevanju osi v diagramih, kadar je le mogoče, uporabite označbe veličin (npr. t , v , m itn.), da ni potrebno dvojezično označevanje. V diagramih z več krivuljami, mora biti vsaka krivulja označena. Pomen oznake mora biti pojasnjen v podnapisu slike.

Vse označbe na slikah morajo biti dvojezični.

Preglednice

Preglednice morajo biti zaporedno oštevilčene in označene, v besedilu in podnaslovu, kot preglednica 1, preglednica 2 itn. V preglednicah ne uporabljajte izpisanih imen veličin, ampak samo ustrezne simbole, da se izognemo dvojezični podvojitvi imen. K fizikalnim veličinam, npr. t (pisano poševno), pripišite enote (pisano pokončno) v novo vrsto brez oklepajev.

Vsi podnaslovi preglednic morajo biti dvojezični.

Seznam literature

Vsa literatura mora biti navedena v seznamu na koncu članka v prikazani obliki po vrsti za revije, zbornike in knjige:

- [1] Tarng, Y.S., Y.S. Wang (1994) A new adaptive controller for constant turning force. *Int J Adv Manuf Technol* 9(1994) London, pp. 211-216.
- [2] Čuš, F., J. Balič (1996) Rationale Gestaltung der organisatorischen Abläufe im Werkzeugwesen. *Proceedings of International Conference on Computer Integration Manufacturing*, Zakopane, 14.-17. maj 1996.
- [3] Oertli, P.C. (1977) Praktische Wirtschaftskybernetik. *Carl Hanser Verlag*, München.

Podatki o avtorjih

Članku priložite tudi podatke o avtorjih: imena, nazive, popolne poštna naslove in naslove elektronske pošte.

SPREJEM ČLANKOV IN AVTORSKE PRAVICE

Uredništvo Strojniškega vestnika si pridržuje pravico do odločanja o sprejemu članka za objavo, strokovno oceno recenzentov in morebitnem predlogu za krajšanje ali izpopolnitev ter terminološke in jezikovne korekture.

Avtor mora predložiti pisno izjavo, da je besedilo njegovo izvirno delo in ni bilo v dani obliki še nikjer objavljeno. Z objavo preidejo avtorske pravice na Strojniški vestnik. Pri morebitnih kasnejših objavah mora biti SV naveden kot vir.

Units and abbreviations

Only standard SI symbols and abbreviations should be used in the text, tables and figures. Symbols for physical quantities in the text should be written in italics (e.g. v , T , n , etc.). Symbols for units that consist of letters should be in plain text (e.g. ms^{-1} , K, min, mm, etc.).

All abbreviations should be spelt out in full on first appearance, e.g., variable time geometry (VTG).

Figures

Figures must be cited in consecutive numerical order in the text and referred to in both the text and the caption as Fig. 1, Fig. 2, etc. Pictures may be saved in resolution good enough for printing in any common format, e.g. BMP, GIF, JPG. However, graphs and line drawings should be prepared as vector images.

When labelling axes, physical quantities, e.g. t , v , m , etc. should be used whenever possible to minimise the need to label the axes in two languages. Multi-curve graphs should have individual curves marked with a symbol, the meaning of the symbol should be explained in the figure caption.

All figure captions must be bilingual.

Tables

Tables must be cited in consecutive numerical order in the text and referred to in both the text and the caption as Table 1, Table 2, etc. The use of names for quantities in tables should be avoided if possible: corresponding symbols are preferred to minimise the need to use both Slovenian and English names. In addition to the physical quantity, e.g. t (in italics), units (normal text), should be added in new line without brackets.

All table captions must be bilingual.

The list of references

References should be collected at the end of the paper in the following styles for journals, proceedings and books, respectively:

- [1] Tarng, Y.S., Y.S. Wang (1994) A new adaptive controller for constant turning force. *Int J Adv Manuf Technol* 9(1994) London, pp. 211-216.
- [2] Čuš, F., J. Balič (1996) Rationale Gestaltung der organisatorischen Abläufe im Werkzeugwesen. *Proceedings of International Conference on Computer Integration Manufacturing*, Zakopane, 14.-17. maj 1996.
- [3] Oertli, P.C. (1977) Praktische Wirtschaftskybernetik. *Carl Hanser Verlag*, München.

Author information

The information about the authors should be enclosed with the paper: names, complete postal and e-mail addresses.

ACCEPTANCE OF PAPERS AND COPYRIGHT

The Editorial Committee of the Journal of Mechanical Engineering reserves the right to decide whether a paper is acceptable for publication, obtain professional reviews for submitted papers, and if necessary, require changes to the content, length or language.

Authors must also enclose a written statement that the paper is original unpublished work, and not under consideration for publication elsewhere. On publication, copyright for the paper shall pass to the Journal of Mechanical Engineering. The JME must be stated as a source in all later publications.