

1. Robno območna integralska metoda za numerično modeliranje lebdečih slojev
Boundary Domain Integral Method for Numerical Modeling of Fluidized Beds
2. Model za analizo in optimiranje vpenjalnih priprav
A Model for Analysing and Optimizing Fixtures
3. Meritev gibanja kolena z industrijskim robotom - avtomatska kompenzacija gravitacije prijemala
Measuring knee movement using an industrial robot gravity compensation for the automatic gripper
4. Realni pretočni časi operacij in uspešnost sistema NKP
Realistic Lead Times of Operations and Efficiency of the PPC System



Vsebina

Contents

Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering
letnik - volume 48, (2002), številka - number 2

Razprave

- Požarnik, M., Škerget, L.: Robno območna
integralna metoda za numerično modeliranje
lebdečih slojev 58
- Župerl, U., Čuš, F.: Model za analizo in optimiranje
vpenjalnih priprav 73
- Omrčen, D., Nemec, B.: Meritev gibanja kolena z
industrijskim robotom - avtomatska
kompensacija gravitacije prijemala 87
- Starbek, M., Grum, J., Kušar, J.: Realni pretočni časi
operacij in uspešnost sistema NKP 98

Strokovna literatura

Osebne vesti

Navodila avtorjem

Papers

- Požarnik, M., Škerget, L.: Boundary Domain Integral
Method for Numerical Modeling of Fluidized
Beds
- Župerl, U., Čuš, F.: A Model for Analysing and
Optimizing Fixtures
- Omrčen, D., Nemec, B.: Measuring knee movement
using an industrial robot – gravity
compensation for the automatic gripper
- Starbek, M., Grum, J., Kušar, J.: Realistic Lead Times
of Operations and Efficiency of the PPC System

112 Professional Literature

116 Personal Events

117 Instructions for Authors

Robno območna integralska metoda za numerično modeliranje lebdečih slojev

Boundary Domain Integral Method for Numerical Modeling of Fluidized Beds

Matej Požarnik - Leopold Škerget

V prispevku je prikazano numerično reševanje dinamike dvofaznih dvosestavinskih tokov z robno območno integralsko metodo. Model opisa gibanja sestavin temelji na modelu dveh tekočin s hitrostno-vrtično formulacijo dopoljenih Navier-Stokesovih enačb. Poseben poudarek je namenjen členu medfazne izmenjave gibalne količine. Kot testna primera sta prikazana enofazni tok v kanalu z nenadno simetrično razširitvijo in dvofazni dvosestavinski tok v navpičnem kanalu.

© 2002 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: tok dvofazni, modeliranje numerično, metode robno-območne, metode integralske, enačbe Navier-Stokes)

The paper deals with the numerical modeling of two-phase two-component flows using the boundary domain integral method. The two-fluid model with the velocity-vorticity formulation of modified Navier-Stokes equations is adopted. Particular attention is given to the interphase momentum exchange term. As test cases a single-phase symmetric sudden expansion flow and two-phase two-component vertical channel flow are investigated.

© 2002 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: two phase flow, numerical modeling, boundary domain integral methods, Navier-Stokes equations)

0 UVOD

Lebdeči sloj sestavljata navzgor gibajoča se tekočina, ponavadi plin in na nosilno ploščo nasut sloj polnil. Kljub temu, da se trdni delci, ko hitrost plina preseže najmanjšo hitrost lebdenja, večino časa še vedno dotikajo, se mešanica plina in trdnih delcev obnaša kot tekočina. Tlak v zmesi se povečuje linearno z razdaljo pod površino, težji delci tonejo, lažji se dvigujejo, opaziti je mogoče gibanje v obliki valov. Trdne delce, ki jih imenujemo polnila, lahko stalno dodajamo ali odvezujemo. Vsa drobna polnila imajo izredno veliko specifično površino; 1 m³ delcev premera 10⁻⁴ m ima površino 30 000 m². Zelo pomembno je nemirno delovanje plinskih mehurčkov, ki skrbi za popolno mešanje polnil. Posledica sta veliki toplotni in snovski prestopnosti med površino in lebdečim slojem ter med plinom in polnili, ki povzročita, da je temperaturno in koncentracijsko polje homogeno tako v prečni kakor tudi vzdolžni smeri. Če primerjamo lebdeči sloj z nasutim slojem enakih polnil pri enaki višini sloja in hitrosti plina ugotovimo, da je tlačni padec v lebdečem sloju veliko manjši. Zaradi vsega naštetega so lebdeči sloji oziroma dvofazni dvosestavinski tokovi plin-trdni delci zelo privlačno procesno orodje.

0 INTRODUCTION

A fluidized bed is formed by passing a fluid, usually a gas, upwards through a bed of particles that are supported on a distributor. Even though above the minimum fluidization velocity the particles are touching each other most of the time the interparticle friction is so small that the fluid/solid assembly behaves like a fluid. The pressure increases linearly with the distance below the surface: denser objects sink, lighter ones float, and a wave motion is observed. Solids can be removed from or added to the bed continuously, and this provides many processing advantages. All fine powders have a very large specific surface area — 1 m³ of 10⁻⁴ m particles has a surface area of about 30000 m² — but in a fluidized bed the stirring action of the gas bubbles continuously moves the powder around, shearing it and exposing it to the gas. This excellent solids mixing gives the high rates of heat transfer from the surface to the bed and from the gas to particles resulting in isothermal conditions: both radially and axially. Compared with a fixed bed of the same powder operated at the same bed depth and gas velocity, the pressure drop over a fluidized bed is much smaller, and this together with most of the other characteristics make the fluidized bed an attractive choice as a chemical or physical processing tool.

Računalniška dinamika tekočin (RDT) postaja vse pomembnejše orodje za določevanje tokov v različnih vrstah industrijskih naprav. Kljub temu, da so programski paketi za modeliranje enofaznih tokov široko dosegljivi, modeliranje večfaznih sistemov še vedno pomeni veliko težavo, tako s fizikalnega kakor z numeričnega vidika. Avtorjema znani numerični algoritmi za modeliranje dvofaznih dvosestavinskih tokov brez izjeme temeljijo na postopkih končnih razlik, končnih elementov oziroma kontrolnih prostornin.

V prispevku podajamo razvoj alternativne numerične sheme na podlagi robno območne integralske metode (ROIM) za reševanje splošnega primera gibanja dvofaznega dvosestavinskega sistema. Prispevek predstavlja prvi primer uporabe tako ROIM kakor tudi hitrostno-vrtinčne formulacije za modeliranje dvofaznih tokov. Kot podlago za izpeljavo dopoljenih sistemov Navier-Stokesovih enačb smo uporabili v literaturi dobro znan model dveh tekočin (MDT). Prednost hitrostno-vrtinčne formulacije omenjenega matematičnega modela fizikalnih zakonov ohranitve mase in gibalne količine je, ob določenih dodatnih predpostavkah, numerična ločitev kinematike in kinetike toka obeh sestavin od računanja termodinamičnega tlaka in navideznega tlaka trdne snovi. Pomembna za oblikovanje hitrostnih in vrtinčnih polj sestavin je izmenjava gibalne količine med sestavinama, ki jo opišemo s koeficientom medfazne izmenjave gibalne količine.

1 DVOFAZNI DVOSESTAVINSKI MODEL

Število delcev v lebdečem sloju realne velikosti je kljub naraščajočim računalniškim zmogljivostim preveliko, da bi z Lagrangeovo metodo modelirali gibanje vsakega delca posebej. Tak postopek omogoči študij mikroskopskih lastnosti lebdečega sloja. V prispevku prikazana shema temelji na modelu dveh tekočin, dopoljenim s teorijo gnanega toka dvofaznih tokov. V MDT obe sestavini obravnavamo kot zvezni in medsebojno popolnoma pronicajoči. Model dveh tekočin sta prva predstavila Anderson in Jackson [1].

1.1 Zapis za osnovne spremenljivke

Kontinuitetno enačbo za sestavino p (f za plin in s za trdno snov) zapišemo kot:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho_p) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon_p \rho_p v_{pj}) = 0 \quad \text{in/and} \quad \sum_{p=f,s} \varepsilon_p = 1 \quad (1).$$

Izmenjava snovi med sestavinama, npr. zaradi kemijske reakcije ali zgorevanja, ni zajeta.

Gibalna enačba plinaste sestavine je podana kot dopolnjena Navier-Stokesova enačba, ki vsebuje člen medfazne izmenjave gibalne količine:

$$\frac{Dv_{fi}}{Dt} = \frac{1}{\rho_f \varepsilon_f} \frac{\partial S_{fij}}{\partial x_j} + g_i - \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\beta}{\rho_f \varepsilon_f} (v_{fi} - v_{si}) \quad (2).$$

Computational fluid dynamics (CFD) is becoming an increasingly common engineering tool to predict flows in various types of apparatus on an industrial scale. Although the tools for applying single-phase CFD are widely available, the application of multiphase CFD is still complicated from both the physical and the numerical points of view. All the numerical algorithms known to the authors that were developed so far to simulate two-phase two-component flows are strictly based on the finite-difference method, the finite-element method or the control-volume method.

In this paper an alternative numerical scheme based on the boundary domain integral method (BDIM) is presented for the solution of a general two-phase two-component flow motion problem. This is definitely the first attempt to implement the BDIM and velocity-vorticity formulation for modeling two-phase flows. The two-fluid model (TFM) is used to derive two sets of modified Navier-Stokes equations. The velocity-vorticity formulation of the physical conservation laws of mass and momentum then follows. The advantages of this approach lie with the numerical separation of kinematic and kinetic aspects of both phases motion from the thermodynamic pressure and the solid's pressure computation. Particular attention is given to the drag between the phases, which is described by the interphase momentum exchange coefficient.

1 TWO-PHASE TWO-COMPONENT MODEL

In spite of increasing computational power the number of particles in a gas-solid flow in large scale equipment is still much too large to handle each particle separately. Simulating each particle separately is called a Lagrangian method, which can be used to study the microscopic properties of fluidized beds. The CFD model used in this work is based on a TFM that is extended with the drift-flux theory of a two-phase flow. In a TFM both phases are considered to be continuous and fully interpenetrating. The TFM was first proposed by Anderson and Jackson [1].

1.1 Primitive variables formulation

The continuity equation or mass balance for phase p (f for gas and s for solid) reads:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho_p) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon_p \rho_p v_{pj}) = 0 \quad \text{in/and} \quad \sum_{p=f,s} \varepsilon_p = 1 \quad (1).$$

Mass exchange between the phases, e.g. due to reaction or combustion, is not considered.

The momentum balance for the gas phase is given by the Navier-Stokes equation, which is modified to include an interphase momentum transfer term:

$$\frac{Dv_{fi}}{Dt} = \frac{1}{\rho_f \varepsilon_f} \frac{\partial S_{fij}}{\partial x_j} + g_i - \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\beta}{\rho_f \varepsilon_f} (v_{fi} - v_{si}) \quad (2).$$

Gibalna enačba trdne snovi je podana z:

$$\frac{Dv_{si}}{Dt} = \frac{1}{\rho_s \varepsilon_s} \frac{\partial S_{sij}}{\partial x_j} + g_i - \frac{1}{\rho_s \varepsilon_s} \frac{\partial p_s^*}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\beta}{\rho_s \varepsilon_s} (v_{fi} - v_{si}) \quad (3),$$

kjer je p_s^* navidezni tlak trdne snovi, ki je določen z uporabo kinetične teorije zrnatega toka. V tenzorju strižnih napetosti moramo v splošnem upoštevati tako strižno kakor tudi normalno viskoznost [2].

Z $\varepsilon_f = 1$ in $\beta = 0$ postane enačba (2) običajna Navier–Stokesova enačba. Kontinuitetni in gibalni enačbi sta podrobno predstavljeni v [3].

1.2 Hitrostno-vrtinčna formulacija

Za uporabo v predlagani shemi na podlagi ROIM originalna sistema dopoljenih Navier-Stokesovih enačb nadalje preoblikujemo z uporabo hitrostno-vrtinčne formulacije. Na tak način računsko shemo gibanja plina in trdne snovi razdelimo na kinematični in kinetični vidik. V primeru uporabe hitrostno-vrtinčne formulacije za modeliranje enofaznih tokov iz numerične sheme izločimo računanje tlaka. Postopek vodi v primerjavi z običajnim k preprostejšemu predpisovanju robnih pogojev predvsem na tistih robovih območja, kjer tlak ni znan. Izpeljani algoritem na podlagi hitrostno-vrtinčne formulacije je kljub vsemu še vedno mogoče zapisati popolnoma splošno za modeliranje dvo-in tridimenzionalnih tokov.

Računsko shemo gibanja obeh sestavin razdelimo na kinematični in kinetični vidik z vpeljavo vektorjev vrtinčnosti ω_{pi} , ki predstavljata rotorja hitrostnih polj. Z uporabo operatorja rotor neposredno na definiciji vrtinčnosti in upoštevanjem preoblikovane kontinuitetne enačbe (1) z $\varepsilon_p = \text{konst.}$:

$$\frac{\partial v_{pj}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\varepsilon_p} \left(\frac{\partial \varepsilon_p}{\partial t} + v_{pj} \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

izpeljemo kinematiko gibanja plinaste in trdne snovi:

$$\frac{\partial v_{pi}}{\partial x_j \partial x_j} + e_{ijk} \frac{\partial \omega_{pk}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[-\frac{1}{\varepsilon_p} \left(\frac{\partial \varepsilon_p}{\partial t} + v_{pj} \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial x_j} \right) \right] \quad (5).$$

Enačba (5) podaja kinematiko gibanja nestisljive tekočine in trdnih delcev oziroma združljivost hitrostnih in vrtinčnih polj v dani točki prostora in časa.

Kinetiko podamo s prenosnima enačbama vrtinčnosti, ki pomenita rotor gibalnih enačb (2) in (3). V primeru majhnih prostorninskih deležev trdnih delcev v toku lebdečega sloja uporabimo postopek Chapmana in Cowlinga [4] z nespremenljivima strižno in normalno viskoznostjo. Prenosni enačbi vrtinčnosti zapišemo kot:

$$\begin{aligned} \frac{D\omega_{fi}}{Dt} = & \nu_{f-} \frac{\partial \omega_{fi}}{\partial x_j \partial x_j} - \omega_{fi} \frac{\partial v_{fj}}{\partial x_j} + \omega_{fj} \frac{\partial v_{fi}}{\partial x_j} - \frac{\beta}{\rho_f \varepsilon_f} (\omega_{fi} - \omega_{si}) - \frac{\nu_{f-}}{\varepsilon_f} \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial x_j} \left(e_{ijk} e_{ktm} \frac{\partial \omega_{ft}}{\partial x_m} \right) + \\ & + \frac{4}{3} \frac{1}{\varepsilon_f} \nu_{f-} e_{ijk} \frac{\partial v_{fi}}{\partial x_j \partial x_j} \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial x_k} - \frac{\beta}{\rho_f \varepsilon_f} e_{ijk} (v_{fj} - v_{sj}) \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (6),$$

The solid-phase momentum balance is given by:

where p_s^* is the solids pressure, originally obtained from the kinetic theory of the granular flow. Both the shear and bulk viscosities should be used in a viscous strain-rate tensor, in general [2].

With $\varepsilon_f = 1$ and $\beta = 0$ Eqn. (2) becomes the classical Navier-Stokes equation. The mass and momentum balances are discussed in detail in [3].

1.2 Velocity-vorticity variables formulation

In BDIM the original sets of Navier-Stokes equations for the gas phase and the solid particles are further transformed with the use of the velocity-vorticity variables formulation. Within this approach the flow field computation is decoupled into flow kinematics and flow kinetics. The main advantages of this scheme in the case of single-phase flow lie with the numerical separation of the kinematic and kinetic aspects of the flow from the pressure computation. This leads to a simpler way of enforcing the proper boundary conditions than the primitive variables approach whenever the pressure is not specified on the boundary as a known quantity. The developed algorithm can still be written in a general form for both two and three dimensions.

With the vorticity vector ω_{pi} , representing the curl of the velocity field, the two phases motion computation scheme is partitioned into its kinematic and kinetic aspects. By taking the curl operator directly to the vorticity vector definition, and applying the reformed continuity Eqn. (1) with $\varepsilon_p = \text{const.}$:

the kinematics of both phases motion is carried out:

Eqn. (5) represents the kinematics of an incompressible fluid and solid-phase motion or the compatibility of the velocity and vorticity fields at a given point in space and time.

The kinetics are governed by the vorticity transport equations obtained as a curl of the momentum balances, Eqns. (2) and (3). In the case of low solid concentrations the approach of Chapman and Cowling [4] with constant viscosities is applied. The vorticity transport equations can be written in the following form:

$$\begin{aligned} \frac{D\omega_{si}}{D\tau} = & \nu_{s-} \frac{\partial^2 \omega_{si}}{\partial x_j \partial x_j} - \omega_{si} \frac{\partial v_{sj}}{\partial x_j} + \omega_{sj} \frac{\partial v_{si}}{\partial x_j} + \frac{\beta}{\varrho_s \varepsilon_s} (\omega_{fi} - \omega_{si}) - \frac{\nu_{s-}}{\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x_j} \left(e_{ijk} e_{klm} \frac{\partial \omega_{sl}}{\partial x_m} \right) + \\ & + \frac{1}{\varepsilon_s} \left(\frac{4}{3} \nu_{s-} + r_{s-} \right) e_{ijk} \frac{\partial v_{sl}}{\partial x_j \partial x_j} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x_k} - \frac{1}{\varrho_s \varepsilon_s} e_{ijk} \frac{\partial p_s^*}{\partial x_j} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x_k} + \frac{\beta}{\varrho_s \varepsilon_s} e_{ijk} (v_{fj} - v_{sj}) \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (7),$$

ki podajata porazdelitev vektorjev vrtničnosti plinaste sestavine in trdne snovi. Z opisanim postopkom iz izračuna izločimo termodinamični tlak p , vendar enačba (7) še vedno vsebuje gradient navideznega tlaka trdne snovi p_s^* . Zaradi tega predlagana shema temelji na tehniki podobmočij v njeni skrajni izvedenki, kar pomeni, da je vsaka celica podobmočje, imenovano makroelement, ki je omejeno s štirimi robnimi elementi. S predpostavljenim nespremenljivim prostorninskim deležem sestavine ε_p znotraj posamezne iteracije po vsakem izmed makroelementov zagotovimo, da gradient prostorninskega deleža po območju ne obstaja ($\partial \varepsilon_p / \partial x_j = 0$). Z upoštevanjem primernih vmesnih pogojev na mejah med makroelementi, ki so podrobneje predstavljeni v poglavju 1.4, enačbe (5), (6) in (7) zapišemo v poenostavljeni obliki.

Po predpostavki glede prostorninskega deleža ε_p kinematiko gibanja obeh sestavin zapišemo v obliki parabolčne enačbe z uporabljenim nepravim neustaljenim načinom:

$$\frac{\partial v_{pi}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial v_{pi}}{\partial \tau} + e_{ijk} \frac{\partial \omega_{pk}}{\partial x_j} = 0. \quad (8).$$

Transportni enačbi vrtničnosti, enačbi (6) in (7), prepišemo v naslednjo obliko:

$$\frac{D\omega_{fi}}{D\tau} = \nu_{f-} \frac{\partial^2 \omega_{fi}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\omega_{fi}}{\varepsilon_f} \frac{\partial \varepsilon_f}{\partial \tau} + \omega_{fj} \frac{\partial v_{fi}}{\partial x_j} - \frac{\beta}{\varrho_f \varepsilon_f} (\omega_{fi} - \omega_{si}) \quad (9),$$

$$\frac{D\omega_{si}}{D\tau} = \nu_{s-} \frac{\partial^2 \omega_{si}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\omega_{si}}{\varepsilon_s} \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial \tau} + \omega_{sj} \frac{\partial v_{si}}{\partial x_j} + \frac{\beta}{\varrho_s \varepsilon_s} (\omega_{fi} - \omega_{si}) \quad (10).$$

Enačbi (9) in (10) podajata v primeru tridimenzionalnih tokov časovno spremembo vrtničnosti delca plina oziroma trdne snovi, podano s Stokesovim odvodom na levi strani enačb, zaradi učinkov viskozne difuzije, nastajanja mehurjev, učinkov deformacije in medfazne izmenjave gibalne količine, podane s členi na desni strani enačb.

1.3 Prostorninski delež

Za sklenitev sistema kinematičnih in kinetičnih enačb gibanja sestavin dvofaznega dvosestavinskega toka potrebujemo dodatno enačbo za izračun prostorninskega deleža plinaste sestavine. Izpeljemo jo iz teorije gnanega toka dvofaznih tokov [9]. Teorija je izpeljana splošno in obsega različnost fizikalnih lastnosti in tokovnih polj dvofaznega toka. Omogoča zapis ločenih kontinuitetnih in gibalnih enačb za vsako sestavino posebej. Uporabna je za modeliranje različnih režimov dvofaznih tokov plin - kapljevina kakor tudi za modeliranje dvofaznih dvosestavinskih sistemov tekočina - trdni delci, npr.

describing the redistribution of the vorticity vector in the fluid and solid particles' flow field. While the thermodynamic pressure p is not part of the computation, Eqn. (7) is still dealing with the solids pressure p_s^* gradient. Therefore, the proposed numerical scheme is based on the subdomain technique in its limit version. Each internal cell represents one subdomain called a macroelement, which is bounded by four boundary elements. The macroelement volume fraction of a phase ε_p is assumed to be constant within a particular iteration of the numerical algorithm, therefore, in that moment the gradient $\partial \varepsilon_p / \partial x_j = 0$ does not exist all over the macroelement. Then the Eqns. (5), (6), and (7) can be rewritten in a simple manner, but a lot of the physics is moved to the macroelement interface boundary conditions explained in detail in section 1.4.

After the assumption regarding the volume fraction ε_p the kinematics of both phases motion is written in the sense of the parabolic equation where the false transient approach is implemented afterwards:

Using the same principle the kinetics given by Eqns. (6) and (7) is rewritten as:

Eqns. (9) and (10) show that the rate of change of the vorticity in the case of 3D flow as one follows a fluid or solid particle, given by the Stokes derivation on the left-hand side of the equations, is due to the viscous diffusion, bubble formation, vortex twisting and stretching, and interphase-momentum transfer, represented by the terms on the right-hand side.

1.3 Volume fraction

To close the system of kinematics and kinetics equations an additional equation to compute the volume fraction of the fluid phase is derived from the drift flux theory of the two-phase flow [9]. This model treats the general case of modelling each phase or component as a separate fluid with its own set of governing balance equations. In general, each phase has its own velocity, vorticity, and temperature. Drift-flux theory has widespread application in the bubbly, slug, and drop regimes of gas-liquid flow as well as to fluid-particle systems such as fluidized beds. It provides a starting point for the extension of the

lebdeči sloji. Namenjena je tudi kot izhodišče za preučevanje tokov s prevladujočimi 2D in 3D vplivi. Prostorninski delež sestavine določimo z enačbo:

$$\varepsilon_f = \frac{|v_{fi} - v_{si}|}{|v_{\infty}|} \quad (11),$$

kjer je v_{∞} Stokesova hitrost posameznega trdnega delca v mirujoči tekočini. Določitev vrednosti koeficienta n podajata Richardson in Zaki [7]. Celotna korelacija Richardsons in Zakija za vse vrednosti Reynoldsovega števila podaja vrednosti n med 4,65 in 2,39, upoštevajoč, da so trdni delci toge kroglice majhnega premera v primerjavi z izmerami kanala. Vrednost koeficienta n lahko še povečamo, če prihaja do združevanja delcev. V predstavljeni raziskavi uporabljamo srednjo vrednost koeficienta n za sisteme plin - trdni delci ($n=3$). Vpeljati je mogoče tudi korekcijski faktor v odvisnosti od razmerja med premerom delcev in izmerami kanala.

1.4 Pogoji vmesnega roba

Kadar zapišemo dopolnjen sistem Navier-Stokesovih enačb gibanja dvofaznega dvosestavinskega sistema za nespremenljiv prostorninski delež sestavine v podobmočju v iteraciji numeričnega algoritma, so najbolj kritičen del izračuna pogoji vmesnega roba na mejah med makroelementi. Zaradi tega smo posebno pozornost namenili analizi nezveznosti. Vektorje hitrosti razdelimo na normalno in obodno komponento glede na rob podobmočja. Zaradi predpisanega nespremenljivega prostorninskega deleža znotraj posamezne iteracije je glavna značilnost vmesnega roba Γ_i med podobmočjema Ω_i in Ω_2 skok prostorninskega deleža sestavine in posledično tudi skok normalne komponente hitrosti. Obodne komponente vektorjev hitrosti se spreminjajo zvezno. Za gibanje v ravnini x - y velja naslednja povezava med normalnimi in tangentialnimi odvodi normalne in obodne komponente vektorja hitrosti:

$$\omega_p = \frac{\partial v_{pt}}{\partial n} - \frac{\partial v_{pn}}{\partial t} \quad (12).$$

Iz ohranitvenih zakonov izpeljemo ustrezne pogoje vmesnega roba kinematike:

$$v_{pt}|_{\bar{\Gamma}} = -v_{pn}|_{\bar{\Gamma}} \quad (13),$$

$$v_{pn}\varepsilon_p|_{\bar{\Gamma}} = -v_{pt}\varepsilon_p|_{\bar{\Gamma}} \quad (14),$$

$$\frac{\partial v_{pt}}{\partial n}|_{\bar{\Gamma}} = \frac{\partial v_{pn}}{\partial t}|_{\bar{\Gamma}} \quad (15),$$

$$\varepsilon_p \frac{\partial v_{pn}}{\partial n}|_{\bar{\Gamma}} = \varepsilon_p \frac{\partial v_{pt}}{\partial t}|_{\bar{\Gamma}} \quad (16)$$

in kinetike

theory to flows in which two- and three-dimensional effects are significant. The volume fraction of the component is determined by following equation:

where v_{∞} is the terminal speed of a single solid particle in an infinite stationary liquid. The evaluation of index n was shown by Richardson and Zaki [7]. The complete correlation of Richardson and Zaki over the whole range of Reynolds numbers gives a value for the index n between 4,65 and 2,39, assuming that the particles are rigid spheres and small compared to the diameter of the channel. The value of n can also be enlarged when the particles flocculate. In our study only small Reynolds number flow is encountered, therefore, an intermediate value of the index n for fluid-particle systems is taken into account ($n=3$). A correction factor can also be introduced in terms of the ratio of the particle diameter to the tube diameter.

1.4 Macroelement interface boundary conditions

When dealing with the modified Navier-Stokes system of equations written for the constant volume fraction of the component over each macroelement within a particular iteration the most critical parts of the numerical scheme are the macroelement interface boundary conditions. Therefore, particular attention has been given to the analysis of a jump discontinuity in the flow properties. Velocity vectors at the macroelement interface boundaries are split into normal and tangential components. The major interface characteristics are a jump in the volume fraction and the continuity of the tangential velocity (no-slip). Due to the volume fraction jump the jump in normal velocity is also necessary. For the macroelement interface the relation relating the vorticity values with the normal and tangential velocity component fluxes is derived. For two-dimensional motion in the x - y plane it reads:

Appropriate macroelement interface boundary conditions derived from the conservation laws for the kinematics are:

and for the kinetics are:

$$\omega_p|_{\bar{\Gamma}} = \omega_p|_{\bar{\Gamma}} + \left(1 - \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p}\right) \frac{\partial v_{pn}}{\partial t}|_{\bar{\Gamma}} \quad (17),$$

$$\frac{\partial \omega_p}{\partial n} \Big|_{\bar{\Gamma}} = -\frac{\partial \omega_p}{\partial n} \Big|_{\bar{\Gamma}} - \left(1 - \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p}\right) \frac{\partial v_{pn}}{\partial n \partial t} \Big|_{\bar{\Gamma}} \quad (18).$$

S predpisanim $\varepsilon_p = 1$ na obeh straneh vmesnega roba Γ_I med podobmočjema Ω_1 in Ω_2 enačbe od (13) do (18) privzamejo običajno obliko pogojev vmesnega roba za enofazno gibanje viskozne nestisljive tekočine.

1.5 Robni pogoji

Za numerično rešitev sistema enačb gibanja dvofaznega dvoestavinskega toka plin - trdna snov je treba predpisati primerne robne pogoje za obe sestavini. Običajni robni pogoji v primeru zapisa za osnovne spremenljivke so znane vrednosti robnih hitrosti obeh sestavin, termodinamični tlak plinaste sestavine in navidezna temperatura trdne snovi, ki je izpeljana iz kinetične teorije zrnatega toka in je namenjena za določitev navideznega tlaka trdne snovi. Pri zapisu za hitrostno-vrtinčno formulacijo potrebujemo za obe sestavini le znane vrednosti robnih hitrosti oziroma vrednosti njihovih odvodov. Robni pogoji običajne ROIM so podrobno predstavljeni v [8].

Na neporozni trdni steni kanala pri toku plina in trdnih delcev predpišemo po navadi brezzdrsne robne pogoje plinaste sestavine. Tega ne moremo vedno storiti tudi za trdne delce, saj pri toku delcev večjega premera v primerjavi s hrapavostjo sten prihaja do drsa pri trku ob steno. Mnogokrat kljub temu predpostavimo, da so delci izjemno majhni, kar omogoči predpisovanje brezzdrsnih robnih pogojev tudi za trdno snov. Začetni pogoji prostorninskega deleža sestavin lahko zavzamejo katerokoli fizikalno sprejemljivo vrednost.

2 INTEGRALSKA PREDSTAVITEV HITROSTNO-VRTINČNE FORMULACIJE DVOFAZNEGA DVOSESTAVINSKEGA TOKA

2.1 Kinematika gibanja plina in trdne snovi

Pri obravnavi kinematike obeh sestavin v robno-območni integralski predstavitvi upoštevamo, da vsaka komponenta vektorjev hitrosti v enačbi (8) zadošča nehomogeni parabolčni enačbi:

$$\alpha_p \frac{\partial v_{pi}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial v_{pi}}{\partial \tau} + b_{pi} = 0 \quad (19).$$

Z enačenjem vektorja navidezne telesne sile b_{pi} z vrtinčnim delom toka obeh sestavin:

$$b_{pi} = \alpha_p \varepsilon_{ijk} \frac{\partial \omega_{pk}}{\partial x_j} \quad (20)$$

zapišemo pripadajoč integralski izraz:

where subscript I denotes the interface boundary Γ_I between the macroelements Ω_1 and Ω_2 . With $\varepsilon_p = 1$ at both sides of the boundary Γ_I the Eqns. from (13) to (18) take on the classical form for single-phase fluid motion.

1.5 Boundary conditions

To solve the equations for gas-solid particles flow we need appropriate boundary conditions, not only for the fluid phase but also for the solid particles. Classical boundary conditions in the case of primitive variables formulation are the velocities of the gas phase and the solid particles, the boundary condition for gas-phase pressure and the boundary granular temperature derived from the kinetic theory of granular flow to compute the solids pressure. In the velocity-vorticity variables approach we need only the appropriate boundary conditions for the velocities or velocity fluxes of the gas and the solids. The boundary conditions for the classical BDIM approach are discussed in detail in [8].

For the gas-solid particle flow motion the gas-phase velocities are generally set to zero at an impenetrable rigid wall. This no-slip condition cannot always be applied to solid motion. Since the particle diameter is usually larger than the length scale of the surface roughness of the rigid wall, the particles may partially slip the wall. But it is also important to note that for small particle diameters the boundary condition is close to the no-slip condition. Initially, in a mixture of gas phase and solid particles the volume fraction of the two phases can be set to any physically acceptable value.

2 INTEGRAL REPRESENTATION OF THE VELOCITY-VORTICITY FORMULATION FOR TWO-PHASE TWO-COMPONENT FLOW

2.1 Gas and solid phase kinematics

Considering first the kinematics of both phases motion in the boundary domain integral representation one has to take into account that each component of the velocity vector in Eqn. (8) obeys the nonhomogeneous parabolic equation:

Equating the body force term b_{pi} to the vortical fluid or solid particles flow term:

renders an integral statement :

$$c(\xi)v_{pi}(\xi, \tau_F) + \alpha_p \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} v_{pi} \frac{\partial u_p^*}{\partial n} d\tau d\Gamma = \alpha_p \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} \left(\frac{\partial v_{pi}}{\partial n} - e_{ijk} \omega_{pj} n_k \right) u_p^* d\tau d\Gamma + \alpha_p \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} e_{ijk} \omega_{pj} \frac{\partial u_p^*}{\partial x_k} d\tau d\Omega + \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} v_{pi, F-} u_{p, F-}^* d\Omega \quad (21),$$

kjer je u_p^* parabolna difuzijska osnovna rešitev. Če predpostavimo nespremenljiv potek vseh funkcij polja po posamičnem časovnem koraku, lahko časovne integrale v enačbi (21) rešimo analitično [8], tako da integralski stavek podamo v obliki:

$$c(\xi)v_{pi}(\xi, \tau_F) + \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} v_{pi} \frac{\partial U_p^*}{\partial n} d\Gamma = \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} \left(\frac{\partial v_{pi}}{\partial n} - e_{ijk} \omega_{pj} n_k \right) U_p^* d\Gamma + \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} e_{ijk} \omega_{pj} \frac{\partial U_p^*}{\partial x_k} d\Omega + \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} v_{pi, F-} u_{p, F-}^* d\Omega \quad (22),$$

kjer je $U_p^* = \alpha_p u_p^*$.

2.2 Kinetika gibanja plina in trdne snovi

Integralsko predstavitev kinetike gibanja plina in trdne snovi zapišemo z uporabo difuzivno-konvektivne osnovne rešitve. Časovne odvode vrtnčnosti in prostorninskih deležev aproksimiramo z nesimetričnimi končnimi razlikami. Tak način omogoči zapis enačb (9) in (10) v obliki nehomogene difuzivno-konvektivne parcialne diferencialne enačbe:

$$\nu_{p-} \frac{\partial \omega_{pi}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tilde{v}_{pj} \omega_{pi}}{\partial x_j} - \frac{1}{\Delta \tau} \omega_{pi} + b_{pi} = 0, \quad (23).$$

Diferencialni zapis preoblikujemo v ustrezen integralski stavek:

$$c(\xi) \omega_{pi}(\xi) + \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} \omega_{pi} \frac{\partial U_p^*}{\partial n} d\Gamma = \frac{1}{\nu_{p-}} \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} \left(\nu_{p-} \frac{\partial \omega_{pi}}{\partial n} - \omega_{pi} \tilde{v}_{pn} \right) U_p^* d\Gamma + \frac{1}{\nu_{p-}} \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} b_{pi} U_p^* d\Omega \quad (24)$$

z $U_p^* = \nu_{p0} \cdot u_p^*$ in $\tilde{v}_{pn} = \tilde{v}_{pj} \cdot n_j$. u_p^* je difuzivno-konvektivna osnovna rešitev. Izraz navideznih telesnih sil b_{pi} vsebuje konvekcijo zaradi spreminjajočega se dela vektorja hitrosti \tilde{v}_{pj} , deformacijo, začetne pogoje, spremembo vrtnčnosti zaradi oblikovanja mehurjev in medfazne izmenjave gibalne količine:

$$b_{pi} = - \frac{\partial \tilde{v}_{pj} \omega_{pi}}{\partial x_j} + \frac{\partial \omega_{pj} v_{pi}}{\partial x_j} + \frac{\omega_{pi, F-}}{\Delta \tau} + \frac{\omega_{pi}}{\varepsilon_p \Delta \tau} (\varepsilon_{p, F-} - \varepsilon_{p, F-}) \mp \beta (\omega_{fi} - \omega_{si}) \quad (25).$$

Končni integralski stavek se glasi:

$$c(\xi) \omega_{pi}(\xi) + \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} \omega_{pi} \frac{\partial U_p^*}{\partial n} d\Gamma = \frac{1}{\nu_{p-}} \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} \left(\nu_{p-} \frac{\partial \omega_{pi}}{\partial n} - \omega_{pi} v_{pn} + \omega_{pn} v_{pi} \right) U_p^* d\Gamma + \frac{1}{\nu_{p-}} \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} (\omega_{pi} \tilde{v}_{pj} - v_{pi} \omega_{pj}) \frac{\partial U_p^*}{\partial x_j} d\Omega \mp \frac{\beta}{\varepsilon_p \varepsilon_p} \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} (\omega_{fi} - \omega_{si}) U_p^* d\Omega + \frac{1}{\nu_{p-} \Delta \tau} \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} \omega_{pi, F-} U_p^* d\Omega + \frac{1}{\varepsilon_p \nu_{p-} \Delta \tau} \int_{-\tau_{F-1}}^{\tau_F} \omega_{pi} (\varepsilon_{p, F-} - \varepsilon_{p, F-}) U_p^* d\Omega. \quad (26).$$

where u_p^* is the parabolic diffusion fundamental solution. Assuming a constant variation of all field variables within the individual time increment, the time integrals in Eqn. (21) may be evaluated analytically [8]. An integral statement can be finally written in the following form:

being $U_p^* = \alpha_p u_p^*$.

2.2 Gas and solid phase kinetics

An integral representation describing the kinetics of both components motion is formulated by using the fundamental solution of a steady diffusion-convective partial differential equation with a reaction term. In the case of kinetics the volume fraction and the vorticity time derivatives are approximated by using a non-symmetric finite-difference approximation. Therefore, Eqns. (9) and (10) can be rewritten as a non-homogeneous diffusion-convective partial differential equation:

The above differential formulation can be transformed into an equivalent integral statement:

with $U_p^* = \nu_{p0} \cdot u_p^*$ and $\tilde{v}_{pn} = \tilde{v}_{pj} \cdot n_j$. u_p^* is the fundamental solution of the diffusion-convective equation. The pseudo-body term b_{pi} includes the convective flux for the perturbed velocity field \tilde{v}_{pj} , deformation, initial conditions, vorticity change on account of the bubble formation and interphase momentum exchange term, for example:

The final integral representation is as follows:

3 NUMERIČNA REŠITEV

3 NUMERICAL SOLUTION

3.1 Diskretizirane enačbe

Za numerično približno rešitev obravnavanih funkcij polja, npr. hitrosti in vrtinčnosti obeh sestavin, moramo pripadajoče robno-območne integralske predstavitve zapisati v diskretni obliki. Diskretizacijo integralskih predstavitev hitrosti in vrtinčnosti obeh sestavin izpeljemo iz pripadajočih integralskih enačb (22) in (26), za kinematiko:

$$c(\xi) v_{pi}(\xi, \tau_F) + \sum_{e_{-}}^E \{h_{pe}\}^T \{v_{pi}\}^n = \sum_{e_{-}}^E \{g_{pe}\}^T \left\{ \frac{\partial v_{pi}}{\partial n} + e_{ijk} \omega_{pk} n_j \right\}^n - e_{ijk} \sum_{e_{-}}^C \{d_{pej}\}^T \{\omega_{pk}\}^n + \sum_{e_{-}}^C \{b_{pe}\}^T \{v_{pi,F_{-}}\}^n \quad (27)$$

in kinetiko

$$c(\xi) \omega_{pi}(\xi) + \sum_{e_{-}}^E \{H_{pe}\}^T \{\omega_{pi}\}^n = \frac{1}{\nu_{p_{-}}} \sum_{e_{-}}^E \{G_{pe}\}^T \left\{ \nu_{p_{-}} \frac{\partial \omega_{pi}}{\partial n} - \omega_{pi} v_{pi} + \omega_{pi} v_{pi} \right\}^n + \frac{1}{\nu_{p_{-}}} \sum_{e_{-}}^C \{D_{pej}\}^T \{\omega_{pi} \bar{v}_{pj} - v_{pi} \omega_{pj}\}^n + \frac{1}{\nu_{p_{-}} \Delta \tau} \sum_{e_{-}}^C \{B_{pe}\}^T \{\omega_{pi,F_{-}}\}^n + \frac{1}{\nu_{p_{-}} \Delta \tau} \sum_{e_{-}}^C \{B_{pe}\}^T \{\omega_{pi}\}^n - \frac{1}{\nu_{p_{-}} \varepsilon_s \Delta \tau} \sum_{e_{-}}^C \{B_{pe}\}^T \{\omega_{pi} \varepsilon_{p,F_{-}}\}^n \mp \frac{\beta}{\varrho_p \varepsilon_p} \sum_{e_{-}}^C \{B_{pe}\}^T \{\omega_{fi} - \omega_{si}\}^n \quad (28),$$

kjer nadpis T označuje transpozicijo.

Kinematiko ravninskega toka ($i,j=1,2$) podamo z naslednjim stavkom po enačbi (27):

$$c(\xi) v_{pi}(\xi, \tau_F) + \sum_{e_{-}}^E \{h_{pe}\}^T \{v_{pi}\}^n = \sum_{e_{-}}^E \{g_{pe}\}^T \left\{ \frac{\partial v_{pi}}{\partial n} + e_{ij} \omega_{pj} n_j \right\}^n - e_{ij} \sum_{e_{-}}^C \{d_{pej}\}^T \{\omega_{pj}\}^n + \sum_{e_{-}}^C \{b_{pe}\}^T \{v_{pi,F_{-}}\}^n \quad (29).$$

Diskretizirane transportne enačbe vrtinčnosti obeh sestavin ravninskega toka so:

$$c(\xi) \omega_p(\xi) + \sum_{e_{-}}^E \{H_{pe}\}^T \{\omega_p\}^n = \frac{1}{\nu_{p_{-}}} \sum_{e_{-}}^E \{G_{pe}\}^T \left\{ \nu_{p_{-}} \frac{\partial \omega_p}{\partial n} - \omega_p v_{pi} \right\}^n + \frac{1}{\nu_{p_{-}}} \sum_{e_{-}}^C \{D_{pej}\}^T \{\omega_p \bar{v}_{pj}\}^n + \frac{1}{\nu_{p_{-}} \Delta \tau} \sum_{e_{-}}^C \{B_{pe}\}^T \{\omega_{p,F_{-}}\}^n + \frac{1}{\nu_{p_{-}} \Delta \tau} \sum_{e_{-}}^C \{B_{pe}\}^T \{\omega_p\}^n - \frac{1}{\nu_{p_{-}} \varepsilon_s \Delta \tau} \sum_{e_{-}}^C \{B_{pe}\}^T \{\omega_p \varepsilon_{p,F_{-}}\}^n \mp \frac{\beta}{\varrho_p \varepsilon_p} \sum_{e_{-}}^C \{B_{pe}\}^T \{\omega_f - \omega_s\}^n \quad (30).$$

3.1 Discretized equations

Consider a discretized equation set for the case of both fluid and solid particles motion. The discretization of the integral representations for velocities and vorticities can be readily obtained from the corresponding integral Eqns. (22) and (26) as follows, for the kinematics:

and for the vorticity kinetics:

using superscript T to denote the transposition.

The plane kinematics ($i,j=1,2$) can be given by the following statement based on Eqn. (27):

The plane vorticity kinetics reads:

Postopek izračunavanja integralov in zapis diskretiziranih integralnih enačb je običajen in je podrobno opisan v [6] in [8].

3.2 Postopek reševanja vezanih sistemov enačb

Zapisana sistema enačb kinematike, enačba (29), ter kinetike plinaste in trdne sestavine, enačba (30), dvofaznega dvosestavinskega lebdječega sloja, povezana z enačbo za izračun prostorninskega deleža sestavine (11), sestavljata močno nelinearen sistem enačb, katerih rešitev poiščemo na iterativen način. Postopek je naslednji: (F - plinasta sestavina, S - trdna sestavina)

- 1.F Pričnemo z začetnimi predpostavljenimi vrednostmi vrtničnosti plinaste sestavine.
- 1.S Pričnemo z začetnimi predpostavljenimi vrednostmi vrtničnosti trdne snovi.
- 2.F Kinematika plinaste sestavine:
 - (a) rešitev implicitnega sistema za robne vrednosti hitrosti oziroma vrednosti normalnih odvodov hitrosti plinaste sestavine,
 - (b) transformacija novih funkcijskih vrednosti plinaste sestavine iz vozlišč elementov v vozlišča celic,
 - (c) določitev novih vrednosti vrtničnosti plinaste sestavine na robu,
 - (d) določitev novih matrik kinetike plinaste sestavine, če se nespremenljivi del hitrostnega vektorja plinaste sestavine spremeni za več od predpisane tolerance.
- 2.S Kinematika trdne snovi:
 - (a) rešitev implicitnega sistema za robne vrednosti hitrosti oziroma vrednosti normalnih odvodov hitrosti trdne snovi,
 - (b) transformacija novih funkcijskih vrednosti trdne snovi iz vozlišč elementov v vozlišča celic,
 - (c) določitev novih vrednosti vrtničnosti trdne snovi na robu,
 - (d) določitev novih matrik kinetike trdne snovi, če se nespremenljivi del hitrostnega vektorja trdne snovi spremeni za več od predpisane tolerance.
- 3.F+S Določitev prostorninskih deležev plinaste in trdne sestavine.
- 4.F Kinetika plinaste sestavine:
 - (a) rešitev implicitnega sistema za neznane vrednosti normalnih odvodov vrtničnosti plinaste sestavine in notranjih območnih vrednosti vrtničnosti plinaste sestavine,
 - (b) transformacija novih funkcijskih vrednosti plinaste sestavine iz vozlišč elementov v vozlišča celic.
- 4.S Kinetika trdne snovi:
 - (a) rešitev implicitnega sistema za neznane vrednosti normalnih odvodov vrtničnosti trdne snovi in notranjih območnih vrednosti vrtničnosti trdne snovi,
 - (b) transformacija novih funkcijskih vrednosti trdne snovi iz vozlišč elementov v vozlišča celic.

The procedure is standard and can be seen in detail in [6] and [8].

3.2 Solution procedure

The kinematics relations, Eqn. (29), and the vorticity transport equations, Eqn. (30), for both phases motion are coupled in two sets of non-linear equations. These two sets are related to each other by Eqn. (11), which is used to compute the volume fraction of the fluid phase knowing the velocity fields of both components. In order to obtain a solution of the fluid and solid particles motion problem a sequential computational algorithm was developed. The main steps in this algorithm are:

- (F - gas phase, S - solid phase)
- 1.F Start with initial values for the fluid-phase vorticity distribution.
 - 1.S Start with initial values for the solid-phase vorticity distribution.
 - 2.F Fluid-phase kinematic computational part:
 - (a) solve implicit sets for boundary fluid-phase velocity or velocity normal flux values,
 - (b) transform new values from element nodes to cell nodes,
 - (c) determine new boundary fluid-phase vorticity values,
 - (d) compute new fluid-phase matrices for the kinetics if the constant fluid-phase velocity vector is perturbed more than the prescribed tolerance.
 - 2.S Solid-phase kinematic computational part:
 - (a) solve implicit sets for boundary solid-phase velocity or velocity normal flux values,
 - (b) transform new values from element nodes to cell nodes,
 - (c) determine new boundary solid-phase vorticity values,
 - (d) compute new solid-phase matrices for the kinetics if the constant solid-phase velocity vector is perturbed more than the prescribed tolerance.
 - 3.F+S Determine volume fraction of the fluid and solid-phase.
 - 4.F Fluid-phase vorticity kinetic computational part:
 - (a) solve implicit set for unknown boundary fluid-phase vorticity flux and internal domain fluid-phase vorticity values,
 - (b) transform new values from element nodes to cell nodes.
 - 4.S Solid-phase vorticity kinetic computational part:
 - (a) solve implicit set for unknown boundary solid-phase vorticity flux and internal domain solid-phase vorticity values,
 - (b) transform new values from element nodes to cell nodes.

- 5.F Podprostitev vrtinčnosti plinaste sestavine in preverjanje konvergence. Če je konvergenčni kriterij izpolnjen z izračuni, prenehamo, sicer se vrnemo na korak 2.F.
- 5.S Podprostitev vrtinčnosti trdne snovi in preverjanje konvergence. Če je konvergenčni kriterij izpolnjen z izračuni, prenehamo, sicer se vrnemo na korak 2.S.

- 5.F Relax fluid-phase vorticity values and check the fluid-phase convergence. If convergence criterion is satisfied, then stop; otherwise, go to step 2.F.
- 5.S Relax solid-phase vorticity values and check the solid-phase convergence. If convergence criterion is satisfied, then stop; otherwise, go to step 2.S.

4 TESTNI PRIMERI

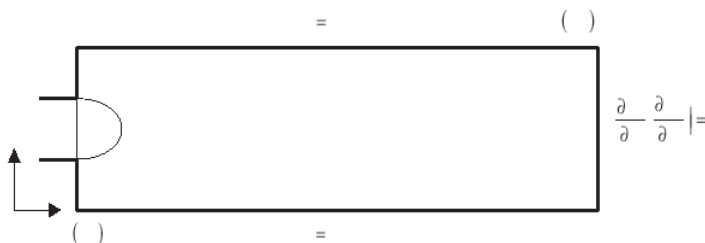
4 TEST EXAMPLES

4.1 Enofazni enosestavinski tok v kanalu z nenadno simetrično razširitvijo

4.1 Single-phase symmetric sudden expansion flow

Tok v kanalu z nenadno simetrično razširitvijo je podoben toku v kanalu s stopnico, saj tudi tukaj pride do pojava recirkulacije pri večjih vrednostih Reynoldsovega števila. Posebnost problema je obnašanje toka pri večjih vrednostih Reynoldsovega števila, ko se prvotno simetrični recirkulacijski coni začneta razlikovati po dolžini. V našem primeru smo simulirali enofazni enosestavinski tok v kanalu z nenadno simetrično razširitvijo za vrednost Reynoldsovega števila $Re=56$, ki je dobro dokumentiran z eksperimentalnimi podatki (Durst [5]). Tok v kanalu z nenadno simetrično razširitvijo označuje preprosta geometrijska oblika z vstopnim območjem, omejenim na $1/3$ višine kanala. Locirano je na sredini kanala, kar kaže slika 1, kjer so prikazani tudi robni pogoji in izmere kanala.

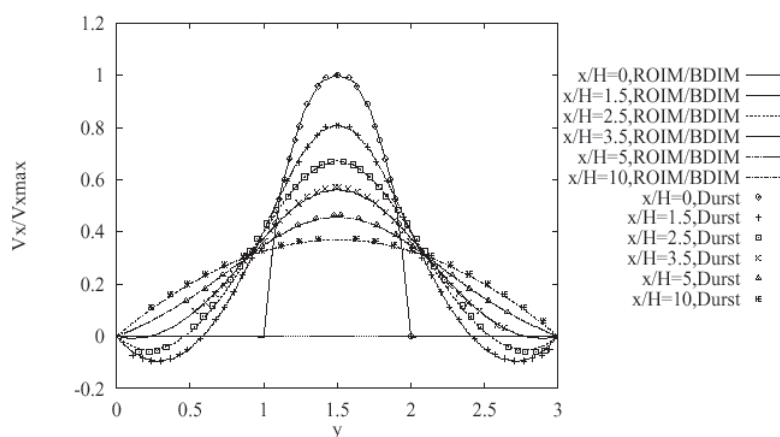
Because of the recirculation zones at larger values of Reynolds number flow downstream of the expansion a plane symmetric sudden expansion flow is similar to the backward-facing step flow. The flow is symmetric at sufficiently low values of the Reynolds number based on the step height and maximum inlet velocity. It becomes asymmetric as the Reynolds number is increased beyond the critical value. Our results were obtained at a Reynolds number of 56, which ensures the symmetric flow and enables us to compare the numerical results with the experimental values of Durst [5]. The geometry is simple with the inlet region constituting $1/3$ of the channel height based in the middle of the channel. The geometry and boundary conditions are shown in Figure 1.



Sl. 1. Enofazni tok skozi nenadno simetrično razširitev. Geometrija in robni pogoji.
Fig. 1. Single-phase symmetric sudden expansion flow. Geometry and boundary conditions.

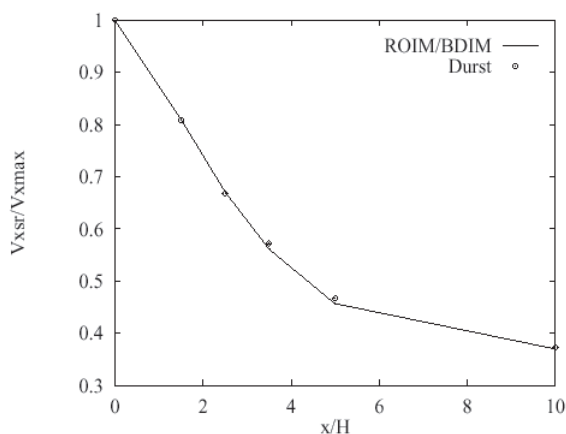
Predpisani vstopni profil hitrosti je enak izmerjenemu [5] in nekoliko odstopa od paraboličnega profila razvitega laminarnega toka. Pri izstopu iz kanala smo predpisali normalne odvode hitrosti. Prikazani rezultati temeljijo na diskretizaciji računskega območja z 20×18 podobmočji z razmerjem najdaljši/najkrajši element = 2 v koordinatnih smereh x in y . Zaradi nenadne razširitve se pojavita recirkulacijski območji ob zgornji in spodnji steni kanala, ki se z večanjem vrednosti Reynoldsovega števila povečujeta. Hitrostno polje je simetrično, kar je razvidno tudi iz eksperimentalnih rezultatov. V začetku kanala je še viden vpliv recirkulacije, medtem ko se proti izstopu vzpostavi razviti profil hitrosti. Hitrostne profile za ustaljeno rešitev smo primerjali z meritvami Dursta, Mellinga in Whitelawa [5].

The prescribed inlet velocity profile is exactly equal to the measured one [5], and differs only a little from the parabolic profile of fully developed laminar flow. At the outlet normal velocity profiles are prescribed. The discretization consists of 20×18 subdomains with a ratio of 2 between the longest and the shortest element. The calculated separation regions behind the expansion are, as reported by [5], of equal length, leading to the fully developed, parabolic profile far downstream. The numerical results are compared to the experimental values of Durst, Melling and Whitelaw [5].



Sl. 2. Enofazni tok skozi nenadno simetrično razširitev. Primerjava z eksperimentalnimi vrednostimi vzdolž toka na različnih oddaljenostih od razširitve.

Fig. 2. Single-phase symmetric sudden expansion flow. Comparison with experimental data at different distances downflow the expansion.



Sl. 3. Enofazni tok skozi nenadno simetrično razširitev. Primerjava z eksperimentalnimi vrednostimi vzdolž toka v sredini kanala.

Fig. 3. Single-phase symmetric sudden expansion flow. Comparison with experimental data along the horizontal line through the center of the channel.

Slika 2 prikazuje primerjavo izračunanih hitrostnih profilov z izmerjenimi na različnih oddaljenostih od nenadne razširitve kanala $X/H = 0, 1,5, 2,5, 3,5, 5$ in 10 , pri čemer H označuje višino stopnice. Na sliki 3 je prikazana primerjava največjih hitrosti vzdolž simetrijske osi kanala.

Figure (2) shows the comparison at different distances downflow the expansion $X/H = 0, 1,5, 2,5, 3,5, 5$ in 10 , where H denotes the height of the step. In Figure 3 the maximum velocity values are shown along the centreline of the channel.

4.2 Dvofazni dvosestavinski tok v navpičnem kanalu

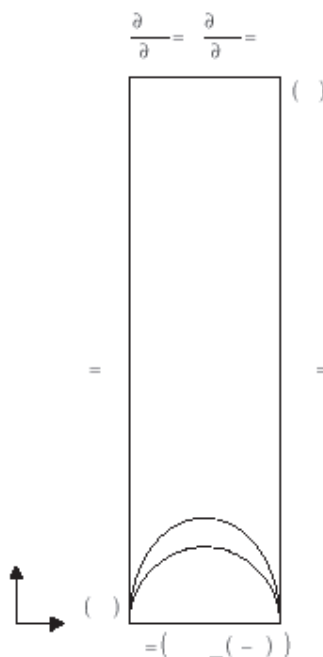
4.2 Two-phase two-component flow in the vertical channel

Namen raziskave je s predlagano numerično shemo ROIM simulirati vpliv različnih koeficientov medfazne izmenjave gibalne količine, kombiniranih z različnimi Stokesovimi hitrostmi trdnih delcev na hitrostni polji obeh sestavin. Geometrijska oblika in robni pogoji zastavljenega problema so prikazani na sliki 4.

The aim of the research was to establish with the proposed BDIM numerical scheme the influence of different drag coefficients combined with different terminal velocities of solid phase on the velocity fields of both components. The geometry and boundary conditions for the investigated two-phase two-component vertical channel flow are presented in Figure 4.

Pri vstopu v cev smo predpisali različne parabolične hitrostne profile. V prvem delu izračunov smo za sestavino 1 (plin) pri vstopu v kanal predpisali parabolo z največjo vstopno hitrostjo $v_{fy\ max} = 1$ m/s

Different parabolic velocity profiles were prescribed at the inlet. In the first set of calculations for the phase 1 (gas) the parabolic inlet velocity profile with $v_{fy\ max} = 1$ m/s was defined. For the phase 2 (solid



Sl. 4. Ravninski dvofazni dvosestavinski tok med navpičnima ploščama. Geometrija in robni pogoji.
Fig. 4. Two-phase two-component vertical channel flow. Geometry and boundary conditions.

in za sestavino 2 (trdna snov) parabolo z največjo vstopno hitrostjo $v_{sy\ maks} = 0,5$ m/s. V drugem delu izračunov smo zmanjšali največjo vstopno hitrost trdne sestavine na $v_{sy\ maks} = 0,4$ m/s in primerjali potek hitrostnih profilov vzdolž navpičnice skozi središče kanala. Zdrs sestavin na trdnih stenah ni bil mogoč. Pri izstopu iz kanala smo predpisali normalne odvode vektorjev hitrosti. Po celotnem računskem območju smo upoštevali realno vrednost koeficienta medfazne izmenjave gibalne količine. Izvedli smo izračune z vrednostmi od $\beta = 10$ kg/m³s do $\beta = 30$ kg/m³s. Ustaljeno analizo smo simulirali s prehodno za zelo velik časovni korak ($\Delta\tau = 10^{15}$). Konvergenčni kriterij vseh izračunov je bil 10^{-4} .

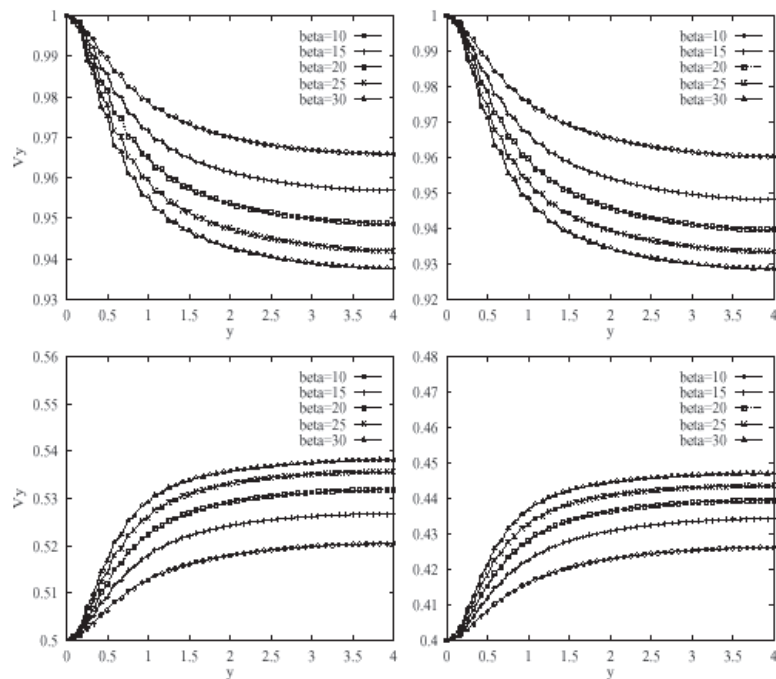
Sliki 5 in 6 prikazujeta navpično komponento vektorjev hitrosti vzdolž navpične črte skozi središče kanala. Oblika hitrostnih profilov je močno odvisna od koeficienta trenja β . Rezultati izračunov na sliki 5 kažejo odvisnost hitrosti od vrednosti koeficienta trenja β pri izbrani Stokesovi hitrosti posameznega trdnega delca, medtem ko slika 6 prikazuje primerjavo hitrostnih profilov pri izbranem trenju med sestavinama in spreminjajoči se Stokesovi hitrosti trdnih delcev. V obeh primerih je jasno razvidno, da se z večanjem koeficienta trenja β hitrostni profili obeh sestavin vedno bolj približujejo drug proti drugemu. Prav tako pričakovano je zmanjševanje največjih hitrosti obeh sestavin vzdolž srednice kanala zaradi povečevanja Stokesove hitrosti trdnih delcev.

Simuliranja manjšajoče se hitrosti sestavine 1 in večajoče se hitrosti sestavine 2 smo za oba primera vstopnih pogojev izvedli na različnih računskih mrežah. Konvergenco rezultatov z zgoščevanjem računske mreže podajata preglednici 1 in 2.

phase) the maximum inlet velocity was set to the value of $v_{sy\ max} = 0.5$ m/s. In the second part of the calculations the maximum inlet velocity of phase 2 was decreased to the $v_{sy\ max} = 0.5$ m/s. The velocity profiles along the vertical line through the centre of the channel were compared to each other. No-slip conditions on the rigid walls were prescribed for both phases motion. Normal velocity fluxes at the outlet were given as known quantities. All over the computational domain a realistic value of the interphase momentum transfer coefficient was given. Calculations with different values of drag coefficient between $\beta = 10$ kg/m³s and $\beta = 30$ kg/m³s were made. Steady-state analysis was simulated by a transient one for one very large time step ($\Delta\tau = 10^{15}$). The convergence criteria for all runs were 10^{-4} .

Figures 5 and 6 show the vertical component of the velocity vectors along the vertical line through the centre of the channel. The shape of the velocity profiles strongly depends on the drag coefficient β . The results in Figure 5 show the influence of the drag coefficient on the velocity fields at a fixed Stokes velocity of a single solid particle. On the other hand, Figure 6 shows the results at a fixed drag coefficient and variable Stokes velocity. In both cases one can see that the velocity profiles are moving closer to each other with an increasing interphase momentum exchange coefficient. Also, a decrease of the maximum velocities due to the increasing Stokes velocity was expected.

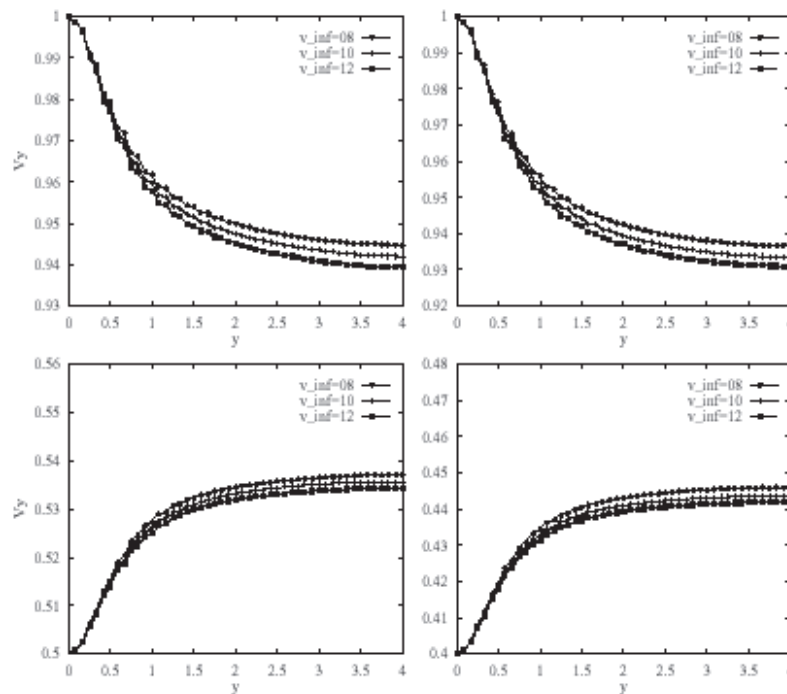
Simulations of the decreasing velocity of phase 1 and the increasing velocity of phase 2 were also carried out on different mesh densities. The convergence of the results is given in Tables 1 and 2.



Sl. 5. Vpliv koeficienta medfazne izmenjave gibalne količine β na navpično komponento vektorja hitrosti sestavine 1 (zgoraj) in sestavine 2 (spodaj) vzdolž srednice kanala na mreži s 6×24 podobmočji ($v_{vstop\ maks\ 1} = 1\text{ m/s}$, $v_{vstop\ maks\ 2} = 0,5\text{ m/s}$ (levo), $v_{vstop\ maks\ 2} = 0,4\text{ m/s}$ (desno), $v_{\infty} = 10\text{ m/s}$).

Fig. 5. Two-phase two-component vertical channel flow. Influence of interphase momentum exchange coefficient β on vertical component of phase 1 (upper line) and phase 2 (lower line) along the vertical line through the center of the channel at discretization 6×24 subdomains

($v_{inlet\ max\ 1} = 1\text{ m/s}$, $v_{inlet\ max\ 2} = 0.5\text{ m/s}$ (left), $v_{inlet\ max\ 2} = 0.4\text{ m/s}$ (right), $v_{\infty} = 10\text{ m/s}$).



Sl. 6. Vpliv Stokesove hitrosti sestavine 2 v_{∞} na navpično komponento vektorja hitrosti sestavine 1 (zgoraj) in sestavine 2 (spodaj) vzdolž srednice kanala na mreži s 6×24 podobmočji

($v_{vstop\ maks\ 1} = 1\text{ m/s}$, $v_{vstop\ maks\ 2} = 0,5\text{ m/s}$ (levo), $v_{vstop\ maks\ 2} = 0,4\text{ m/s}$ (desno), $\beta = 25\text{ kg/m}^3\text{s}$).

Fig. 6. Two-phase two-component vertical channel flow. Influence of Stokes velocity of phase 2 v_{∞} on vertical component of phase 1 (upper line) and phase 2 (lower line) along the vertical line through the center of the channel at discretization 6×24 subdomains

($v_{inlet\ max\ 1} = 1\text{ m/s}$, $v_{inlet\ max\ 2} = 0.5\text{ m/s}$ (left), $v_{inlet\ max\ 2} = 0.4\text{ m/s}$ (right), $\beta = 25\text{ kg/m}^3\text{s}$).

Preglednica 1: *Ravninski dvofazni dvosestavinski tok med navpičnima ploščama. Primerjava navpične komponente izstopne hitrosti v_{py} v odvisnosti od diskretizacije ($v_{vstop maks 1} = 1$ m/s, $v_{vstop maks 2} = 0,5$ m/s, $\beta = 25$ kg/m³s, $v_{\infty} = 10$ m/s).*

Table 1: *Two-dimensional two-phase two-component vertical channel flow. Comparison of vertical component of the outlet velocity v_{py} regarding to the mesh density ($v_{inlet max 1} = 1$ m/s, $v_{inlet max 2} = 0.5$ m/s, $\beta = 25$ kg/m³s, $v_{\infty} = 10$ m/s).*

mreža/ mesh	sestavina 1/ phase 1	sestavina 2/ phase 2
6 x 12	0.946	0.534
6 x 16	0.943	0.535
6 x 20	0.942	0.535
6 x 24	0.942	0.536
6 x 28	0.942	0.536
6 x 40	0.942	0.536
12 x 40	0.942	0.536

Preglednica 2: *Ravninski dvofazni dvosestavinski tok med navpičnima ploščama. Primerjava navpične komponente izstopne hitrosti v_{py} v odvisnosti od diskretizacije ($v_{vstop maks 1} = 1$ m/s, $v_{vstop maks 2} = 0,4$ m/s, $\beta = 25$ kg/m³s, $v_{\infty} = 10$ m/s).*

Table 2: *Two-dimensional two-phase two-component vertical channel flow. Comparison of vertical component of the outlet velocity v_{py} regarding to the mesh density ($v_{inlet max 1} = 1$ m/s, $v_{inlet max 2} = 0.4$ m/s, $\beta = 25$ kg/m³s, $v_{\infty} = 10$ m/s).*

mreža/ mesh	sestavina 1/ phase 1	sestavina 2/ phase 2
6 x 12	0.935	0.442
6 x 16	0.934	0.443
6 x 20	0.934	0.443
6 x 24	0.934	0.444
6 x 28	0.933	0.444
6 x 40	0.933	0.444
12 x 40	0.933	0.444

5 SKLEP

V prispevku je prikazan razvoj robno-območne integralske metode za numerično simuliranje dvofaznih dvosestavinskih tokov plin - trdni delci. Uporabili smo hitrostno-vrtinčno formulacijo dopoljenih Navier-Stokesovih enačb. Vodilne enačbe smo poenostavili z uvedbo predpostavke o nespremenljivem prostorninskem deležu sestavine v podobmočju v iteraciji numeričnega algoritma. Zaradi nezvezne porazdelitve hitrosti na mejah med makroelementi smo predpisali primerne pogoje vmesnega roba. Za sklenitev zapisanega sistema kinematičnih in kinetičnih enačb gibanja sestavin lebdečega sloja, smo uporabili dodatno enačbo za izračun prostorninskega deleža, ki je izpeljana iz teorije gnanega toka dvofaznih tokov. Prednost predstavljene sheme na podlagi robno območne integralske metode v primerjavi z običajnimi, ki brez izjeme temeljijo na postopkih končnih razlik, končnih elementov in kontrolnih prostornin, je zmanjšano število dodatnih modelov za določitev navideznih lastnosti trdne snovi. Pravilnost delovanja razvite sheme smo najprej potrdili na primeru enofaznega toka v kanalu z nenadno simetrično razširitvijo. Vplive

5 CONCLUSION

The boundary domain integral method was used to simulate two-dimensional two-phase two-component gas-solid flow. The velocity-vorticity approach in combination with modified Navier-Stokes equations was employed. The set of governing equations was simplified under the assumption that the volume fraction of each component is constant in each macroelement within one iteration. The discontinuous velocity distribution on the interfaces between the subdomains was overcome with the prescription of the appropriate interface macroelement boundary conditions. An additional equation to compute the volume fraction of the fluid phase was obtained from the drift-flux theory. The advantage of the proposed scheme is a reduced number of gas-solid physical models. The numerical model was first validated on single-phase test examples such as single-phase symmetric sudden expansion flow. Finally, the influence of the drag force and the terminal

koeficienta medfazne izmenjave gibalne količine in vpliv različnih Stokesovih hitrosti trdnih delcev na hitrostni polji sestavin smo testirali na primeru dvofaznega dvosestavinskega toka v navpičnem kanalu.

velocity of the solid phase on both components velocity fields was tested for the case of two-phase two-component vertical channel flow.

6 SIMBOLI
6 SYMBOLS

prostorninski delež sestavine	ε_p	volume fraction of the phase
i-ta trenutna komponenta hitrosti sestavine	v_{pi}	i-th instantaneous phase velocity component
gostota sestavine	ρ_p	density of the phase
i-ta koordinata	x_i	i-th coordinate
snovski oziroma Stokesov odvod	$D/D\tau$	substantial or Stokes derivative
tenzor viskoznih napetosti sestavine	S_{pij}	viscous stress tensor of the phase
gravitacijski pospešek	g_i	gravity acceleration
termodinamični tlak	p	thermodynamic pressure
navidezni tlak trdne snovi	p_s^*	solids pressure
koeficient medfazne izmenjave gibalne količine	β	interphase momentum transfer coefficient
i-ta trenutna komponenta vrtinčnosti	ω_{pi}	i-th instantaneous phase vorticity component
Stokesova hitrost trdnih delcev	v_∞	Stokes velocity of solid particles
koeficient	n	coefficient
sprostitveni parameter v kinematični enačbi sestavine	α_p	relaxation parameter in kinematic equation of the phase
nespremenljiva kinematična strižna viskoznost sestavine	ν_{p0}	constant phase kinematic shear viscosity
nespremenljiva kinematična normalna viskoznost sestavine	κ_{p0}	constant phase kinematic bulk viscosity
permutacijski enotski tenzor	e_{ijk}	permutation unit tensor

7 LITERATURA
7 REFERENCES

- [1] Anderson, T.B., R. Jackson. (1967) A fluid mechanical description of fluidized beds. *Ind Engng Chem Fundam* 6, 527-539.
- [2] Bird, R.B., W.E. Stewart, E.N. Lightfoot (1960) Transport phenomena. New York. *John Wiley & Sons*.
- [3] Boemer, A., Qi, H., Renz, U., Vasquez, S., Boysan, F. (1995) Eulerian computation of fluidized bed hydrodynamics - A comparison of physical models. *Proceedings of the 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, Orlando, 775-781.
- [4] Chapman, S., T.G. Cowling (1970) The mathematical theory of non-uniform gases. Cambridge, *Cambridge University Press*.
- [5] Durst, F., A. Melling, J.H. Whitelaw (1974) Low Reynolds number flow over a plane symmetric sudden expansion. *J. Fluid Mechanics*, 64(1), 111-128.
- [6] Požarnik, M. (2000) Doktorska disertacija, Univerza v Mariboru.
- [7] Richardson, J.F., W.N. Zaki (1954) Sedimentation and fluidization: Part I. *Trans Instn Chem Engs* 32, 35-53.
- [8] Škerget, L., Z. Rek (1995) Boundary-domain integral method using a velocity-vorticity formulation. *Eng Anal Bound Elem* 15, 359-370.
- [9] Wallis, G.B. (1969) One-dimensional Two-phase Flow. *McGraw-Hill*.

Naslov avtorjev: dr. Matej Požarnik
prof.dr. Leopold Škerget
Fakulteta za strojništvo
Univerza v Mariboru
Smetanova 17
2000 Maribor
matej.pozarnik@uni-mb.si
leo@uni-mb.si

Authors' Address: Dr. Matej Požarnik
Prof. Dr. Leopold Škerget
University of Maribor
Faculty of Mechanical Eng.
Smetanova 17
2000 Maribor, Slovenia
matej.pozarnik@uni-mb.si
leo@uni-mb.si

Prejeto: 5.9.2001
Received:

Sprejeto: 29.3.2002
Accepted:

Model za analizo in optimiranje vpenjalnih priprav

A Model for Analysing and Optimizing Fixtures

Uroš Župerl - Franci Čuš

V prispevku je predstavljen nevronska-analitični model za analizo in racionalizacijo vpenjalnih priprav, primernih za vpenjanje tankostenih izdelkov, pri katerih obstaja med obdelavo velika verjetnost deformacije zaradi vpenjalnih in rezalnih sil. Izdelan je program FIXAN, ki ovrednoti vpenjalno shemo in izračuna optimalne vrednosti in položaje vpenjalnih ter podpornih sil, ki so potrebne, da je obdelovanec varno vpet med obdelavo. Model je primeren za analizo vpenjalnih priprav, namenjenih za vpenjanje prizmatičnih in rotacijsko simetričnih izdelkov.

Model upošteva trenje, ki se pojavi med obdelovancem in elementi vpenjalne priprave. Hitrost izračuna je zaradi uporabe umetnih nevronskih mrež (UNM) zelo velika, zato je postopek mogoče izvesti v realnem času.

Z opisanim postopkom zmanjšamo čas snovanja vpenjalne priprave in preprečimo napake in deformacije med postopkom obdelave.

© 2002 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: naprave vpenjalne, frezanje, optimiranje, mreže nevronske)

This paper is about a neural-analytical model for the analysis and rationalization of fixtures that are suitable for clamping thin-wall products likely to undergo deformation due to the clamping and cutting forces that occur during machining. A program called FIXAN was used for the evaluation of the fixturing scheme and for the calculation of the optimum magnitude and positioning of the clamping forces required to enable the workpiece to be safely clamped during machining. The model is suitable for the analysis of fixtures intended for the fixing of prismatic and rotational products.

The model takes into consideration the friction occurring between the workpiece and the fixture components. Because of the use of an artificial neural network (ANN) the time needed for the calculation is very short, therefore, the procedure can be carried out in real time.

The described procedure ensures a reduction of the fixture-planning time and the prevention of defects and deformations during the machining process.

© 2002 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: fixture analysis, milling, optimization, neural networks)

0 UVOD

Snovanje vpenjalnih priprav je zapleten in domiselen postopek, ki zahteva izkušenega tehnologa. Za vsak izdelek obstaja več mogočih izvedb vpenjalnih priprav, zato je obseg mogočih rešitev velik.

Razvoj umetne inteligence je prispeval k omejevanju obsega mogočih rešitev in s tem k doseganju boljših izvedb. Umetna inteligenca ponuja različne tehnike za rešitev problema snovanja vpenjalnih naprav. Najpomembnejši sta prigradno razsojanje (case-based reasoning) in ekspertni sistemi. Vendar ti dve tehniki ne zagotovita vedno optimalne rešitve. Bolj uspešni so sistemi, ki

0 INTRODUCTION

The designing of fixtures is a complex and intuitive process for which an experienced technologist is required. For each workpiece there are several possible solutions of the design for modular fixtures, therefore, the number of possible solutions is large.

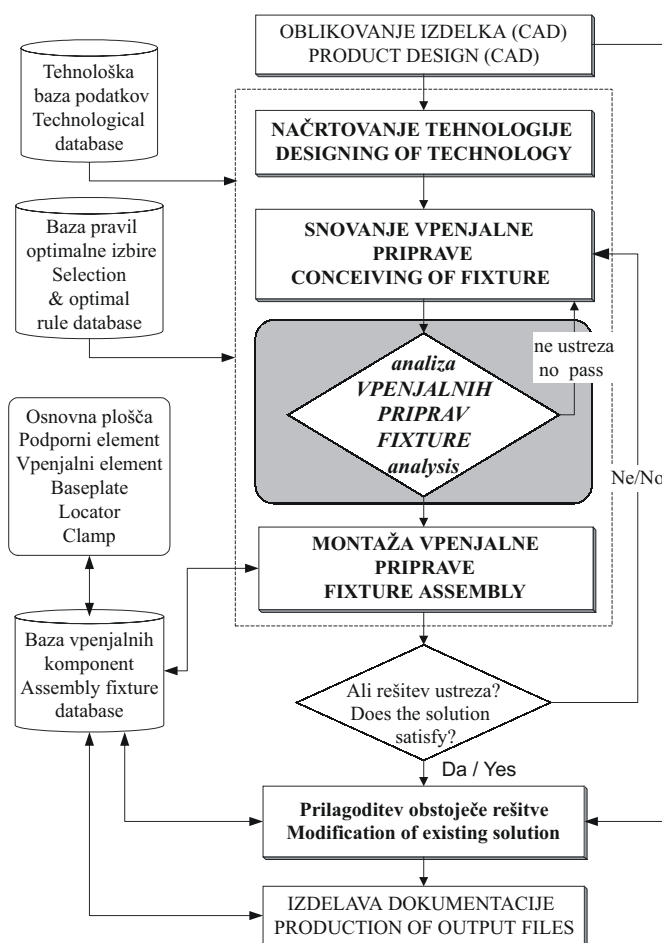
The development of artificial intelligence has contributed to limiting the number of possible solutions and, consequently, to achieving better designs. Artificial intelligence offers various methods for solving the problem of fixtures' design. The most important methods are the case-based reasoning and the expert systems. However, these two methods do not always provide the best fixture solutions. The systems that use a

uporabljajo kombinacijo več tehnik, npr. genetski algoritmi in nevronske mreže. Naloga računalniško podprtega sistema za snovanje vpenjalnih naprav [8] je izbrati pravilno kombinacijo osnovnih modularnih vpenjalnih elementov, jih postaviti in sestaviti na ustrezno mesto, tako da bo obdelovanec pri obdelavi varno vpet.

Opisan sistem (sl. 1) vsebuje modul za analizo vpenjalne priprave. Zmogljivejši moduli ponujajo tudi možnost racionalizacije in optimizacije dobljene rešitve. Po navadi izračun temelji na metodi analize sil, opremljeni z optimizacijskim postopkom.

combination of several methods, such as genetic algorithms and neural networks, are more successful. The task of the computer-supported system [8] for designing the fixtures is to select the correct combination of basic modular fixtures and to locate and assemble them in an appropriate place so that the workpiece will be safely fixed during machining.

Such a system (Figure 1) contains a module for the analysis of the fixture. These highly capable modules also offer the possibility to rationalize and optimize the obtained fixture solution. Usually, the calculation is based on the force analysis method provided with the optimization process.



Sl. 1. Zgradba avtomatiziranega sistema za izbiro, analizo in montažo vpenjalnih priprav
 Fig. 1. Structure of the automated system for the selection, analysis and assembly of fixtures

1 DOSEDANJE RAZISKAVE IN UGOTOVITVE

Poleg iskanja matematičnih rešitev za pozicioniranje in vpenjanje obdelovancev, poteka razvoj v smeri iskanja rešitve z uporabo računalniške rutine ([4] in [5]). Raziskovalci so nedavno predlagali model “obdelovanec-vpenjalna priprava”, ki temelji na osnovi “screw theory” in uporabili metodo linearnega programiranja za določitev vpenjalnih sil [3]. Mittal predlaga dinamični model “vpenjalna priprava-

1 CURRENT RESEARCH AND FINDINGS

In addition to searching for a mathematical solution for the positioning and clamping of workpieces the development is oriented towards searching for solutions by means of a computer routine ([4] and [5]). Recently, researchers [3] proposed a “workpiece-fixture” model based on the screw theory and used the linear programming method for a determination of the clamping forces. Mittal proposed the dynamic “fixture-workpiece” model to determine

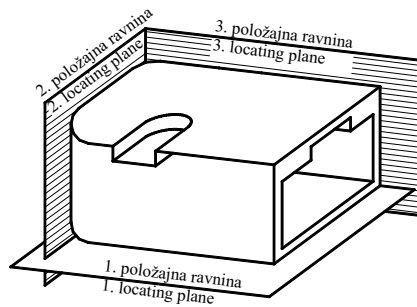
obdelovanec” za določitev potrebnih vpenjalnih sil, ki so potrebne, da je obdelovanec med obdelavo v ravnotežju [1]. Vse našete metode uporabljajo poenostavljene modele, ki ne upoštevajo trenja pri svojih izračunih. Rezultati so le približni.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA PRI IZDELAVI MODELA

Pri izdelavi modela je bilo predpostavljeno, da bo obdelovanec vpet s prilagodljivo modularno vpenjalno pripravo, ki omogoča vpenjanje obdelovancev različnih oblik. Predpostavljeno je, da sta obdelovanec in vpenjalna priprava togi telesi.

2.1 Vpenjalno načelo

Pri izdelavi modela je bilo uporabljeno za vpenjanje vpenjalno načelo 3-2-1 (sl. 2), ki zahteva tri lokatorje na osnovni položajni ravnini, dva lokatorja na drugi položajni ravnini in en lokator na tretji položajni ravnini.



Sl. 2. Uporabljen vpenjalno načelo 3-2-1 za vpenjanje prizmatskih obdelovancev
Fig. 2. The 3-2-1 clamping principle used for clamping the prismatic workpieces

2.2 Vpliv vpenjalnih sil na shemo vpetja

Vpenjalna sila mora biti dovolj velika in ustrezno usmerjena, da se lega obdelovanca med obdelavo zaradi rezalnih sil ne spremeni. Vpenjalne sile na obdelovancu ne smejo ustvarjati notranjih napetosti in poškodovati oziroma deformirati površine obdelovanca. Dovoljene deformacije smejo biti takšne, da je izdelek po postopku obdelave znotraj predpisanih tolerančnih vrednosti. Vpenjalne sile delujejo vedno proti podporam, na katerih je podprt obdelovanec.

2.3 Rezalne sile

Izračun rezalnih sil je izveden po nevronskega modela za simuliranje rezalnih sil [7]. Analitično modeliranje rezalnih sil [2] je težavno zaradi velikega števila medsebojno odvisnih obdelovalnih parametrov. Namesto poskusov iskanja analitičnih povezav med obdelovalnimi

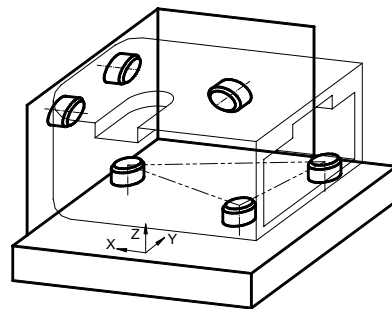
the required clamping forces needed for equilibrium of the workpiece during machining [1]. All the above-mentioned methods use simplified models that do not take friction into account in their calculations. The results are only approximate.

2 A THEORETICAL ASSUMPTION USED IN MAKING THE MODEL

When making the model it was assumed that the workpiece would be fixed by a flexible modular fixture to ensure that workpieces with different shapes could be clamped. The fixture and the workpiece are assumed to be rigid bodies.

2.1 Clamping principle

The clamping principle 3-2-1, which requires three locators on the first locating plane, two locators on the second locating plane and one locator on the third locating plane (Figure 2), was used for making the model.



2.2 The influence of clamping forces on the clamping scheme

The clamping force must be large enough and suitably oriented so that the workpiece's position does not change during machining due to the cutting forces. The clamping forces on the workpiece's are not allowed to create internal stresses and to damage or deform the workpiece surface. The permissible deformation may be such that after machining the product is within the specified tolerance values. The clamping forces always act towards the locators on which the workpiece is supported.

2.3 Cutting forces

The calculations of the cutting forces are made according to the neural network model for the simulation of cutting forces [7]. Analytical cutting-force modelling [2] is difficult due to the large number of interrelated machining parameters. Instead of attempting to find analytical relationships between

parametri s statistiko, je uporabljeno strojno učenje.

Izdelava modela temelji na izvedenih eksperimentalnih meritvah rezalnih sil pri frezanju.

Za modeliranje rezalnih sil so bile uporabljene usmerjene nevronske mreže (UNM) s tremi nivoji. Vsebovale so 11 nevronov v vhodni ravni in 3 nevrone v izhodni ravni. Pri preskusih se je število nevronov v skritem nivoju spreminjalo.

Učenje UNM je bilo izvedeno z naslednjimi parametri: material obdelovanca, trdota obdelovanca, premer orodja, tip ploščice, rezalna hitrost, podajanje, prečna in vzdolžna globina rezanja, obraba orodja, komponente rezalne sile. Med postopkom učenja so bili UNM posredovani tudi želeni izhodi (tri komponente rezalne sile). Učenje UNM je bilo izvedeno z neobdelanimi eksperimentalnimi podatki, pri čemer je bilo uporabljenih 3500 popolnih učnih primerov.

3 MODEL ZA ANALIZO IN OPTIMIRANJE VPENJALNIH PRIPRAV

Razvit model je uporaben pri snovanju vpenjalnih priprav, saj lahko v kratkem času rutinsko določi optimalne velikosti, smeri in prijemališča vpenjalnih in podpornih sil za različne vpetostne primere. Naloga modela je, da preveri (analizira) dobljeno rešitev (konfiguracijo vpenjalne priprave), jo potrdi oziroma zavrne, če niso izpolnjeni vsi zastavljeni pogoji.

Namen modela je izboljšati izvedbo vpenjalne priprave in s tem povečati geometrijsko natančnost izdelanega tankostenega izdelka. Pomembno je upoštevati rezalne sile in vpenjalne sile ter izmere in razpoložljivost vpenjal, kakor tudi delovni prostor na stroju, ki omejuje možnosti vpetja.

Pri izdelavi programa FIXAN je bilo znanje izbrano iz literature (proizvajalci vpenjal) in od izvedencev iz prakse v proizvodnji. Pomemben vir znanja so že izdelani in preverjeni tehnološki postopki.

Stroški za načrtovanje in izdelavo vpenjalne priprave znašajo tudi do 15% celotnih proizvodnih stroškov [6]. Nadalje, če se pozicioniranje in fiksiranje izdelka ne da izvesti z zmernimi stroški, ali ne zadostimo zahtevam postopka, potem postopek obdelave ni upravičen. Zmanjševanje stroškov in časa za načrtovanje postopka vpenjanja je največje gonilo za sistematično načrtovanje vpenjalnih priprav.

Program FIXAN določa (sl. 3):

- minimalno število in položaj podpornih in vpenjalnih elementov,
- gibanje, ki ga dovoljujejo podporni elementi,
- reakcije na mestih stika "obdelovanec-vpenjalna priprava" (podporne sile),
- minimalne vpenjalne sile, potrebne za uravnoteženje rezalnih sil.

the machining parameters using statistics, machine learning is used.

The development of the model is based on the measurements of cutting forces during milling.

For modeling the cutting forces, three-layer feed-forward artificial neural networks (ANNs) were used. They contained 11 neurons in the input layer, and 3 in the output layer. The number of neurons in the hidden layer was varied in the experiments.

The ANNs were trained with the following parameters: type of machined material, hardness of the machined material, cutting tool diameter, type of insert, cutting speed, feed, radial and axial depth of cutting, tool wear, and components of cutting force. The desired outputs (the three cutting-force components) of the network also being supplied during training. Training of the ANN was made with raw experimental data from 3500 full training examples.

3 PRESENTATION OF THE MODEL FOR THE ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF FIXTURES

The developed model is useful for designing fixtures since it can routinely determine, within a short time, the optimum sizes, the direction and the application points of clamping and locating forces for different cases of clamping. The model is aimed at verifying (analysing) the obtained solution (configuration of the fixture), confirming or rejecting it, if all the set conditions are not fulfilled.

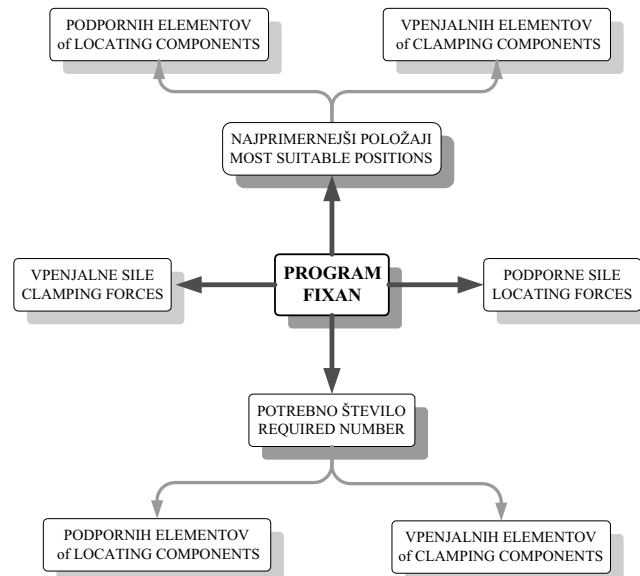
The purpose of the model is to improve the design of the fixture and thus to increase the geometrical accuracy of the thin-wall product. It is important to consider the cutting forces, the clamping forces and the dimensions and availability of fixtures as well as the space on the machine, which limits the possibility of clamping.

For working out the programme FIXAN, information was collected from the literature (makers of modular fixtures) and from experts in production practice. The technological procedures already worked out and verified are an important source of information.

The designing and manufacturing costs of the fixture amount to as much as 15% of the total production costs [6]. Further more, if the positioning and fixing of the product cannot be carried out with moderate costs or if the requirements of the process are not satisfied, the machining process is not justified. The reduction of the costs and the time to design the fixing process is the greatest motivating force for the systematic design of fixtures.

The FIXAN program determines (Figure3):

- the minimum number and position of the locating and clamping elements,
- the motion allowed by the locating elements,
- the reactions at the places of the "workpiece-fixture" contact (locating forces),
- the minimum clamping forces required for balancing the cutting forces.



Sl. 3. Shematski prikaz nalog v programu FIXAN
 Fig. 3. Representation of the tasks in the FIXAN program

3.1 Teoretična zasnova modela za analizo in optimiranje vpenjalnih priprav

Stvari postanejo močno zapletene, kadar upoštevamo sile trenja med obdelovancem in elementi vpenjalne priprave.

Obdelovanec je podprt na šestih točkah P_1 - P_6 in vpet s tremi vpenjalnimi silami F_{vp_1} , F_{vp_2} , F_{vp_3} v točkah P_7 , P_8 , P_9 (sl. 4).

Kjer so:

F_1, \dots, F_6 - reakcije, ki delujejo na podporne elemente (N),
 $F_{vp_1}, F_{vp_2}, F_{vp_3}$ - vpenjalne sile, ki delujejo v smeri normale na pozicionirne ravnine (N),

F_x, F_y, F_z - komponente rezalne sile F_c (N),

M_x, M_y, M_z - komponente rezalnega momenta M_c (Nm),

f_i ($i=1\dots9$) - rezultirajoče sile trenja v stičnih točkah (N),

F_g - sila teže obdelovanca (N),

μ - koeficient trenja.

3.1. Theoretical concept of the model for the analysis and the optimization of fixtures

The scene is much more complex when frictional forces between the workpiece and fixture elements are taken into account.

The workpiece is located on the six points P_1 - P_6 and is held by three clamping forces F_{vp_1} , F_{vp_2} , F_{vp_3} at points P_7 , P_8 , P_9 (Figure 4).

Where:

F_1, \dots, F_6 - reactions acting on locating elements (N),
 $F_{vp_1}, F_{vp_2}, F_{vp_3}$ - clamping forces acting in the direction of the normal on to positioning planes (N),

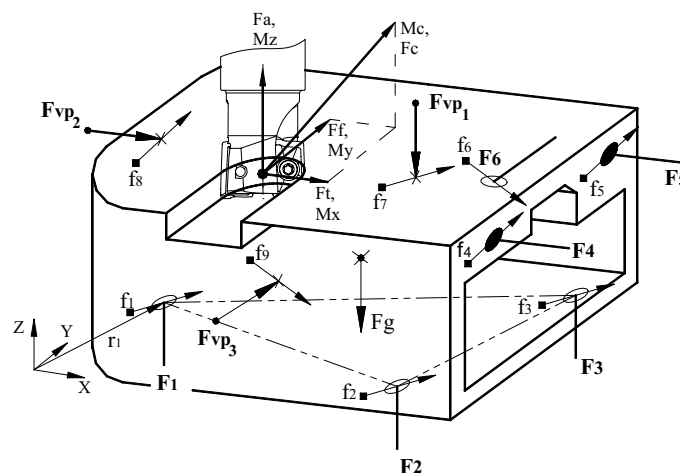
F_x, F_y, F_z - components of cutting force F_c (N),

M_x, M_y, M_z - components of cutting moment M_c (Nm),

f_i ($i=1\dots9$) - resulting frictional forces in contact points (N),

F_g - force of workpiece weight (N),

μ - friction coefficient.



Sl. 4. Sile na obdelovancu med postopkom freziranja
 Fig. 4. Forces on the workpiece during the milling process

Rezultirajoča sila trenja f_i med lokatorjem in obdelovancem je $\mu \cdot F_i$ in med vpenjalnim elementom in obdelovancem $\mu \cdot F_{vpj}$, ($j = 1...3$). Reakcije na podpornih elementih morajo biti pozitivne, ker se v nasprotnem primeru izgubi stik med obdelovancem in elementi vpenjalne priprave.

3.2 Ravnotežne enačbe

Za dosego statičnega ravnotežja in dimenzijske natančnosti pri obdelavi morata biti rezultirajoča sila in moment na obdelovancu enaka nič. Ravnotežne enačbe so:

$$\left(\sum_{i=1}^6 F_i \right)_x - R_x = \left(\sum_{i=1}^6 F_i \right)_y - R_y = \left(\sum_{i=1}^6 F_i \right)_z - R_z = 0 \quad (1)$$

$$\left(\sum_{i=1}^6 (F_i \times r_i) \right)_x - M_x = \left(\sum_{i=1}^6 (F_i \times r_i) \right)_y - M_y = \left(\sum_{i=1}^6 (F_i \times r_i) \right)_z - M_z = 0 \quad (2)$$

kjer so:

r_i - vektorji, ki definirajo podpore točke,
 R_x, R_y, R_z - komponente rezultirajoče rezalne sile F_c .

3.3 Matrične ravnotežne enačbe za izračun podpornih sil

Zaradi numeričnega reševanja problema so ravnotežne enačbe zapisane v matrični obliki:

$$[A]_{lok} \cdot [F]_{lok} + [w_e] = 0 \quad (3)$$

Geometrijska matrika $[A]_{lok}$ je enaka:

$$[A]_{lok} = \begin{bmatrix} f_{1x} & f_{2x} & f_{3x} & -1 & -1 & f_{6x} \\ f_{1y} & f_{2y} & f_{3y} & f_{4y} & f_{5y} & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -f_{4z} & -f_{5z} & -f_{6z} \\ \hline r_{1y} & r_{2y} & r_{3y} & \begin{pmatrix} -f_{4y} \cdot r_{4z} - \\ -f_{4y} \cdot r_{4y} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -f_{5y} \cdot r_{5z} - \\ -f_{5z} \cdot r_{5y} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -f_{6z} \cdot r_{6y} + \\ +r_{6z} \end{pmatrix} \\ -r_{1x} & -r_{2x} & -r_{3x} & \begin{pmatrix} -r_{4z} + \\ +f_{4z} \cdot r_{4x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -r_{5z} + \\ +f_{5z} \cdot r_{5x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} f_{6x} \cdot r_{6z} + \\ +f_{6z} \cdot r_{6x} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} -f_{1x} \cdot r_{1y} + \\ +f_{1y} \cdot r_{1x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -f_{2x} \cdot r_{2y} + \\ +f_{2y} \cdot r_{2x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -f_{3x} \cdot r_{3y} + \\ +f_{3y} \cdot r_{3x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} r_{4y} + \\ +f_{4y} \cdot r_{4x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} r_{5y} + \\ +f_{5y} \cdot r_{5x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -r_{6x} - \\ -f_{6x} \cdot r_{6y} \end{pmatrix} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Vektor podpornih sil $[F]_{lok}^T$:

The vector of supporting forces $[F]_{lok}^T$:

$$[F]_{lok}^T = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4 \ F_5 \ F_6] \quad (5)$$

Vektor zunanjih sil $[w_e]$:

The vector of external forces $[w_e]$:

$$[w_e] = \begin{bmatrix} f_{7x} + f_{9x} + F_{vp2} + R_x \\ f_{7y} + f_{8y} + F_{vp3} + R_y \\ -f_{8z} - f_{9z} - F_g + R_z \\ -f_{7y} \cdot r_{7z} - f_{8y} \cdot r_{8z} - f_{8z} \cdot r_{8y} - f_{9z} \cdot r_{9y} - F_{vp1} \cdot r_{7y} - F_{vp3} \cdot r_{9z} - F_g \cdot r_{gy} + M_x \\ f_{7x} \cdot r_{7z} + f_{8z} \cdot r_{8x} + f_{9x} \cdot r_{9z} + f_{9z} \cdot r_{9x} + F_{vp1} \cdot r_{7x} + F_{vp2} \cdot r_{8z} + F_g \cdot r_{gx} + M_y \\ -f_{7x} \cdot r_{7y} + f_{7y} \cdot r_{7x} + f_{8y} \cdot r_{8x} - f_{9x} \cdot r_{9y} - F_{vp2} \cdot r_{8y} + F_{vp3} \cdot r_{9x} + M_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

The resulting force of the friction f_i between the locator and workpiece is $\mu \cdot F_i$ and between the fixing element and the workpiece it is $\mu \cdot F_{vpj}$, ($j = 1...3$). The reactions on the locating elements must be positive, because otherwise the contact between the workpiece and the fixture is lost.

3.2 Equations of equilibrium

To achieve static equilibrium and dimensional accuracy during machining the resulting force and moment on the workpiece must be zero. The equations of equilibrium are:

where:

r_i - the vectors defining the locating points
 R_x, R_y, R_z - components of the resulting cutting force F_c .

3.3 Matrix equilibrium equations for the calculation of locating forces

Because the problem is solved numerically the equilibrium equations are written in the matrix form:

Po vstavitvi geometrijske matrike $[A]_{lok}$ in vektorja zunanjih sil $[w_e]$ v enačbo (3) sledi:

After entering the geometrical matrix $[A]_{lok}$ and the vector of external forces $[w_e]$ into equation (3) the following is obtained:

$$[F]_{lok} = - \begin{bmatrix} f_{1x} & f_{2x} & f_{3x} & -1 & -1 & f_{6x} \\ f_{1y} & f_{2y} & f_{3y} & f_{4y} & f_{5y} & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -f_{4z} & -f_{5z} & -f_{6z} \\ \hline r_{1y} & r_{2y} & r_{3y} & \begin{pmatrix} -f_{4y} \cdot r_{4z} - \\ -f_{4y} \cdot r_{4y} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -f_{5y} \cdot r_{5z} - \\ -f_{5y} \cdot r_{5y} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -f_{6z} \cdot r_{6y} + \\ +r_{6z} \end{pmatrix} \\ -r_{1x} & -r_{2x} & -r_{3x} & \begin{pmatrix} -r_{4z} + \\ +f_{4z} \cdot r_{4x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -r_{5z} + \\ +f_{5z} \cdot r_{5x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} f_{6x} \cdot r_{6z} + \\ +f_{6z} \cdot r_{6x} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} -f_{1x} \cdot r_{1y} + \\ +f_{1y} \cdot r_{1x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -f_{2x} \cdot r_{2y} + \\ +f_{2y} \cdot r_{2x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -f_{3x} \cdot r_{3y} + \\ +f_{3y} \cdot r_{3x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} r_{4y} + \\ +f_{4y} \cdot r_{4x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} r_{5y} + \\ +f_{5y} \cdot r_{5x} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} -r_{6x} - \\ -f_{6x} \cdot r_{6y} \end{pmatrix} \end{bmatrix} \cdot \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} f_{7x} + f_{9x} + F_{vp2} + R_x \\ f_{7y} + f_{8y} + F_{vp3} + R_y \\ -f_{8z} - f_{9z} - F_g + R_z \\ -f_{7y} \cdot r_{7z} - f_{8y} \cdot r_{8z} - f_{8z} \cdot r_{8y} - f_{9z} \cdot r_{9y} - F_{vp1} \cdot r_{7y} - F_{vp3} \cdot r_{9z} - F_g \cdot r_{gy} + M_x \\ f_{7x} \cdot r_{7z} + f_{8z} \cdot r_{8x} + f_{9x} \cdot r_{9z} + f_{9z} \cdot r_{9x} + F_{vp1} \cdot r_{7x} + F_{vp2} \cdot r_{8z} + F_g \cdot r_{gx} + M_y \\ -f_{7x} \cdot r_{7y} + f_{7y} \cdot r_{7x} + f_{8y} \cdot r_{8x} - f_{9x} \cdot r_{9y} - F_{vp2} \cdot r_{8y} + F_{vp3} \cdot r_{9x} + M_z \end{bmatrix}$$

Kadar je koeficient trenja med obdelovancem in vpenjalnimi elementi enak nič, se zgornja enačba poenostavi in dobi naslednjo obliko:

When the coefficient of friction between the workpiece and the clamping elements is equal to zero, the above equation is simplified and assumes the following form:

$$[F]_{lok} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline r_{1y} & r_{2y} & r_{3y} & 0 & 0 & +r_{6y} \\ -r_{1x} & -r_{2x} & -r_{3x} & -r_{4z} & -r_{5z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{4y} & r_{5y} & -r_{6x} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F_{vp2} + R_x \\ F_{vp3} + R_y \\ F_g + R_z \\ -F_{vp1} \cdot r_{7y} - F_{vp3} \cdot r_{9z} - F_g \cdot r_{gy} + M_x \\ F_{vp1} \cdot r_{7x} + F_{vp2} \cdot r_{8z} + F_g \cdot r_{gx} + M_y \\ F_{vp2} \cdot r_{8y} + F_{vp3} \cdot r_{9x} + M_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.4 Iskanje ustrezne vpenjalne razporeditve in vpenjalnih sil

3.4 Searching for the appropriate fixing configuration and clamping forces

Zaradi sil trenja je število neznank v sistemu večje od števila ravnotežnih enačb, zato sistem ni vedno rešljiv. Sistem ima netrivialno rešitev takrat, ko je determinanta matrike različna od nič. Postopek izračuna vpenjalnih sil se poenostavi z iteracijskim načinom reševanja matrične enačbe. Z iteracijsko metodo rešimo enačbo (3), s čimer izračunamo minimalne potrebne vpenjalne sile. Iteracija se začne z začetno vrednostjo vpenjalnih sil $F_{vpj} = 0; j = 1, 2, 3$, potem se ta vrednost postopoma koračno večja, dokler vse sile F_i niso pozitivne. Na tak način pridemo do osnovne rešitve problema. Osnovno rešitev je mogoče optimirati takole:

Because of frictional forces the number of unknown variables in the system is far larger than the number of equilibrium equations, therefore, the system is not always solvable. The system has a non-trivial solution when the determinant of the system is other than zero. The procedure for calculating the clamping forces is simplified by the iteration method of solving the matrix equation. By using the iteration method equation (3) is solved and the minimum required clamping forces are calculated. The iteration starts with the initial value of the clamping force $F_{vpj} = 0; j = 1, 2, 3$, afterwards, this value gradually increases incrementally until all the forces F_i are positive. In this way we reach the basic-fundamental solution of the problem. The basic solution can be optimised in this following way:

Prvi vpenjalni sili se priredi vrednost osnovne rešitve, preostalim pa se postopoma koračno zvišuje

The value of the basic solution is adapted to the first clamping force whereas the values of the

vrednost, dokler vse izračunane podporne sile niso pozitivne. Nato se postopek ponovi za vsako vpenjalno silo.

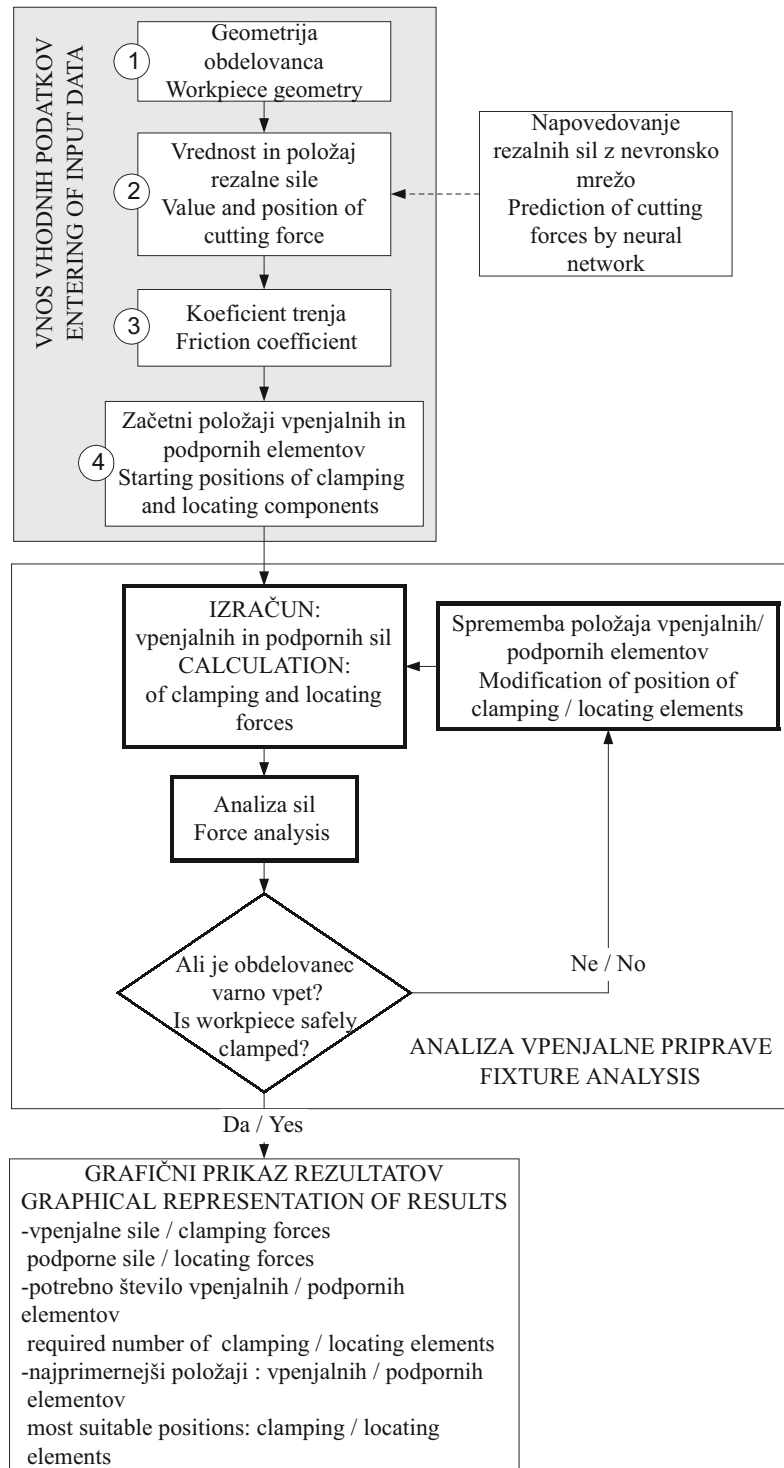
others are gradually increased incrementally until all the calculated locating forces are positive. The procedure is then repeated for each clamping force.

3.5 Grafični prikaz poteka dela v programu FIXAN

3.5 The graphical representation of the process of work in the FIXAN program

Slika 5 prikazuje zaporedje korakov, ki jih je treba izvesti pri iskanju optimalne vpenjalne sheme.

Figure 5 shows the sequence of steps to be taken when searching for the optimum clamping scheme.



Sl. 5. Definicija programskih korakov v programu FIXAN
Fig. 5. The definition of the program steps in the FIXAN program

Program zahteva v korakih (1 do 4) ročen vnos začetnih (želenih) položajev vpenjalnih/podpornih elementov ter vrednosti rezalnih sil, koeficienta trenja in teže obdelovanca. Začetne položaje komponent priprave določi operater glede na izkušnje, geometrijo obdelovanca in operacijo obdelave.

V primeru nerodne izbire položajev komponent vpenjalne priprave, ko program z variranjem vrednosti vpenjalnih sil ni zmožen zagotoviti učinkovite vpenjalne sheme, avtomatično spremeni koordinate posameznim vpenjalnim ali podpornim elementom.

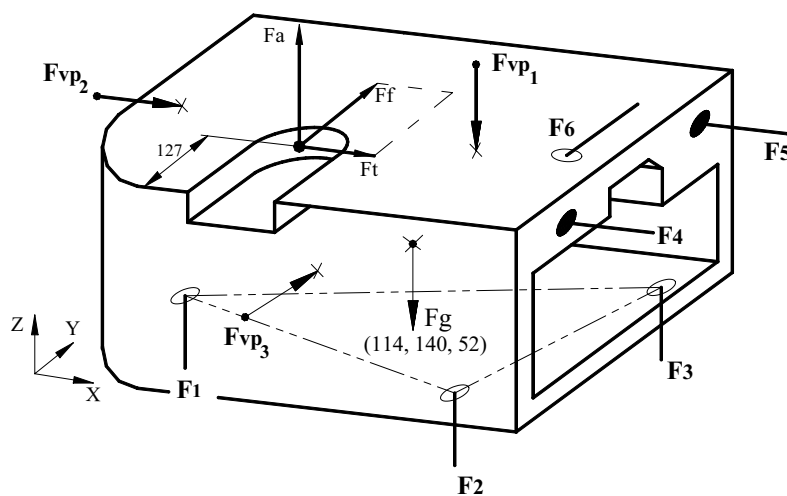
Elemente priprave razporedi okrog obdelovanca tako, da je ta varno vpet z minimalnimi potrebnimi vpenjalnimi silami.

4 PRIMER ANALIZE IN OPTIMIRANJA VPENJALNE SCHEME

Na številsko krmiljenem frezalnem stroju je treba izdelati utor, prikazan na sliki 6. Uporabimo frezalo s premerom 16 mm z dvema rezalnima ploščicama (R-216-16 03 M-M) pri naslednjih rezalnih pogojih: rezalna hitrost ($v = 25$ m/min), podajanje na zob ($f_z = 0,01$ mm/zob), globina rezanja ($a = 4$ mm). Material obdelovanca je jeklo z oznako Ck-45. Na podlagi formul, podanih v literaturi [7], so izračunane komponente rezalnih sil pri podanih rezalnih parametrih. Vrednosti komponent rezalnih sil ($F_a = 450$ N, $F_f = 315$ N, $F_t = 810$ N), položaj orodja, začetne položaje vpenjalnih/podpornih elementov, koeficient trenja ($\eta = 0,4$), in težo obdelovanca ($F_g = 47$ N) vstavimo v okno za vnos vhodnih podatkov.

4.1 Določitev vpenjalnih sil z iteracijo

Vpetje izvedemo s tremi vpenjalnimi elementi. Z zgornjim vpenjalnim elementom je vpet



položaji podpornih elementov:

positions for locators:

- 1 (38, 140, 0)
- 2 (165, 80,0)
- 3 (165, 241, 0)
- 4 (178, 102, 76)
- 5 (254, 188, 76)
- 6 (102, 254, 76)

položaji vpenjalnih elementov:

- 1 (122, 140, 100)
- 2 (25, 140,76)
- 3 (102, 25, 76)

položaj rezalne sile:
position of cutting force:
(76, 127, 96)

Sl. 6. Vpenjalna in podporna shema za izdelavo utora na prizmatičnem obdelovancu
Fig.6. Clamping and locating scheme for machining the slot on a prismatic workpiece

In steps (1 to 4) the programme requires manual entering of the starting (desired) positions of the clamping/locating elements and the values of the cutting forces, the friction coefficient and the workpiece's weight. The starting position of the fixture components are determined by the operator on the basis of experience, workpiece geometry and machining operation.

In the case of inappropriate selection of the fixture components, when the program is not capable of ensuring an efficient clamping scheme by varying the values of the clamping forces, it automatically changes the coordinates of the individual clamping or locating elements.

It arranges the clamping components around the workpiece so that the latter is safely clamped by the minimum required clamping forces.

4 EXAMPLE OF AN ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE CLAMPING SCHEME

On a NC milling machine it is necessary to make the slot shown in Figure 6. To this end we use a milling cutter of 16-mm diameter with two cutting inserts (R-216-16 03 M-M) and the following cutting conditions: cutting speed ($v = 25$ m/min), feedrate ($f_z = 0,01$ mm/tooth), cutting depth ($a = 4$ mm). The workpiece material is the steel Ck-45. The components of the cutting forces with the cutting parameters defined above are calculated on the basis of equations given in literature [7]. The values of the components of the cutting forces ($F_a = 450$ N, $F_f = 315$ N, $F_t = 810$ N), the tool position, the starting positions of the clamping/locating elements, the friction coefficient ($\eta = 0.4$) and the workpiece's weight ($F_g = 47$ N) are entered into the window for the input data.

4.1 Determination of clamping forces by iteration

Clamping is effected by the three clamping elements. With the upper clamping element the

obdelovanec v smeri osi Z, s stranskima pa je pritisnjen ob navpični pozicionirni ravnini. Enačba (3) dobi naslednjo obliko:

workpiece is clamped in the direction of the Z axis and with the two side elements it is pressed along the vertical locating plane. Equation (3) assumes the following form:

$$\begin{bmatrix} 0,373 & 0,373 & 0,373 & -1 & -1 & 0,194 \\ 0,145 & 0,145 & 0,145 & 0,229 & 0,229 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -0,328 & -0,328 & -0,35 \\ 5,512 & 1,496 & 9,488 & -2,002 & -3,112 & -0,505 \\ -1496 & -6,496 & -0,696 & -0,696 & 0,385 & 1,985 \\ -1,838 & 0,384 & -2,595 & 5,623 & 9,695 & -5,958 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0,373 \cdot F_{vp_1} + F_{vp_2} + 0,194 \cdot F_{vp_3} + 810 \\ 0,145 \cdot F_{vp_1} + 0,328 \cdot F_{vp_2} + F_{vp_3} + 315 \\ -0,459 \cdot F_{vp_2} - F_{vp_1} - 450 + 80 \\ -6,38 \cdot F_{vp_1} - 2,245 \cdot F_{vp_2} - 3,336 \cdot F_{vp_3} - 440,95 + 4501,57 \\ 7,034 \cdot F_{vp_1} + 3,218 \cdot F_{vp_2} + 1,985 \cdot F_{vp_3} + 6361,4 + 359,05 \\ -1,359 \cdot F_{vp_1} - 5,321 \cdot F_{vp_2} + 3,825 \cdot F_{vp_3} - 2910,63 \end{bmatrix}$$

Mogoče rešitve za F_{vp_i} so tiste, ki vodijo do pozitivnih vrednosti F_i ; z drugimi besedami, obdelovanec bo ostal med obdelavo v stiku s podpornimi elementi. Determinanta F_{loc} je negativna, zato obstaja netrivialna rešitev problema. Obstoj netrivialne rešitve pomeni, da je konfiguracija vpenjalne priprave sprejemljiva. Za rešitev šestih simultanih linearnih ravnotežnih enačb z devetimi neznankami predpostavimo, da imajo F_{vp_1} , F_{vp_2} , in F_{vp_3} enake vrednosti. Vrednosti teh treh spremenljivk so na začetku enake 0, nato se z nespremenljivim korakom v vsaki iteraciji stopnjujejo do vrednosti, pri katerih so vse sile F_i pozitivne.

The possible solutions for F_{vp_i} s are those that result in positive values of F_i s; in other words, the workpiece will remain in contact with the locators during the entire cutting process. The determinant of F_{loc} is other than zero, therefore, a non-trivial solution exists. The existence of the non-trivial solution implies that the clamping fixture configuration is acceptable. To solve these six linear simultaneous equilibrium equations with nine unknowns, we assume that F_{vp_1} , F_{vp_2} and F_{vp_3} have the same magnitude. Their values start from zero and are incremented by a constant value in each iteration until positive values of all F_i s are achieved.

Dobljene vrednosti sil F_{vp_1} , F_{vp_2} in F_{vp_3} , ki so enake 440N, bodo prvi niz sprejemljivih rešitev, ki so navedene kot primer (1) v preglednici 1.

The obtained values of F_{vp_1} , F_{vp_2} and F_{vp_3} , which are equal to 440N, will be the first set of possible solutions, which are listed as case (1) in Table 1.

Preglednica 1. Reakcije na podpornih elementih, ki so posledica različnih načinov vpetja obdelovanca
Table 1. Reaction on the locating elements which results from different methods of workpiece clamping

Sile N Forces N	(1) primer / case	(2)	(3)	(4)	(5)
F_{vp_1}	440	430	440	410	0
F_{vp_2}	440	440	440	220	320
F_{vp_3}	440	440	0	0	0
F_1	2,14	0,967	125,57	7,808	0,44
F_2	475,9	472,12	432,77	249,644	396,842
F_3	693,7	688,765	613,25	419,354	643,647
F_4	826,0	823,769	652,30	539,109	618,558
F_5	673,5	672,009	761,73	590,891	564,291
F_6	962,9	961,526	522,97	419,862	446,534

4.2 Racionalizacija zasnove vpenjalne priprave

Preglednica 1 prikazuje vrednosti reakcij F_i ($i = 1$ do 6) na podpornih elementih in mogoče rešitve za F_{vp_i} pri različnih primerih vpetja. Primer (1) prikazuje prvo sprejemljivo rešitev, pri kateri so vse vpenjalne sile enake (440 N). Pri drugih primerih (2 in 3) priredimo dvema vpenjalnima silama vrednost 440 N, medtem ko vrednost tretje vpenjalne sile postopoma večamo, dokler ne postanejo vsi F_i pozitivni.

S takim postopkom zmanjšamo vrednost potrebnih vpenjalnih sil, pri čemer pa ostane obdelanec vseskozi v stiku z elementi vpenjalne priprave. Vrednosti vpenjalnih sil, ki jih dobimo v primeru (5), so boljše kakor v primeru (1). V primeru (3) vpenjalni element 3 ni potreben, saj je sila na ta element enaka 0 ($F_{vp_3} = 0$). Program vedno predlaga dve optimalni rešitvi konfiguracije vpenjanja (primer 4 in 5), med katerima lahko uporabnik izbira.

Vpliv vpenjalnih sil F_{vp_1} , F_{vp_2} in F_{vp_3} na vrednosti reakcij podpornih elementov med frezanjem prikazuje slika 7. Z večanjem vpenjalne sile, po pričakovanjih, se večajo tudi vrednosti reakcij na podpornih elementih. Kritično mesto vpenjalne priprave je pri podpornem elementu 1. Pri obdelavi bo obdelanec najprej zgubil stik z vpenjalno pripravo prav na tem mestu (P_1).

Razpored vpenjalne priprave je mogoče izboljšati:

- s postavitvijo dodatnega vpenjalnega elementa nad kritični podporni element 1,
- povečati velikost vpenjalne sile F_{vp_3} ali spremeniti položaj vpenjalnega elementa 7.

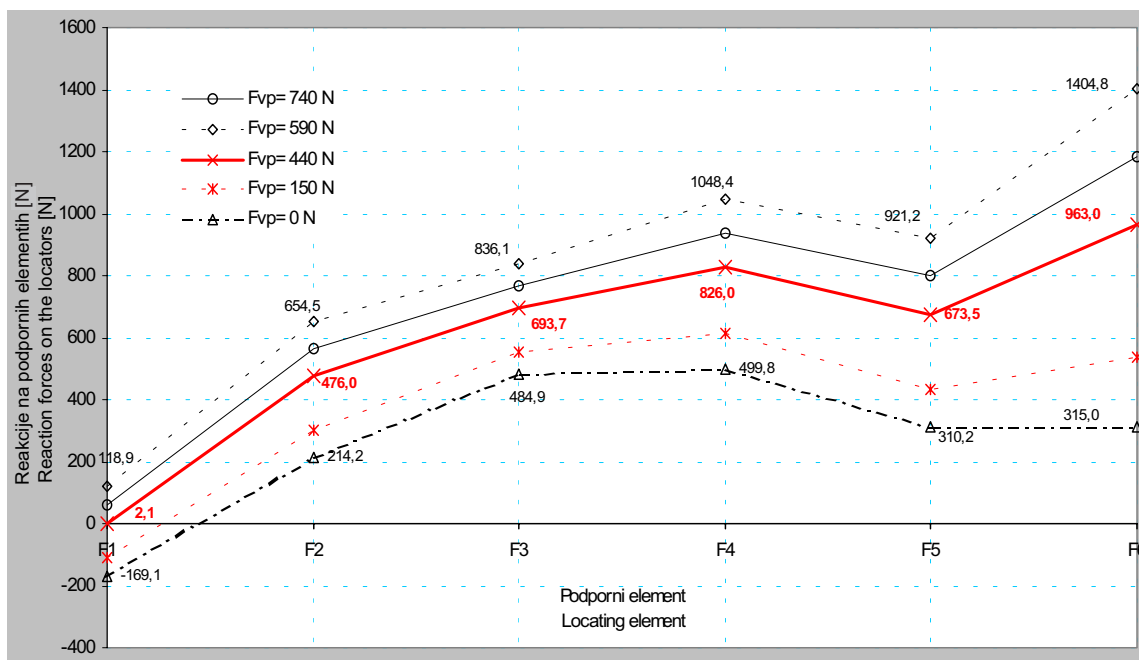
4.2 Rationalization of fixture design

Table 1 lists the reaction forces F_i ($i = 1$ to 6) on the six locators and the possible solutions for F_{vp_i} under different clamping conditions. The case (1) shows the first acceptable solution where all the clamping forces are equal (440 N). For the other cases (case 2 and 3) two of the clamping forces are set to a value of 440N, while the value of the third clamping force is gradually increased until all F_i s are positive.

With such a procedure the value of the required clamping forces is reduced, while the workpiece remains in contact with the fixture components at all times. The values of the clamping forces obtained in case (5) are more adequate than in case (1). In case (3) the clamping element 3 is not necessary, since the force acting on that element is equal to 0 ($F_{vp_3} = 0$). The program proposes the optimum solutions of the clamping configuration (case 4 and 5) from which the user can choose.

The influence of the clamping forces F_{vp_1} , F_{vp_2} , F_{vp_3} on the values of the reactions of the locating elements during milling is shown in Figure 7. If the clamping forces are increased, the values of the reactions on the locating elements are also expected to increase. The critical point of the fixture is on the locating element 1. During machining the workpiece will first lose contact with the clamping device just at that point (P_1).

- The fixture configuration can be improved by:
- placing on additional clamping element above the critical locating element 1,
 - increasing the value of the clamping force F_{vp_1} or changing the position of the clamping element 7.



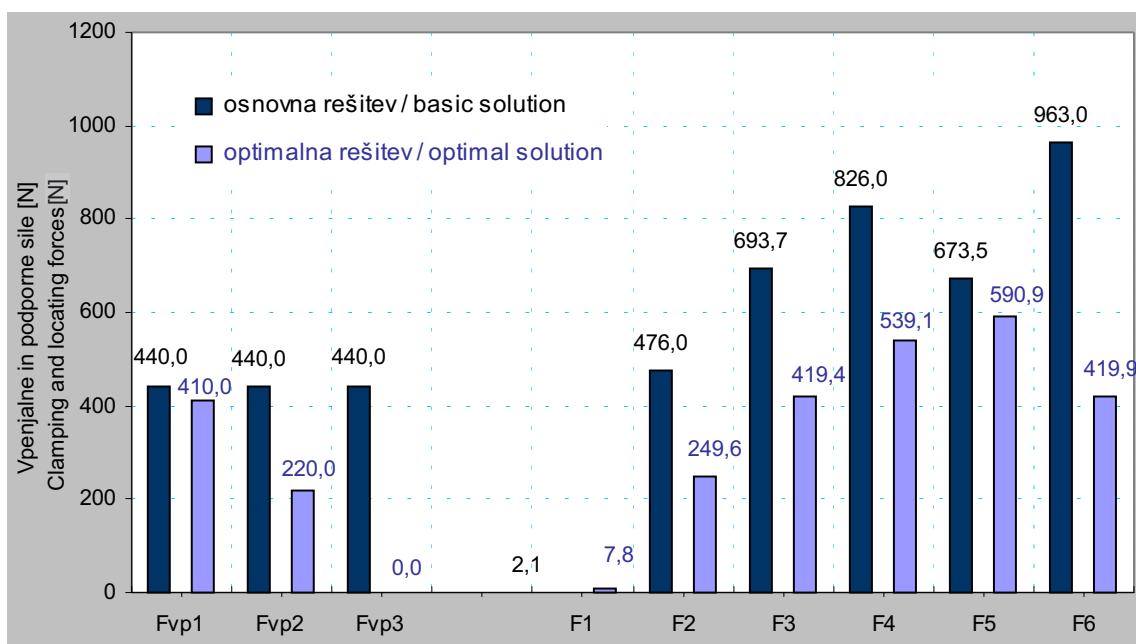
Sl. 7. Prikaz reakcij na lokatorjih v različnih razmerah vpenjanja
Fig. 7. Representation of the reactions of locators under different clamping conditions

Pri vpenjalni sili $F_{vp} = 0\text{N}$ do $F_{vp} = 440\text{N}$ konfiguracija vpenjalne priprave v danih razmerah obdelave ni primerna za vpenjanje obdelovanca. Obdelovanec bo varno vpet med obdelavo takrat, ko bo vpenjalna sila večja ali enaka 440N (odebeljena črta na sliki 7). Največja obremenitev vpenjalne naprave je na mestu podpornega elementa 6. Ta prevzame med obdelavo v položajni ravnini XZ vse obremenitve, ki delujejo v smeri osi Y .

Predlagane in analizirane vpenjalne primere (1 in 4) prikazuje slika 8.

With clamping force $F_{vp}=0\text{N}$ up to $F_{vp}=440\text{N}$ the clamping fixture configuration is not suitable for clamping the workpiece in the given conditions of machining. The workpiece will be safely clamped during machining, when the clamping force is higher than, or equal to, 440N (thickened line in Figure 7). The maximum loading of the clamping fixture occurs at the point of the locating element 6, which, during machining in the locating plane XZ , takes all loadings acting in the direction of the Y axis.

The proposed and analysed clamping cases (1 and 4) are shown in Figure 8.



Sl. 8. Primerjava vpenjalnih primerov
Fig. 8. Comparison of clamping cases

S programom FIXAN je mogoče s primerno izbiro in postavitvijo vpenjalnih elementov izboljšati razpored vpenjalne priprave.

5 ANALIZA REZULTATOV MODELA

S testiranjem je bila potrjena pravilnost rezultatov modela. Odstopanje napovedanih sil od dejanskih je nekoliko večje le pri zelo majhnem koeficientu trenja ($0,01 \leq \mu \leq 0,2$) med obdelovancem in vpenjalno pripravo. Odstopanje napovedanih rezultatov smo poskušali kompenzirati v samem matematičnem modelu, vendar izvedeni popravki niso pomembno izboljšali vrednosti napovedanih sil. Potreben popravek je bil zato izveden z vpeljavo nevronske mreže v model (sl. 9). Z uporabo UNM zajamemo vse vplivne faktorje, ki niso upoštevani v ravnotežni matrični enačbi.

Postopek izračuna, ki je prikazan na sliki 9, je naslednji:

By using the FIXAN program it is possible to improve the clamping fixture configuration by rational selection and by the placing of the clamping elements.

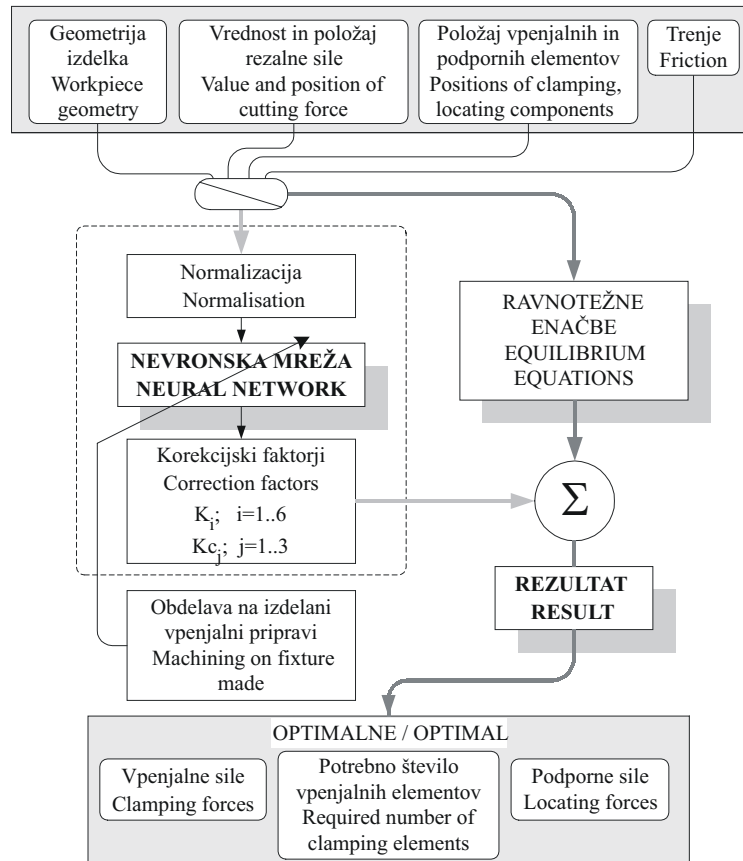
5 ANALYSIS OF RESULTS OBTAINED BY THE MODEL

The tests confirmed the correctness of the results of the model. The deviation of the predicted forces from the actual forces is slightly greater only in the case of a very small coefficient of friction ($0,01 \leq \mu \leq 0,2$) between the workpiece and the fixture. We tried to compensate for the deviation of the predicted results in the mathematical model, but the corrections did not significantly improve the values of the predicted forces. Therefore the required correction was made by introducing the ANN into the model (Figure 9). By using the ANN all the influencing factors, not taken into account in the equilibrium matrix equation, are included.

The process of the calculation shown in Figure 9 is as follows:

Najprej po matrični enačbi (7) določimo približne vrednosti vpenjalnih /podpornih sil. Te vrednosti nato popravimo s korekcijskimi parametri K_i , Kc_j , ki jih posreduje predhodno naučena nevronska mreža.

First, the approximate values of the clamping/locating forces are determined according to equation (7). These values are then corrected by the correction parameters K_i , Kc_j , specified by the previously trained neural network.



Sl. 9. Shematski prikaz delovanja opisane modela
Fig. 9. Schematic representation of functioning of the described model

Uporabljena je usmerjena nevronska mreža s petimi nivoji. Vsebuje 18 nevronov v vhodnem nivoju in 9 nevronov v izhodnem nivoju. Vhodni vektor sestoji iz: komponent rezalnih sil, koordinat mesta obdelave, koordinat položaja vpenjalnih in podpornih elementov, teže obdelovanca in koeficienta trenja. Izhodni vektor vsebuje 9 korekcijskih faktorjev, s katerimi so pomnožene vrednosti izračunanih sil.

Želeni izhodi (devet vpenjalnih/podpornih sil) so bili tudi posredovani UNM med postopkom učenja. Učenje UNM je bilo izvedeno z eksperimentalnimi podatki, pri čemer je bilo uporabljenih 80 učnih primerov. Za testiranje naučene mreže je bilo uporabljenih še dodatnih 40 testnih primerov. Podatki za testiranje in učenje so pridobljeni z eksperimentalnimi meritvami na že izdelanih vpenjalnih pripravah.

Z uvedbo UNM se je natančnost napovedanih sil izboljšala za 32% pri $\mu \leq 0,3$ in za 2% pri $\mu > 0,3$. Povprečna napaka napovedi je

A five-layer feed-forward neural network was used. It contains 18 neurons in the input layer, and 9 in the output layer. The input vector consists of: components of the cutting forces, the coordinates of the point of machining, the coordinates of the position of the clamping and supporting parts, the workpiece's weight and the friction coefficient. The output vector contains nine corrections factors by which the values of the calculated forces are multiplied.

The desired outputs (the nine clamping/locating forces) of the ANN are also supplied during training. Training of the ANN was made with the experimental data of 80 training examples. An additional 40 examples were used to test the trained network. The data for training and testing are obtained from the experimental measurements on the fixtures already made.

Due to the introduction of the ANN the accuracy of the predicted forces was improved by 32% in the case of $\mu \leq 0.3$ and by 2% in the case of $\mu > 0.3$. The average estimation error is about 7.4%,

približno 7,4%, kar je malo v primerjavi z 12,7-odstotno napako pri analitičnem modelu. Opisan postopek z uporabo UNM je hiter, preprost in učinkovit.

which is low compared to the 12,7% estimation error of the analytical model. The described procedure with the use of an ANN is fast, simple and efficient.

6 SKLEP

Z razvitim modelom smo pomembno skrajšali čas snovanja priprav (15%) ter dosegli večjo izdelovalno natančnost. Z opisanim sistemom je mogoče napovedati in preprečiti napake na obdelovancu med postopkom vpenjanja in obdelave. V raziskavi je ugotovljeno, da se z upoštevanjem trenja močno zmanjša vrednost potrebne vpenjalne sile kakor tudi število potrebnih vpenjalnih elementov. Razvit program FIXAN skrajša čas načrtovanja postopka obdelave. Omogoča izdelavo kakovostnih načrtov vpenjanja tudi manj izkušenim operaterjem.

6 CONCLUSION

With the developed model we have significantly reduced the time of producing the fixture (15%) and we have reached a greater manufacturing accuracy. With the described system it is possible to anticipate and prevent any defects on the workpiece during the clamping and machining process. During the research we found that by taking the friction into account the value of the required clamping force as well as the number of the required clamping elements decreased significantly. The FIXAN program reduces the planning time for the machining process; it even allows inexperienced operators to prepare high-quality clamping drawings.

7 LITERATURA

7 REFERENCES

- [1] Mittal, R.O. (1991) Dynamic modeling of the fixture-workpiece system. *Robotics Computer-Integr Mfg* 8, London, 201-217.
- [2] Čuš, F., J. Kopač (1998) Inclusion of geometrical shape of cutter into optimization of milling process. *Metall* 10/11, London, 602-610.
- [3] Ma, W., J. Li, Y. Rong (1999) Development of automated fixture planning system. *Int J Adv Manuf Technol* 15, London, 171-181.
- [4] Senthil, A., V. Subramaniam, K.C. Seow (1999) Conceptual design of fixtures using genetic algorithms. *Int J Adv Manuf Technol* 15, London, 79-84.
- [5] Li, Y., S.Y. Liang (1999) Cutting force analysis in transient state milling processes. *Int J Adv Manuf Technol* 15, London, 785-790.
- [6] Winbourne, J.P., C.M. Toolsie (1989) Computer-aided tool cost estimating. *In Proceedings of Computers in Engineering ASME*, 617-621.
- [7] Milfelner, M., F. Čuš (2000) System for simulation of cutting process. *International Scientific Conference on the Occasion of the 50th Anniversary of Founding the Faculty of Mechanical Engineering*, Ostrava.
- [8] Župerl, U. (2000) Development of systems for computer-aided design of modular fixtures. *Proceedings of the 11th International DAAAM*, Opatija.

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

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

Prejeto: 30.5.2001
 Received:

Sprejeto: 29.3.2002
 Accepted:

Meritev gibanja kolena z industrijskim robotom - avtomatska kompenzacija gravitacije prijemala

Measuring knee movement using an industrial robot - gravity compensation for the automatic gripper

Damir Omrčen - Bojan Nemeč

Poškodbe kolenskih vezi pri športnikih so dokaj pogoste. Za uspešno operacijo vezi je potrebno čim natančnejše poznavanje kolena ter kolenskih vezi. V tem prispevku so opisani postopki določitve geometrijskega modela gibanja kolena. Merjenje gibanja kolena smo izvedli z industrijskim robotom. Uporabili smo robota RIKO 106 s šestimi prostostnimi stopnjami, ki je voden s silo. Površine sklepov smo posneli z uporabo koordinatnega merilnika. Na podlagi meritev smo izdelali geometrijski model na osebнем računalniku s programskim paketom Matlab.

Med merjenjem robot upogiba koleno v določeni smeri, ne sme pa vplivati na naravno gibanje kolena. Zato moramo minimizirati sile in navorove, ki jih ustvari robot v kolenskem sklepu. V ta namen je treba kompenzirati tudi vplive gravitacije prijemala ter vplive merilnih odmikov zaznavala sile/navora. Med meritvijo krmilimo sile v kolenskem sklepu, zaznavalo sil pa je nameščeno v prijemalki robota, zato je treba izmerjene sile prevesti v koordinatni sistem kolenskega sklepa.

V prispevku je natančneje opisan avtomatski postopek za kompenzacijo teže prijemala in določitve merilnih odmikov. Opisana pa sta tudi postopka za preslikavo sil/navorov v kolenski sklep in postopek za določitev vrha orodja, kar potrebujemo pri meritvi.

© 2002 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: modeli kolena, prijemala, kompenzacija gravitacije, roboti medicinski, določitev vrha orodja)

Injuries to the knee ligaments are very common among athletes. Therefore, a thorough understanding of the knee and the knee ligaments is necessary for successful surgical operations on the ligaments. This paper describes procedures for determining of the geometrical model of the knee's movement. The movement of the knee was measured with a RIKO 106, force-controlled, six-degrees-of-freedom industrial robot. The surface of the knee joint was scanned with a coordinate-measuring machine and a geometrical model of the knee was developed on a PC. For the modelling we used a computer program called Matlab.

The robot should only bend the knee in a specified direction, and should not affect the natural movement of the knee. Therefore, we had to minimize the forces and torques in the knee joint that are caused by the robot. In order to do this, we had to compensate for the influence of gravity on the gripper and the sensor offsets. During the measurement we had to control the forces/torques in the knee joint. As the force/torque sensor was attached on the robot tip the measured forces/torque had to be mapped to the knee joint.

This paper more exactly addresses the automatic procedure for the gripper-weight compensation and the offset determination. It also explains the algorithm of the transformation of the forces/torques to the knee-joint coordinate system and the automatic determination of the tool's centre point.

© 2002 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: knee models, grippers, gravity compensation, medical robots, tool centre point)

0 UVOD

Poškodbe kolenskih vezi pri športnikih so dokaj pogoste. Devetdeset odstotkov vseh poškodb kolenskih vezi so poškodbe sprednje križne vezi (SKV) ter medialne kolateralne vezi (MKV) [1]. Poškodbe MKV se največkrat zacelijo same brez kirurškega

0 INTRODUCTION

Injuries to the knee ligaments are very common among athletes. Of all knee ligament injuries, 90 % are injuries to the anterior cruciate ligament (ACL) and the medial collateral ligament (MCL) [1]. The MCL heals without intervention; the ACL requires a

posega [2]. Pri poškodbah SKV pa je potreben kirurški poseg [2]. Eden glavnih problemov pri vsaditvi nadomestka SKV je, kako določiti primerno mesto za vsadek. Tega ne moremo vsaditi na mesto, kjer je poškodovani SKV. Primerna so tista mesta, kjer ostane dolžina nadomestka SKV med gibanjem enaka. Zato je za uspešno operacijo vezi potrebno čim natančnejše poznavanje kolena ter kolenskih vezi. V zadnjem času poteka vrsta raziskav na to temo ([2] do [6]). Mnogo raziskav poteka v smeri merjenja sil ter raztezkov v vezeh [4], kar je pripeljalo do sklepa, da se vezi kljub dokaj velikim silam le malo raztegujejo. Nekateri raziskovalci so se usmerili v raziskovanje kinematike kolena ([5] in [6]). S tem želijo ugotoviti natančno gibanje površin sklepov v kolenu. Poznavanje natančnega gibanja bo pripomoglo k boljšemu razumevanju kolena in posledično k uspešnim operacijam kolenskih vezi.

Ta prispevek opisuje uporabo industrijskega robota za testiranje *in vitro* kadaverskega kolena. Uporabljen je robot RIKO 106 s šestimi prostostnimi stopnjami, ki je voden s silo. Z robotom smo zelo natančno izmerili kinematiko neobremenjenega kolena. Na vrhu robota je nameščeno univerzalno zaznavalo sil in navorov, ki je zmožno merjenja treh sil in treh navorov. Za zagotavljanje želenih sil in navorov, ki jih ustvari robot v kolenskem sklepu, smo uporabili hibridno krmilno shemo. Sile, ki jih merimo z zaznavalom, moramo preslikati v kolenski sklep. Kompenzirati je treba tudi gravitacijo prijemala, saj teža prijemala povzroči, da sile v sklepu niso enake nič. Tudi merilni odmiki zaznavala sile vnašajo pogreške v meritev in jih moramo prav tako kompenzirati. Preslikava sil/navorov v kolenski sklep ter kompenzacija mase ter odklikov omogočajo večje sklenjenozančno ojačanje. S tem zmanjšamo pogreške pri sledenju želene sile/navora.

Površine sklepov smo posneli z uporabo koordinatnega merilnika MicroScribe. Dobljene podatke smo obdelali s programskim paketom Matlab, v katerem je bila izpeljana tudi grafična predstavitev gibanja kolena.

1 METODE

Namen postopka je ugotavljanje natančnega gibanja neobremenjenega kolena (slika 1). Gibanje je sestavljeno iz vrtenja ter premika in ga ne moremo zapisati s preprostimi matematičnimi funkcijami. Zato predlagamo eksperimentalno določitev gibanja z uporabo industrijskega robota s šestimi prostostnimi stopnjami, ki pa mora biti voden s silo.

Golenica je trdno pritrjena na mizo, stegenica pa je preko zaznavala sile pritrjena na vrh robota (sl. 2). Naloga robota je, da upogiba koleno od izravnane položaja (0°) do 110° , pri tem morajo biti sile in navori v sklepu enaki nič. Za vodenje robota s silo je uporabljena klasična hibridna krmilna shema sila-lega.

reconstruction. One of the main problems when implanting the ACL graft is how to determine a convenient place for the graft. Unfortunately, we cannot implant the graft in a place where an injured ACL is located. Convenient places are those where the length of the ACL graft remains constant during motion. Therefore, a thorough understanding of the knee and the knee ligaments is necessary for a successful surgical operation. A lot of research has been done on this topic recently ([2] to [6]). An analysis of the forces and the extensions in ligaments [4] led to the conclusion that ligaments extend just a little under high forces. Some researchers studied knee kinematics ([5] and [6]) and they determined the exact motion of the knee-joint surfaces. However, knowing the exact motion of the knee would contribute to a better understanding of the human knee and would result in more effective surgical operations on knee ligaments.

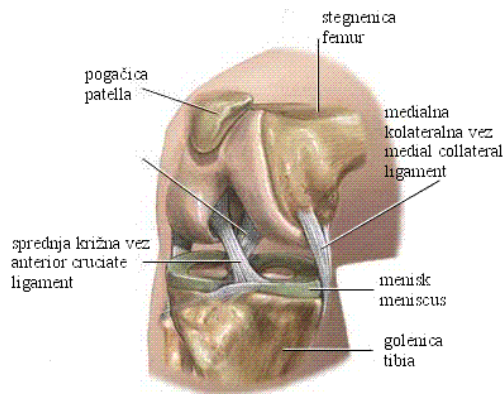
This paper describes the use of an industrial robot for *in vitro* tests on a cadaveric knee. We used a RIKO 106, force-controlled, six-degrees-of-freedom industrial robot to measure the exact kinematics of an unloaded knee. The robot tip was equipped with a universal force/torque sensor, which is capable of measuring three forces and three torques. To keep the desired forces and torques in the knee joint caused by the robot a hybrid force-position control method was used. The measured forces/torques had to be transformed to the knee-joint coordinate system. Additionally, we had to compensate for gravitational forces due to the gripper and the sensor offsets. The transformation of force/torque to the knee-joint coordinate system and the compensation of the gripper weight and offset allowed us to achieve a bigger closed-loop gain. This reduced the force/torque tracking errors.

We used the Matlab computer program for visualization, and the surface of the knee joint was scanned with the coordinate-measuring machine.

1 METHODS

Our aim was to determine the exact motion of the unloaded knee (Figure 1). This motion is a combination of rotation and translation and it cannot be expressed with simple analytical functions. We decided to determine the motion experimentally using a force-controlled robot with six degrees of freedom.

As shown in Figure 2 the tibia was attached to the table and the femur was attached to the force sensor on the robot tip. The robot had to move the knee from the straightened position (0°) to 110° and during the motion the forces and torques had to be kept as small as possible. To achieve this we applied the well-known hybrid force-position control method.



Sl. 1. Človeško koleno
Fig. 1. Human knee

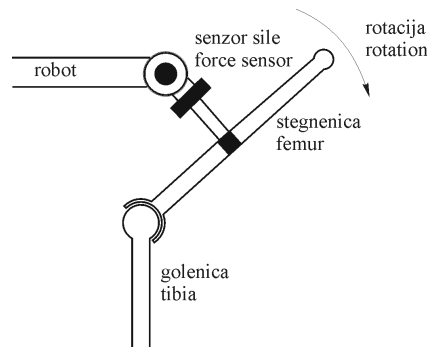
Ker teža prijemala vpliva na meritev sile, jo moramo kompenzirati pred začetkom meritve. Nato golenico trdno pritrdimo na mizo. Na golenico in stegnenico pritrdimo po tri kalibracijske točke. Z orodjem na vrhu robota izmerimo tri kalibracijske točke na golenici in jih zapišemo v koordinatnem sistemu baze robota. Prijemalo robota pripeljemo do stegenice in jo pritrdimo. Meritev poteka tako, da koleno najprej upognemo za 7° , nato minimiziramo sile in navore v kolenu ter izmerimo lego kolena. Postopek ponavljamo, dokler ne upognemo kolena od povsem izravnane do skrajne zelene lege. Pri upogibu kolena vodimo robota hitrostno v smeri upogibanja kolena, v preostalih petih smereh pa poteka krmiljenje sile. Pri minimizaciji sil in navorov preklapimo na krmiljenje sil in navorov v vseh smereh.

Po končani meritvi gibanja izmerimo še pozicije kalibracijskih točk na stegnenici glede na vrh robota. Iz teh podatkov in iz konfiguracij robota izračunamo položaje kalibracijskih točk med gibanjem kolena. Nato se lotimo meritve geometrijske oblike kolena.

Pred merjenjem geometrijske oblike površine sklepa najprej odstranimo vse tkivo ter vezi. Nato izmerimo koordinate mreže točk na površinah sklepov ter na prijemališčih SKV. Te točke so izražene v koordinatnem sistemu koordinatnega merilnika in jih moramo prenesti v koordinatni sistem baze robota, za to potrebujemo kalibracijske točke na golenici in stegnenici. S koordinatnim merilnikom izmerimo tudi koordinate kalibracijskih točk. Ta izračun poteka v programskem paketu Matlab, v katerem je realizirana tudi grafična predstavitev gibanja.

1.1 Preslikava sil/navorov iz koordinatnega sistema (k.s.) zaznavala sile v k.s. kolenskega sklepa

S na sliki 3 prikazuje koordinatni sistem senzorja sil, \mathbf{K} pa koordinatni sistem, ki je v središču kolenskega sklepa. Koordinatna sistema sta med seboj vzporedna in premaknjena za vektor \mathbf{p} . Zveza med silami \mathbf{F} in navori \mathbf{M} v obeh



Sl. 2. Vpetje golenice in stegenice
Fig. 2. Attachment of the tibia and femur

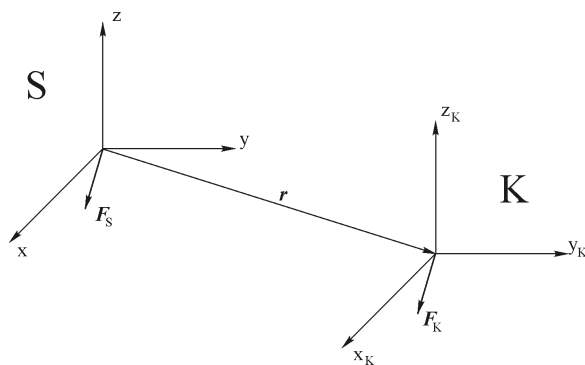
As the gripper's weight influences the force measurement it had to be compensated before the tibia was attached to the table. Next we had to determine the positions of the three calibration points that were fixed on the tibia. With the tool on the robot tip we measured the coordinates of the three calibration points in the robot-base coordinate system. Next, we had to move the gripper to the femur and attach the femur to the gripper. Then, the robot bent the knee by 7° . The next step was to minimize the forces and torques in the knee joint and to measure the position of the knee. The bending phase and force-minimizing phase were repeated until the knee reached the desired position (110°). In the bending phase the robot was velocity controlled in the direction of the knee rotation and in all other directions it was force controlled. In the force-minimization phase the forces were controlled in all directions.

After the measurement cycle we had to measure the coordinates of the calibration points on the femur in the robot-tip coordinate system. These data and the robot configurations data were used to calculate the positions of the calibration points during the knee motion. After the motion measurement the knee geometry had to be determined.

Before scanning the surface of the knee we had to remove all tissues and ligaments. The coordinate-measuring machine was used to measure the coordinates of points on the knee's surface and on the ACL grip. These coordinates were then transformed to the robot-base coordinate system. For this reason calibration points on the femur and tibia were needed, and these were also measured with the coordinate-measuring machine. The calculations and visualisation were made with the Matlab program.

1.1 Transformation of force/torque from the force sensor coordinate system (c.s.) to the knee joint c.s.

Figure 3 shows the coordinate system connected to the force sensor \mathbf{S} and the coordinate system connected to the centre of the knee joint \mathbf{K} . These two coordinate systems should be parallel to each other and translated. The vector \mathbf{p} is the translation



Sl. 3. Preslikava sil/navorov iz koordinatnega sistema zaznavala **S** v koordinatni sistem kolena **K**
 Fig. 3. Force/torque transformation from the force sensor coordinate system **S** to the knee c. s. **K**

koordinatnih sistemih **S** in **K** je:

between their origins. The relation between the forces **F** and the torques **M** in the coordinate system **S** and **K** are described by the following equations:

$$F_K = F_S \tag{1}$$

$$M_K = M_S - p \times F_S = M_S - \hat{p}F_S \tag{2}$$

kjer se $(\cdot)_S$ in $(\cdot)_K$ nanašata na izbrani koordinatni sistem, \hat{p} pa je operator vektorskega zmnožka, povezan z vektorjem **p**:

where $(\cdot)_S$ and $(\cdot)_K$ denote the particular coordinate system and \hat{p} is the cross-product operator associated with vector **p**:

$$\hat{p} = \begin{bmatrix} 0 & -p_z & p_y \\ p_z & 0 & -p_x \\ -p_y & p_x & 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Oznake $(\cdot)_x$, $(\cdot)_y$ ter $(\cdot)_z$ se v članku nanašajo na x, y ter z (\cdot) komponente vektorja.

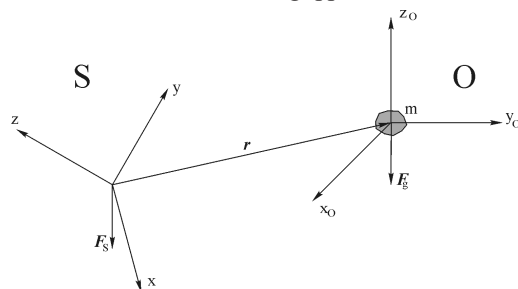
The notation $(\cdot)_x$, $(\cdot)_y$ and $(\cdot)_z$ stands for the x, y and z components of vector (\cdot) , respectively.

1.2 Avtomatska kompenzacija gravitacije

1.2 Automatic compensation for gravity

Pri neobremenjenem zaznavalu želimo, da so izmerjene sile/navori enaki nič, kar pa zaradi mase prijemala in zaznavala ni res. Te sile/navore moramo kompenzirati. Masa ter težišče prijemala in zaznavala sta znana le redko. Izračun pa je mnogokrat zapleten in ni primeren za praktične uporabe. Zato predlagamo določitev kompenzacijskih sil/navorov z meritvami. S predlaganim postopkom določimo maso in težišče prijemala in zaznavala ter tudi merilna odstopanja zaznavala.

In the case of an unloaded sensor the measured forces/torques should be equal to zero; however, due to the weight of the gripper and the sensor this is not the case and these forces/torques have to be compensated. The centre of gravity and the weight of the gripper and the sensor are rarely known. We could calculate the weight and the centre of gravity, which requires an exact knowledge of the geometry and materials; however, this calculation is often too complex and is not suitable for practical application. We propose to determine the compensation forces with measurements. Using this procedure we can determine the centre of gravity and the weight of the gripper and the sensor and also the sensor offset.



Sl. 4. Vpliv mase prijemala **m** na meritev sile/navora v zaznavalu **S**
 Fig. 4. Influence of the gripper weight on the measurement of force/torque by sensor **S**

\mathbf{R} naj pomeni robotovo rotacijsko matriko med k.s. \mathbf{S} in k.s. okolja \mathbf{W} , \mathbf{r} pa je vektor med njunima izhodiščema. Kompenzacijsko silo/navor izračunamo:

$$\mathbf{F}_{comp} = \mathbf{R}\mathbf{F}_g = [\mathbf{n} \ \mathbf{o} \ \mathbf{a}] \mathbf{F}_g = [\mathbf{n} \ \mathbf{o} \ \mathbf{a}] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{gz} \end{bmatrix} = \mathbf{a}F_{gz} \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_{comp} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}_{comp} = -\hat{\mathbf{F}}_{comp}\mathbf{r} \quad (5)$$

kjer so vektorji \mathbf{n} , \mathbf{o} , \mathbf{a} komponente matrike \mathbf{R} . F_g pomeni silo gravitacije, \mathbf{F}_{comp} in \mathbf{M}_{comp} pa kompenzacijsko silo in navor. $\hat{\mathbf{F}}_{comp}$ je operator vektorskega zmnožka glede na vektor \mathbf{F}_{comp}

$$\hat{\mathbf{F}}_{comp} = \begin{bmatrix} 0 & -F_{compz} & F_{compy} \\ F_{compz} & 0 & -F_{comp_x} \\ -F_{compy} & F_{comp_x} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Težava pri merjenju s temi zaznavali je tudi merilni odmik. Kompenzirano silo/navor dobimo z:

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{F}_{meas} - \mathbf{F}_{comp} - \mathbf{F}_{off} \quad (7)$$

$$\mathbf{M}_s = \mathbf{M}_{meas} - \mathbf{M}_{comp} - \mathbf{M}_{off} \quad (8)$$

kjer \mathbf{F}_{meas} , \mathbf{M}_{meas} , \mathbf{F}_{off} , \mathbf{M}_{off} označujejo izmerjene sile/navore ter sile/navore merilnih odmikov.

Pri neobremenjenem zaznavalu je določitev merilnega odmika preprosta, mogoče je celo izvesti odštevanje že znotraj senzorja. Kadar pa je senzor obremenjen, merilnega odmika ne moremo tako lahko določiti.

Kadar je prijemalo neobremenjeno, želimo, da sta prava sila/navor \mathbf{F}_s in \mathbf{M}_s enaka 0, iz (7) in (8) izhaja:

$$\mathbf{F}_{meas} = \mathbf{F}_{comp} + \mathbf{F}_{off} \quad (9)$$

$$\mathbf{M}_{meas} = \mathbf{M}_{comp} + \mathbf{M}_{off} \quad (10)$$

Za izračun \mathbf{F}_{comp} ter \mathbf{F}_{off} uporabimo dve meritvi sile iz dveh različnih usmeritev vrha, ti meritvi $(.)^{(1)}$ in $(.)^{(2)}$ združimo z uporabo (4) in (9):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_{meas}^{(1)} \\ \mathbf{F}_{meas}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}^{(1)}F_{gz} + \mathbf{F}_{off} \\ \mathbf{a}^{(2)}F_{gz} + \mathbf{F}_{off} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}^{(1)} \\ \mathbf{a}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{gz} \\ \mathbf{F}_{off} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Sistem enačb je predoločen. Z uporabo nevidezne obratne vrednosti dobimo rešitev po metodi najmanjših kvadratov:

$$\begin{bmatrix} F_{gz} \\ \mathbf{F}_{off} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \mathbf{a}^{(1)} \\ \mathbf{a}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{a}^{(1)} \\ \mathbf{a}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{meas}^{(1)} \\ \mathbf{F}_{meas}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Določiti moramo še težišče prijemala ter merilne odmike navora. Pri tem potrebujemo tri meritve. Z uporabo (5) in (10) dobimo:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{meas}^{(1)} \\ \mathbf{M}_{meas}^{(2)} \\ \mathbf{M}_{meas}^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{comp}^{(1)} + \mathbf{M}_{off} \\ \mathbf{M}_{comp}^{(2)} + \mathbf{M}_{off} \\ \mathbf{M}_{comp}^{(3)} + \mathbf{M}_{off} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{\mathbf{F}}_{comp}^{(1)} \\ -\hat{\mathbf{F}}_{comp}^{(2)} \\ -\hat{\mathbf{F}}_{comp}^{(3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{M}_{off} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Let \mathbf{R} be the robot rotational matrix between the sensor c.s. \mathbf{S} and the world c.s. \mathbf{W} and \mathbf{r} is the vector between their origins. Then the compensation force/torque can be calculated as:

where vectors \mathbf{n} , \mathbf{o} , \mathbf{a} are the components of the matrix \mathbf{R} . F_g denote the gravitational force and \mathbf{F}_{comp} and \mathbf{M}_{comp} are the compensational force and torque and $\hat{\mathbf{F}}_{comp}$ is the cross-product operator associated with the vector \mathbf{F}_{comp}

The sensor offset is also a problem and has to be compensated:

where \mathbf{F}_{meas} , \mathbf{M}_{meas} , \mathbf{F}_{off} , \mathbf{M}_{off} are the measured and offset force and torque, respectively.

In the case of an unloaded sensor the determination of the offset is simple. It is possible to subtract the offset within the sensor. When the sensor is under the load, the offset cannot be easily determined and subtracted.

In the case of the unloaded gripper the forces/torques \mathbf{F}_s and \mathbf{M}_s should be equal to zero. From (7) and (8) it follows that:

For the calculation of \mathbf{F}_{comp} and \mathbf{F}_{off} we need two force measurements in two different orientations of the gripper. These two measurements $(.)^{(1)}$ and $(.)^{(2)}$ should be combined using (4) and (9):

This system is overdetermined. Using the pseudo-inverse gives the least-square solution:

However, we still have to calculate the centre of gravity and the torque offset. For these calculations we need three measurements. Using (5) and (10) we get:

in zopet z uporabo psevdoinverza:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{M}_{off} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} -\hat{\mathbf{F}}_{comp}^{(1)} & \mathbf{I} \\ -\hat{\mathbf{F}}_{comp}^{(2)} & \mathbf{I} \\ -\hat{\mathbf{F}}_{comp}^{(3)} & \mathbf{I} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -\hat{\mathbf{F}}_{comp}^{(1)} & \mathbf{I} \\ -\hat{\mathbf{F}}_{comp}^{(2)} & \mathbf{I} \\ -\hat{\mathbf{F}}_{comp}^{(3)} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} -\hat{\mathbf{F}}_{comp}^{(1)} & \mathbf{I} \\ -\hat{\mathbf{F}}_{comp}^{(2)} & \mathbf{I} \\ -\hat{\mathbf{F}}_{comp}^{(3)} & \mathbf{I} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{meas}^{(1)} \\ \mathbf{M}_{meas}^{(2)} \\ \mathbf{M}_{meas}^{(3)} \end{bmatrix} \quad (14).$$

Obračanje matrike velikosti 6x6 je problem pri uporabi preprostih računalnikov, ki se uporabljajo za vodenje industrijskih robotov. Zato predlagamo postopek za zmanjšanje velikosti invertirane matrike. Zapišimo (13) v razširjeni obliki:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{meas}^{(1)} \\ \mathbf{M}_{meas}^{(2)} \\ \mathbf{M}_{meas}^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{comp}^{(1)} + \mathbf{M}_{off} \\ \mathbf{M}_{comp}^{(2)} + \mathbf{M}_{off} \\ \mathbf{M}_{comp}^{(3)} + \mathbf{M}_{off} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -F_{comp_z}^{(1)} & F_{comp_y}^{(1)} & 1 & 0 & 0 \\ F_{comp_z}^{(1)} & 0 & -F_{comp_x}^{(1)} & 0 & 1 & 0 \\ -F_{comp_y}^{(1)} & F_{comp_x}^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & -F_{comp_z}^{(2)} & F_{comp_y}^{(2)} & 1 & 0 & 0 \\ F_{comp_z}^{(2)} & 0 & -F_{comp_x}^{(2)} & 0 & 1 & 0 \\ -F_{comp_y}^{(2)} & F_{comp_x}^{(2)} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & -F_{comp_z}^{(3)} & F_{comp_y}^{(3)} & 1 & 0 & 0 \\ F_{comp_z}^{(3)} & 0 & -F_{comp_x}^{(3)} & 0 & 1 & 0 \\ -F_{comp_y}^{(3)} & F_{comp_x}^{(3)} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -r_x \\ -r_y \\ -r_z \\ \mathbf{M}_{off_x} \\ \mathbf{M}_{off_y} \\ \mathbf{M}_{off_z} \end{bmatrix} \quad (15).$$

V tej enačbi se pojavlja šest neznank in devet enačb, od katerih je le 6 linearno neodvisnih. Če odstranimo 3., 5. in 7. vrstico, se izkaže, da dobimo 6 linearno neodvisnih vrstic (enačb):

and using the pseudo-inverse yields:

Inversion of a 6x6 matrix can be a problem when a simple computer is used for the robot control. We propose the following procedure for reducing the necessary arithmetic operations. Let us rewrite (13) in its expanded form:

Note that there are six unknowns and nine equations, and only six of them are linearly independent. By removing the 3rd, 5th and the 7th rows (equation) we obtain six linearly independent equations:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{meas_x}^{(1)} \\ \mathbf{M}_{meas_y}^{(1)} \\ \mathbf{M}_{meas_x}^{(2)} \\ \mathbf{M}_{meas_z}^{(2)} \\ \mathbf{M}_{meas_y}^{(3)} \\ \mathbf{M}_{meas_z}^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -F_{comp_z}^{(1)} & F_{comp_y}^{(1)} & 1 & 0 & 0 \\ F_{comp_z}^{(1)} & 0 & -F_{comp_x}^{(1)} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -F_{comp_z}^{(2)} & F_{comp_y}^{(2)} & 1 & 0 & 0 \\ -F_{comp_y}^{(2)} & F_{comp_x}^{(2)} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ F_{comp_z}^{(3)} & 0 & -F_{comp_x}^{(3)} & 0 & 1 & 0 \\ -F_{comp_y}^{(3)} & F_{comp_x}^{(3)} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -r_x \\ -r_y \\ -r_z \\ \mathbf{M}_{off_x} \\ \mathbf{M}_{off_y} \\ \mathbf{M}_{off_z} \end{bmatrix} \quad (16).$$

Za izračun \mathbf{r} in \mathbf{M}_{off} je treba obrniti matriko velikosti 6x6. Postopek poenostavimo, če zamenjamo 3. in 4. vrstico iz enačbe (16) in dobimo:

For the calculation of \mathbf{r} and \mathbf{M}_{off} we have to invert a 6x6 matrix. The calculation can be simplified if we swap the 3rd and the 4th rows in (16) as follows:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{meas_x}^{(1)} \\ \mathbf{M}_{meas_y}^{(1)} \\ \mathbf{M}_{meas_z}^{(2)} \\ \mathbf{M}_{meas_x}^{(2)} \\ \mathbf{M}_{meas_y}^{(3)} \\ \mathbf{M}_{meas_z}^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -F_{comp_z}^{(1)} & F_{comp_y}^{(1)} & 1 & 0 & 0 \\ F_{comp_z}^{(1)} & 0 & -F_{comp_x}^{(1)} & 0 & 1 & 0 \\ -F_{comp_y}^{(2)} & F_{comp_x}^{(2)} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & -F_{comp_z}^{(2)} & F_{comp_y}^{(2)} & 1 & 0 & 0 \\ F_{comp_z}^{(3)} & 0 & -F_{comp_x}^{(3)} & 0 & 1 & 0 \\ -F_{comp_y}^{(3)} & F_{comp_x}^{(3)} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -r_x \\ -r_y \\ -r_z \\ \mathbf{M}_{off_x} \\ \mathbf{M}_{off_y} \\ \mathbf{M}_{off_z} \end{bmatrix} \quad (17).$$

Zapišimo zgornjo enačbo drugače:

Rewriting the upper equation yields:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_a \\ \mathbf{M}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_a & \mathbf{I} \\ \mathbf{F}_b & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{r} \\ \mathbf{M}_{off} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{F}_a \mathbf{r} + \mathbf{M}_{off} \\ -\mathbf{F}_b \mathbf{r} + \mathbf{M}_{off} \end{bmatrix} \quad (18).$$

Izrazimo težišče in merilne odmike navorov:

The centre of gravity and the torque offset are calculated as:

$$\mathbf{r} = (\mathbf{F}_b - \mathbf{F}_a)^{-1} (\mathbf{M}_a - \mathbf{M}_b) \quad (19)$$

$$\mathbf{M}_{off} = \mathbf{M}_a + \mathbf{F}_a \mathbf{r} \quad (20).$$

Za izračun r je treba obrniti le matriko ($F_b - F_a$), ki je velikosti 3×3 , kar pa ne dela posebnih težav.

Sedaj, ko poznamo vpliv gravitacije ter merilnih odmikov, moramo ta dva prispevka od meritve odšteti, da dobimo pravo vrednost:

$$F_S = F_{meas} - F_{off} - F_{comp} \quad (21)$$

$$M_S = M_{meas} - M_{off} - M_{comp} \quad (22)$$

1.3 Avtomatska določitev vrha orodja

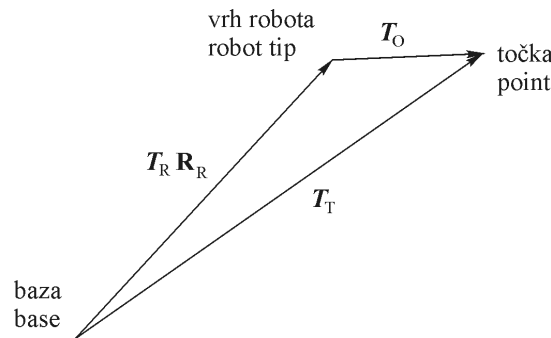
Pri mnogih robotskih uporabah je treba določiti lego vrha orodja glede na vrh robota, prav tako potrebujemo znan vrh orodja za določitev koordinat kalibracijskih točk na golenici. To lego vrha lahko izračunamo ali pa izmerimo. Ker je meritev lahko dokaj nenatančna, predlagamo lažji in hitrejši postopek za avtomatsko določitev lege vrha.

For the calculation of r we only have to invert the matrix ($F_b - F_a$) which is of size 3×3 .

For the calculation of the force/torque without the influence of gravity on the gripper and the offset we have to subtract the gravity and offset influence from measured force/torque:

1.3 Automatic determination of the tool's centre point

In many robot applications it is necessary to determine the position of the robot tool's centre point with respect to the robot tip. For the determination of the calibration points on the tibia we also need to know the position of the tool's centre point. This position can be measured or calculated. We propose a simple automatic procedure for the determination of the tool's centre point.



Sl. 5. Prenos baznega koordinatnega izhodišča v določeno točko v prostoru
Fig. 5. Transfer from the robot base to a fixed point in space

Z vrhom orodja se trikrat dotaknemo poljubne točke, vendar vsakokrat z drugo usmerjenostjo vrha robota. Pozicijo določene točke lahko izrazimo na dva načina (sl. 5):

$$T_O + R_R T_R = T_T \quad (23)$$

S T so označene translacije med posameznimi koordinatnimi sistemi, z R pa rotacije. $(\cdot)_R$ se nanaša na robotove transformacije, $(\cdot)_O$ na transformacije orodja, $(\cdot)_T$ pa na transformacije točke. Pozicija neke točke glede na bazo je sestavljena iz translacije robota T_R ter translacije orodja T_O , ki je zarotirana za rotacijsko matriko robota R_R . Pozicijo te iste točke pa lahko opišemo tudi s translacijo T_T od baze do točke.

V tej enačbi sta znani translacija in rotacija robota, transformacije točke ne poznamo, iščemo pa translacijo orodja T_O . Za določitev neznan potrebujemo tri meritve $(\cdot)^{(\cdot)}$ – tri konfiguracije robota, tako da vrh orodja kaže v enako točko. Zapišimo sistem s tremi konfiguracijami v matrični obliki:

With the tool tip we have to touch the same point in space every time using different orientations of the robot tip. The position of the point can be written in two ways:

T denotes a translation between two coordinate systems, R denotes rotations between them and $(\cdot)_R$ relates to the robot transformation, $(\cdot)_O$ relates to the tool transformation and $(\cdot)_T$ relates to the point transformation. The position of the point with respect to the base is calculated from the robot translation T_R and the tool translation T_O , which is rotated with a robot rotational matrix R_R . The position of the same point can be described as translation T_T from the base to the point.

The robot translations and rotations are known, however, we have to obtain the tool translation T_O . Equation (23) has three equations and six unknowns. In order to solve eq. (23) we need three robot configurations $(\cdot)^{(\cdot)}$ when the tool centre point points to the same point in space with different orientations. Combining (23) for three measurements we obtain:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_R^{(1)} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{R}_R^{(2)} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{R}_R^{(3)} & -\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_O \\ T_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_R^{(1)} \\ -T_R^{(2)} \\ -T_R^{(3)} \end{bmatrix} \quad (24).$$

Sistem je mogoče rešiti z uporabo navidezne obratne vrednosti:

This system could be solved using the pseudo-inverse:

$$\begin{bmatrix} T_O \\ T_T \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \mathbf{R}_R^{(1)} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{R}_R^{(2)} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{R}_R^{(3)} & -\mathbf{I} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{R}_R^{(1)} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{R}_R^{(2)} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{R}_R^{(3)} & -\mathbf{I} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_R^{(1)} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{R}_R^{(2)} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{R}_R^{(3)} & -\mathbf{I} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -T_R^{(1)} \\ -T_R^{(2)} \\ -T_R^{(3)} \end{bmatrix} \quad (25).$$

Zaradi zmanjšanja velikosti obratne matrike uporabimo postopek, ki je bil opisan v prejšnjem poglavju:

However, we propose the same procedure as in the previous section, which results in an easier matrix inversion:

$$\begin{bmatrix} n_x^{(1)} & o_x^{(1)} & a_x^{(1)} & -1 & 0 & 0 \\ n_y^{(1)} & o_y^{(1)} & a_y^{(1)} & 0 & -1 & 0 \\ n_z^{(2)} & o_z^{(2)} & a_z^{(2)} & 0 & 0 & -1 \\ \hline n_x^{(2)} & o_x^{(2)} & a_x^{(2)} & -1 & 0 & 0 \\ n_y^{(3)} & o_y^{(3)} & a_y^{(3)} & 0 & -1 & 0 \\ n_z^{(3)} & o_z^{(3)} & a_z^{(3)} & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_O \\ T_T \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} T_{R_x}^{(1)} \\ T_{R_y}^{(1)} \\ T_{R_z}^{(2)} \\ T_{R_x}^{(2)} \\ T_{R_y}^{(3)} \\ T_{R_z}^{(3)} \end{bmatrix} \quad (26).$$

Zaradi preprostejšega obračanja matrike, zapišemo sistem enačb:

Rewrite (26) into:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{R_a} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{R}_{R_b} & -\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_O \\ T_T \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} T_{R_a} \\ T_{R_b} \end{bmatrix} \quad (27)$$

in dobimo:

and finally we obtain

$$T_O = (\mathbf{R}_{R_a} - \mathbf{R}_{R_b})^{-1} (T_{R_b} - T_{R_a}) \quad (28).$$

Z uporabo te preproste enačbe določimo pozicijo vrha orodja glede na vrh robota. Vrh orodja je treba trikrat čim natančneje pripeljati v določeno točko v prostoru. Natančnost določitve T_O je odvisna od natančnosti robota in natančnosti dotika točke. Brez težav pa lahko dosežemo natančnost pod 0,5 mm.

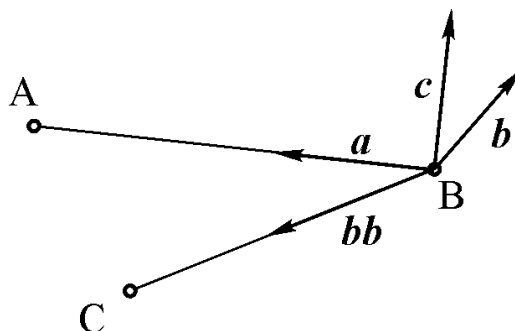
The position of the tool tip with respect to the robot tip is determined using this simple equation. We only need to move the robot tool to same point in space. The accuracy of T_O depends on the robot accuracy and the accuracy of the touch. The accuracy can be better than 0.5 mm.

1.4 Obdelava podatkov ter grafična predstavitev

1.4 Data calculating and graphical presentation

Točke, ki smo jih izmerili na koordinatnem merilniku, moramo prenesti v koordinatni sistem robota. Za ta namen uporabimo po tri kalibracijske točke (A, B, C) na golenici in stegenici. Iz teh treh točk najprej določimo rotacijsko matriko ravnine, ki poteka skozi te tri točke (slika 6).

The points measured with the coordinate-measuring machine had to be transformed to the robot-base coordinate system. To do this three calibration points (A, B, C) on the tibia and femur are needed. Using these three points we define the rotational matrix of the plane, which contains these three points.



Sl. 6. Določanje rotacijske matrike ravnine
Fig. 6. Defining of the plain rotational matrix

Med točkama B in A ter B in C določimo enotina vektorja \mathbf{j} ter \mathbf{m} . Normirani vektorski zmnožek med njima da normalo na ravnino (\mathbf{l}). Za določitev vrtilne matrike pa potrebujemo še en pravokotni vektor \mathbf{k} :

$$\mathbf{j} = \frac{\vec{BA}}{\|\vec{BA}\|} \quad (29)$$

$$\mathbf{m} = \frac{\vec{BC}}{\|\vec{BC}\|} \quad (30)$$

$$\mathbf{l} = \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{m}}{\|\mathbf{j} \times \mathbf{m}\|} \quad (31)$$

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{l}}{\|\mathbf{j} \times \mathbf{l}\|} \quad (32)$$

$$\mathbf{R} = [\mathbf{j}|\mathbf{k}|\mathbf{l}]^T \quad (33)$$

Kot translacijo vzamemo pozicijo točke B. Tako dobimo po dve rotacijski matriki (\mathbf{R}) ter dve translaciji (\mathbf{T}) za golenico in stegenico, eno za meritev z robotom (\cdot)_R in drugo za meritev s koordinatnim merilnikom (\cdot)_{cm}. Vse točke na površinah sklepov (\mathbf{P}), ki so izmerjene s koordinatnim merilnikom, prenesemo v koordinatni sistem robota:

$$\mathbf{P}_R = \mathbf{R}_R(\mathbf{R}_{cm}^{-1}(\mathbf{P}_{cm} - \mathbf{T}_{cm})) + \mathbf{T}_R \quad (34)$$

Podatke smo preračunali s programskim paketom Matlab, v katerem je bil izveden tudi izris (slika 9).

2 REZULTATI

Meritve smo izvajali na prašičevem kolenu, ki je po zgradbi najbolj podobno človeškemu (sl. 7). Izvedli smo vrsto 10 meritev z zelo dobro ponovljivostjo. Sile ter navori v sklepu so bili znotraj 0,5 N oziroma 0,05 N m. Vzporedno z merivjo z robotom smo izvajali tudi testno merjenje s koordinatnim merilnikom MicroScribe, katerega natančnost je 0,01 mm. Meritev z robotom se je izkazala za dovolj natančno. S koordinatnim merilnikom smo pomerili tudi površine sklepov (sl. 8), in sicer na vsaki površini sklepa po 20 do 30 točk.

Grafična predstavitev je potekala v programskem paketu Matlab (sl. 9), pri katerem smo tudi računali dolžino l srednjega vlakna SKV (sl. 10).

3 SKLEP

V prispevku smo obravnavali postopek za natančno določitev gibanja kolenskega sklepa. Pri tem smo uporabili industrijskega robota, ki je voden s silo. Zaradi tega je bilo treba kompenzirati vpliv

Between points B and A and between B and C we define the unit vectors \mathbf{j} and \mathbf{m} , respectively. The normalized vector product between \mathbf{j} and \mathbf{m} gives us the plane normal \mathbf{l} . To define the rotational matrix we need one more perpendicular vector \mathbf{k} :

The translation \mathbf{T} is the position of the point B. So we have two rotational matrices (\mathbf{R}) and two translations (\mathbf{T}) for tibia and femur, one for robot (\cdot)_R measurement and one for the coordinate-measuring (\cdot)_{cm} machine measurement. All the points on the knee surfaces (\mathbf{P}) that were measured with coordinate measuring machine had to be transformed to the robot-base coordinate system using:

The calculations and graphical presentation were made with the Matlab program (Figure 9).

2 RESULTS

The measurements were performed on a porcine knee, the structure of which is similar to a human knee (Figure 7). We performed a series of 10 measurements. Forces and torques in the knee joint were within 0.5 N and 0.05 N m, respectively. For control purposes we also measured the positions of control points with the MicroScribe coordinate-measuring machine. The accuracy of the MicroScribe machine is better than 0.01 mm. We checked the measurement accuracy of the robot with MicroScribe. The measuring accuracy of the robot was better than 0,5 mm. Using MicroScribe we also scanned the surface of the knee joint (Figure 8). On every surface we measured 20 to 30 points.

A graphical presentation of the knee movement was made with the Matlab program package (Figure 9), the length l of the ACL during the motion was also computed (Figure 10).

3 CONCLUSIONS

This paper describes procedures for a determination of the geometrical model of knee movement. The movement of the knee was measured with a force-controlled industrial robot. To do this we had to com-



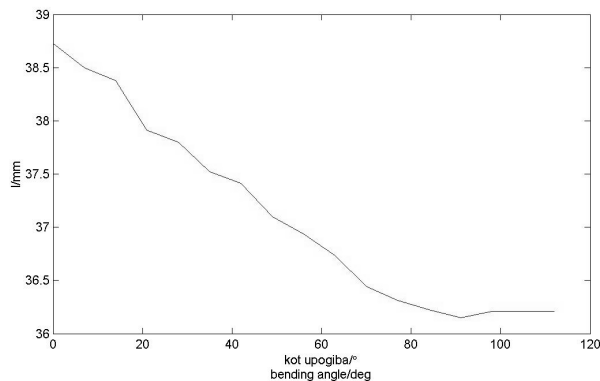
Sl. 7. Postopek meritve
Fig. 7. Measurement procedure



Sl. 8. Snemanje površine sklepa
Fig. 8. Scanning of knee surfaces



Sl. 9. Grafični prikaz površin kolena v Matlabu
Fig. 9. Graphical presentation of the knee surfaces in Matlab



Sl. 10. Prikaz dolžine SKV med gibanjem kolena
Fig. 10. Length of the ACL during knee movement

gravitacije prijemala na zaznavalo sile/navora ter merilne odmike zaznavala.

Avtomatska kompenzacija gravitacije prijemala ter merilnih odkikov se je izkazala kot zelo uporabno orodje v robotiki. Postopek je preprost, hiter in dovolj natančen, tudi kadar imamo opravka z majhnimi silami/navori. V našem primeru kompenzacija zagotavlja majhne sile/navore v sklepu, s tem pa dosežemo boljšo stabilnost vodenja. Dodaten prispevek k stabilnosti je prinesla preslikava sil/navorov v sklep.

Razvili smo celovit sistem za meritev in prikaz gibanja kolen. Ta sistem bi bilo mogoče uporabiti v zdravstvene namene za prikaz gibanja kolena. S programom lahko izračunamo raztezke vezi, ki so pritrjene nekje na kosti, to pa je pri zamenjavi vezi ključnega pomena.

pensate the influence of gravity on the gripper and the sensor offsets.

The automatic gravity and offset compensation results in a very useful robotic tool. The procedure is very simple and sufficiently accurate, even when we are dealing with small forces and torques. In our case the compensation ensures small forces/torques in the knee joint and therefore a better control stability. An additional contribution to the stability is the transformation of the forces/torques from the force/torque sensor to the knee-joint coordinate system.

We developed a system for measuring and graphically presenting of human knees. This system can be used for medical purposes, for the animation of the knee movement. The most important thing in ligaments implantation is calculating the ligaments extension. This calculation can be performed with the developed system.

4 LITERATURA 4 REFERENCES

- [1] Miyasaka et al. (1991) The incidence of knee ligament injuries in the general population, *Am. J. Knee Surg.* 4, 3-8, 1991.

- [2] Savio L-Y. Woo et al. (1997) Biomechanics of knee ligament healing, repair and reconstruction, *Journal of Biomechanics*, Vol. 30, No. 5, 431 – 439, 1997.
- [3] Hiromichi Fujie et al. (1993) The use of robotics technology to study human joint kinematics: A new methodology, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 115, 211- 217, 1993.
- [4] Hiromichi Fujie et al. (1995) The use of a universal force-moment sensor to determine in-situ forces in ligaments: A new methodology, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol 117, 1-7, 1995.
- [5] Bojan Nemec et al. (2000) The use of robotics technology for kinematics test of synovial joints in medicine. V: CURK, Boris (ur.), HARNIK, Jože (ur.). *9th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD 2000*, Maribor, Slovenia, June 1-3, 2000.
- [6] Bojan Nemec et al. (1998) The use of force controlled robot for kinematic test in medicine. V: DOBROVODSKÝ, Karol (ur.). *7th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*, Smolenice Castle, Slovakia, June 26-28, 1998. Proceedings : RAAD 1998. Bratislava: Institute of Control Theory and Robotics: Slovak Academy of Science, 1998, str. 435-440.
- [7] Tadej Bajd, Alojz Kralj (1997) Robotika, *Fakulteta za elektrotehniko*, Ljubljana 1997.

Avtorjev naslov: Damir Omrčen
dr. Bojan Nemec
Institut Jožef Stefan
Jamova 39
1000 Ljubljana
damir.omrcen@ijs.si

Author's Address: Damir Omrčen
Dr. Bojan Nemec
"Jožef Stefan" Institute
Jamova 39
1000 Ljubljana, Slovenia
damir.omrcen@ijs.si

Prejeto:
Received: 6.8.2001

Sprejeto:
Accepted: 29.3.2002

Realni pretočni časi operacij in uspešnost sistema NKP

Realistic Lead Times of Operations and Efficiency of the PPC System

Marko Starbek - Janez Grum - Janez Kušar

Uspešnost dela na trgu razpoložljivih komercialnih sistemov NKP (sistemov za načrtovanje in krmiljenje proizvodnje) [1] in [2] je v veliki meri odvisna od realnosti izvedbe pretočnega terminiranja operacij, ki sloni na ocenjenih oziroma ugotovljenih pretočnih časih delovnih mest.

V prispevku predlagamo postopek za ugotavljanje srednjih pretočnih časov delovnih mest. V časovnem koraku P ugotovljene vrednosti srednjih pretočnih časov delovnih mest pokažejo dejansko sliko pretoka naročil preko delovnih mest in pomenijo osnovni podatek za izvedbo realnega pretočnega terminiranja operacij v naslednjem, to je časovnem intervalu $(P+1)$.

S predlaganim postopkom ugotavljanja pretočnih časov preidemo od statičnega na dinamično pretočno terminiranje operacij naročil.

© 2002 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: sistemi PPS, časi pretočni, modeli lijaka, diagrami pretoka)

The practical efficiency of commercially available PPC (production planning and control) systems [1] and [2] depends to a great extent on the implementation of operations' lead times determination which is based on estimated or calculated lead times of workplaces.

This paper presents a method for calculating the average lead times of workplaces. The average lead times of workplaces, found in the interval P , gives a realistic picture of the order flow through workplaces, and these data are the basis for the implementation of the realistic operations' lead times determination in the next $(P+1)$ interval.

With the proposed method for calculating lead times a transition from static to dynamic orders' lead times determination is accomplished.

© 2002 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

(Keywords: PPC-systems, lead times, funnel models, flow diagrams)

0 UUVOD

Namen sistema NKP je izvedba nalog načrtovanja in krmiljenja proizvodnje [3].

Načrtovanje proizvodnje mora poskrbeti za načrtovanje poteka proizvodnje v prihodnosti in vključuje naloge: načrtovanje primarnih potreb, načrtovanje materialnih potreb, načrtovanja pretočnih časov operacij in izravnavo kapacitet. Krmiljenje proizvodnje pa mora poskrbeti za izvedbo načrtovane proizvodnje, in to kljub neizogibnim spremembam količin, dogovorjenih terminov, pomanjkanju osebja, delovnih sredstev, in vključuje naloge: izpuščanje naročil, fino terminiranje ter monitoring in kontroling proizvodnje.

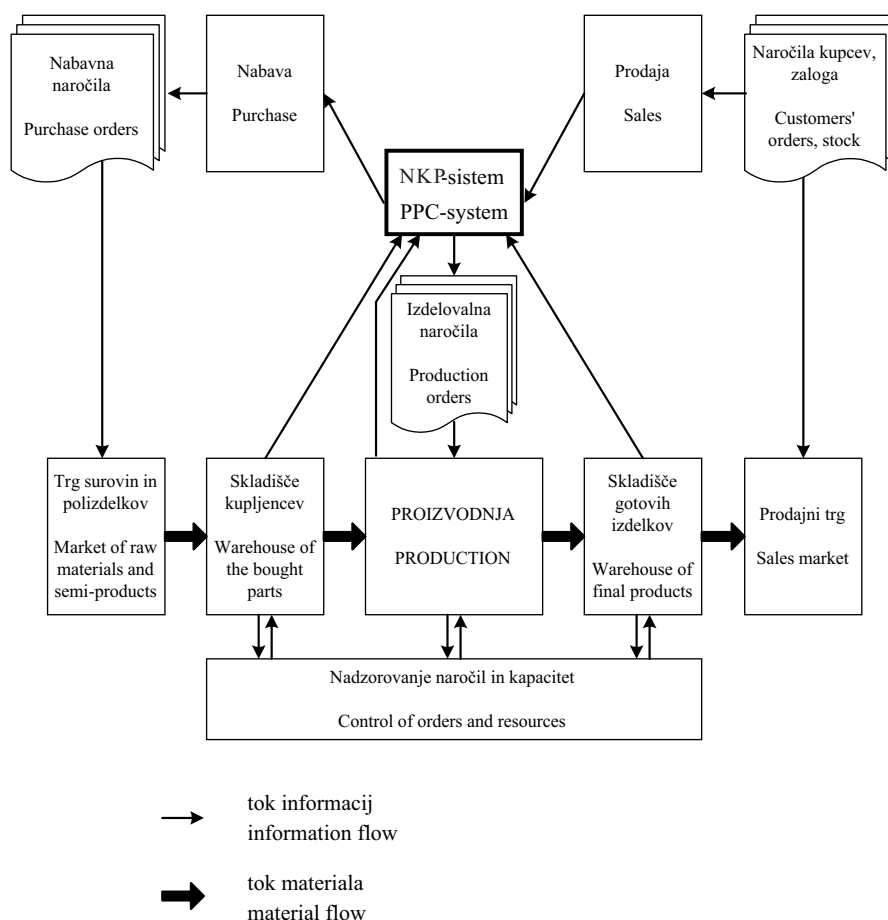
Realno načrtovanje in krmiljenje proizvodnje terjata stalno spremljanje in izvedbo potrebne korekcije toka materiala in informacij, kar je mogoče doseči edino s sistemom NKP. Slika 1 prikazuje mesto sistema NKP v proizvodnem podjetju.

0 INTRODUCTION

A production planning and control (PPC) system has to carry out production planning and control tasks [3].

Production planning has to plan the course of future production. It consists of the following tasks: primary needs planning, material needs planning, operations' lead times determination, and levelling of resources. Production control has to provide for the realisation of the planned production, regardless of the inevitable changes to quantities, agreed terms, loss of staff and production means. It consists of the following tasks: releasing orders, fine termination, and production monitoring and control.

Realistic production planning and control requires continuous monitoring and implementation of the required corrective measures in material and information flow, which can only be achieved by a PPC system. The place of the PPC system in a production company is shown in Figure 1.



Sl. 1. Mesto sistema NKP v proizvodnem podjetju

Fig. 1. The position of the PPC system in a production company

Informacija, ki jo sistem NKP dobi od prodaje, je informacija o proizvodnem načrtu izdelkov, ki jih bo treba izdelati v opazovanem časovnem koraku (naročila kupcev, načrtovana zaloga). Sistem NKP proizvodni načrt deli na izdelovalna naročila (lastna proizvodnja) in nabavna naročila (nabava na trgu surovin in polizdelkov) in pri tem upošteva skladiščno stanje tako kupljenih kakor gotovih izdelkov.

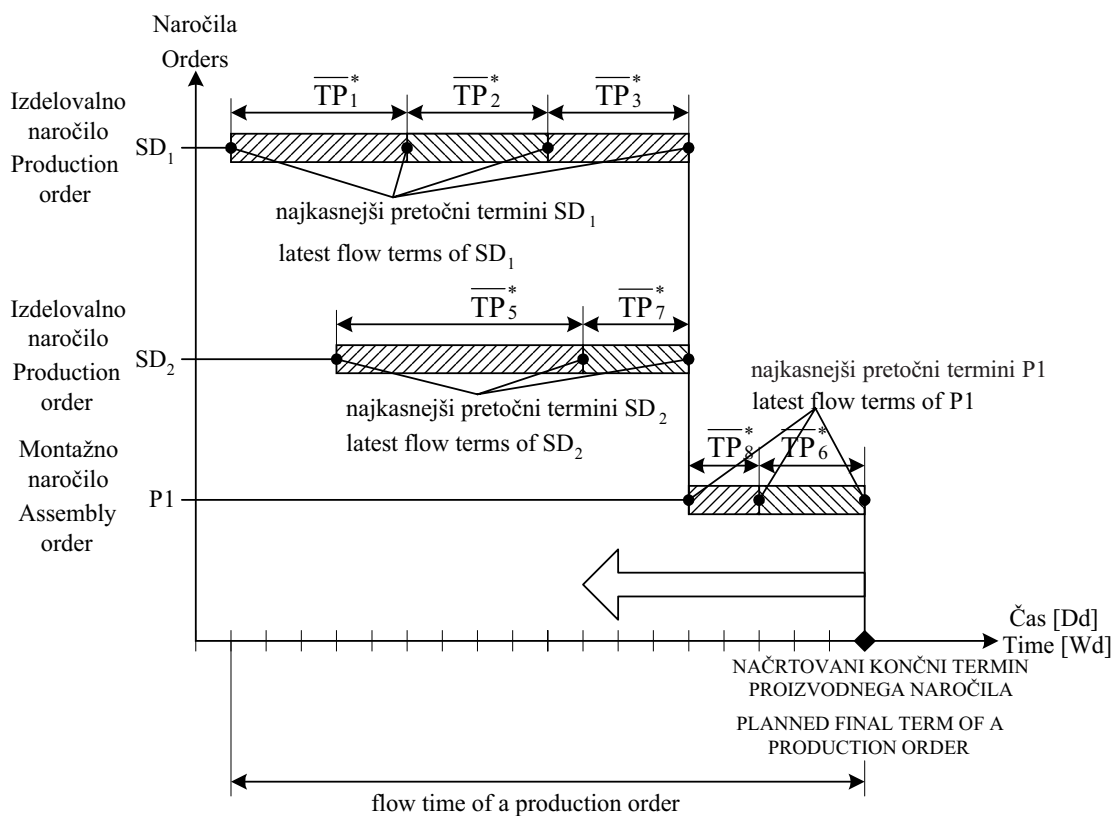
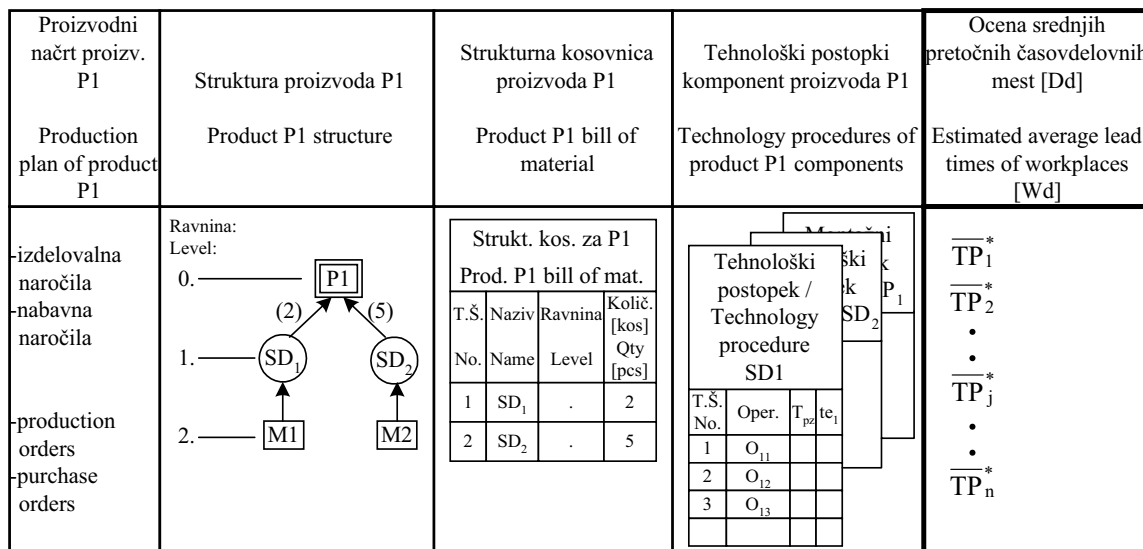
Po vstopu surovin in polizdelkov v vhodno skladišče teče materialni tok preko proizvodnje in skladišča gotovih izdelkov h kupcu. Stalno nadzorovanje naročil in zmogljivosti je namenjeno za oskrbovanje sistema NKP z nujnimi povratnimi informacijami.

Za izdelovalna naročila opazovanega časovnega koraka P mora sistem NKP izvesti pretočno terminiranje operacij in za izvedbo te naloge potrebuje podatke o srednjih pretočnih časih delovnih mest v predhodnem časovnem koraku ($P-1$). Analiza rezultatov pretočnega terminiranja operacij, izvedena v več majhnih in srednje velikih podjetjih, je pokazala, da podjetja pri pretočnem terminiranju delujejo z grobimi izkusvenimi vrednostmi srednjih pretočnih časov delovnih mest in zato ne preseneča dejstvo, da prihaja do velikih odstopanj med načrtovanimi in doseženimi termini.

The sales department sends the PPC system the information about the production plan of products that will have to be manufactured in the treated interval (orders of customers, planned stock). The PPC system divides the production plan into production orders (company's own production) and purchase orders (purchases on the market of raw materials and semi-products), taking into account the bought and manufactured products in stock.

After raw materials and semi-products have entered the warehouse of bought parts, the material flows from production through the warehouse of final products to the customer. The continuous control of orders and resources provides feedback information to the PPC system.

The PPC system has to perform the operations' lead times determination for production orders of the treated interval P . In order to accomplish this task it needs the data on average lead times in the previous ($P-1$) interval. An analysis of the results of the flow termination of operations, which was carried out in several small and medium-sized companies, has shown that when dealing with lead times determination the companies used approximate experience-based values of the average lead times of workplaces and therefore it was not surprising that large discrepancies existed between the planned and actual terms.



Sl. 2. Primer retrogradnega pretočnega terminiranja operacij proizvodnega naročila
Fig. 2. An example of the reverse-flow order based lead time determination

Slika 2 prikazuje pregled dokumentov, ki omogočajo pretočno terminiranje operacij ter prikazuje načelo retrogradnega pretočnega terminiranja izdelka P1, ki je sestavljen iz dveh sestavnih delov SD₁ in SD₂ (proizvodno naročilo sestoji iz dveh izdelovalnih in enega montažnega naročila).

Figure 2 presents an overview of the documents that allow for the flow termination of operations and shows the principle of reverse-flow termination of the P1 product, composed of parts SD₁ and SD₂ (production order consists of two manufacturing orders and one assembly order).

Sistem NKP lahko na temelju podatka o načrtovanem končnem terminu proizvodnega naročila in podatkov o proizvodnem načrtu, strukturi in kosovnici proizvoda, tehnoloških postopkih izvedbe operacij na komponentah proizvoda in ocenjenih srednjih pretočnih časih delovnih mest izvede pretočno terminiranje tehnoloških in montažnih operacij.

Da bi v prihodnosti uspešno rešili problem velikega odstopanja načrtovanih terminov od doseženih, smo se raziskovalci Laboratorija za proizvodne sisteme odločili, da sestavimo postopek za trajno ugotavljanje doseženih srednjih pretočnih časov delovnih mest oziroma operacij, saj so v več podjetjih izvedene analize pokazale, da se vrednosti srednjih pretočnih časov delovnih mest stalno spreminjajo.

Analiza vzrokov nenehnega spreminjanja pretočnih časov je pokazala, da na velikost srednjih pretočnih časov delovnih mest vpliva množica dejavnikov, naj naštejemo le najpomembnejše:

- obremenitev delovnih mest in čakalna vrsta naročil,
- način podrobnega razporejanja naročil na delovno mesto,
- kakovost strojev, naprav in orodij,
- način oskrbe z materiali, orodji in informacijami,
- usposobljenost in motiviranost delavcev, ki strežejo strojem,
- način organiziranosti transportne in vzdrževalne službe.

Na delovno mesto S_j prihajajoča naročila pomenijo obremenitev delovnega mesta, čakajoča naročila pomenijo stanje naročil, z delovnega mesta odhajajoča naročila pa učinek delovnega mesta. V določeni meri spremenljiva odprtina lijaka pomeni razpoložljive oziroma izkoriščene zmogljivosti delovnega mesta. Naloga krmiljenja delovnega mesta je, da po eni strani preprečuje preveliko stanje naročil na delovnem mestu in s tem predolge pretočne čase naročil in po drugi strani premajhno stanje, ki bi lahko povzročilo nedelo delovnega mesta zaradi pomanjkanja naročil.

1 UGOTAVLJANJE SREDNJIH PRETOČNIH ČASOV DELOVNIH MEST

Pretok množice naročil $N_1, \dots, N_i, \dots, N_m$ preko delovnega mesta S_j v opazovanem časovnem koraku P si lahko ponazorimo s poznanim modelom lijaka [4], ki ga prikazuje slika 3.

1.1 Zbiranje podatkov o pretoku naročil

Da bi prišli do podatkov o pretočnih časih naročil N_i ($1 = i = m$), ki so v opazovanem časovnem koraku P prešla preko delovnega mesta S_j , moramo za vsako naročilo zbrati podatke o:

- številki naročila, ki je prišlo oziroma odšlo z

The PPC system can carry out the flow termination of technology and assembly operations on the basis of the data of the planned final term of production order and data on the product plan, the structure and the bill of materials of the product, the technology procedures for the execution of operations on the product components, and the estimated average lead times of workplaces.

In order to solve the problem of the large discrepancies between the planned and actual terms the *Production Systems Laboratory* researchers decided to develop a method for continuous monitoring of the actual lead times of workplaces (operations), as the analyses performed in several companies revealed that the values of the average lead times of workplaces were changing continuously.

The analysis of the continuous changing of lead times has shown that there were many reasons why these values changed, the most important being:

- the load of the workplaces, the queue of orders,
- the method of fine allocation of orders to a workplace,
- the quality of machines, devices and tools,
- the method of material, tool and information supply,
- the qualifications and motivation of employees working with machines,
- the organisation of transport and support services.

In a funnel model the orders that come to the workplace S_j represents the load of the workplace, the queued orders represent the state of the orders, and the orders departing from the workplace represent the workplace efficiency. The hole of the funnel (variable to a certain extent) represents the available and used resources of the workplace. The control system has two tasks: it prevents too high a state of orders in the workplace (and thus excessive lead times for the orders), and it prevents too low a state of orders which could put the workplace out of operation due to an insufficient number of orders.

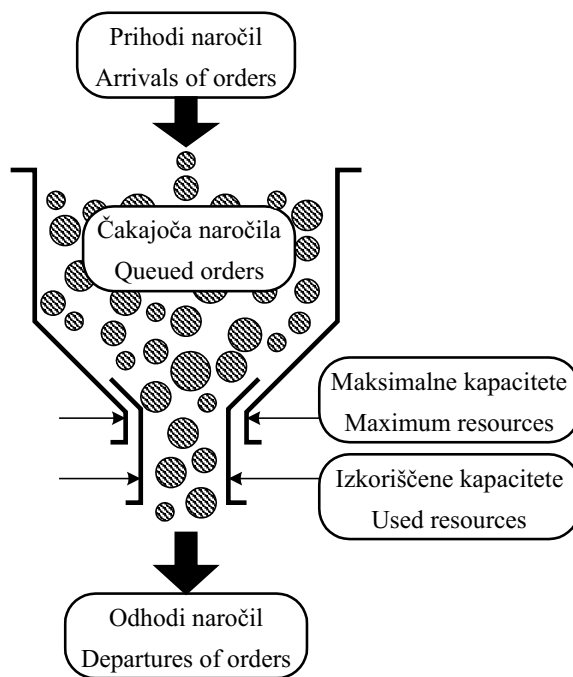
1 CALCULATION OF AVERAGE LEAD TIMES OF WORKPLACES

The flow of orders $N_1, \dots, N_i, \dots, N_m$ through the workplace S_j in the treated interval P can be represented by the funnel model [4], as shown in Figure 3.

1.1 Acquisition of orders flow data

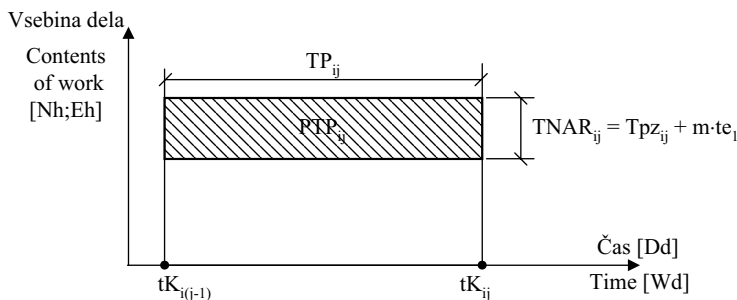
In order to obtain the data on the lead times of orders N_i ($1 \leq i \leq m$) that passed the workplace S_j in the interval P it is necessary to get the following data for each order:

- the order number that arrived at or departed from



Sl. 3. Model lijaka delovnega mesta S_j
 Fig. 3. Funnel model of the workplace S_j

- | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - delovnega mesta S_j, - terminu prihoda oziroma odhoda naročila z delovnega mesta S_j, - normiranem oziroma dejanskem času izvedbe naročila na delovnem mestu S_j. | <ul style="list-style-type: none"> - the workplace S_j, - the arrival and departure terms of the order in the workplace S_j, - the normative and effective time for processing the order in the workplace S_j. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



- | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> TP_{ij} pretočni čas naročila N_i na delovnem mestu S_j, PTP_{ij} površina pretočnega časa naročila N_i na delovnem mestu S_j, $TNAR_{ij}$ čas za naročilo N_i na delovnem mestu S_j, Tpz_{ij} pripravljalni in zaključni čas za naročilo N_i na delovnem mestu S_j, m_{ij} velikost serije naročila N_i na delovnem mestu S_j, te_{ij} čas na enoto mere naročila N_i na delovnem mestu S_j, $tK_{i(j-1)}$ časovna točka končanja naročila N_i na delovnem mestu S_{j-1}, tK_{ij} časovna točka končanja naročila N_i na delovnem mestu S_j. | <ul style="list-style-type: none"> TP_{ij} the lead time of the order N_i in the workplace S_j, PTP_{ij} the lead-time area of the order N_i in the workplace S_j, $TNAR_{ij}$ the normative order time of the order N_i in the workplace S_j, Tpz_{ij} the setup time of the order N_i of the workplace S_j, m_{ij} the lot size of the series of the order N_i in the workplace S_j, te_{ij} the process time per unit of the order N_i in the workplace S_j, $tK_{i(j-1)}$ the time point at the end of the order N_i in the workplace S_{j-1}, tK_{ij} the time point at the end of the order N_i in the workplace S_j. |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Sl. 4. Pretočni čas in površina pretočnega časa naročila N_i na delovnem mestu S_j
 Fig. 4. The lead time and the lead-time area of the order N_i flow through the workplace S_j

V opazovanem časovnem intervalu P zajeti podatki o pretoku naročil preko delovnega mesta S_j omogočajo grafično predstavitev pretočnih časov in površin pretočnih časov naročil. Slika 4 prikazuje pretočni čas in površino pretočnega časa pretoka naročila N_i preko delovnega mesta S_j .

Kakor prikazuje slika 4, pretočni čas naročila N_i na delovnem mestu S_j pomeni časovni korak, računani od časovne točke končanja naročila N_i na predhodnem delovnem mestu $S_{(j-1)}$ in časovno točko končanja naročila N_i na opazovanem delovnem mestu S_j , torej je:

$$TP_{ij} = tK_{ij} - tK_{i(j-1)} \quad (1.)$$

Površina pretočnega časa naročila N_i na delovnem mestu S_j pa je:

$$PTP_{ij} = TP_{ij} \cdot TNAR_{ij} \quad (2.)$$

The data acquired on the flow of orders through the workplace S_j during the treated interval P allow for a graphical presentation of the lead times and the lead-time areas of the orders. Figure 4 presents the lead time and the lead-time area of the order N_i flow through the workplace S_j .

As can be seen from Figure 4, the lead time of the order N_i in the workplace S_j presents the interval calculated from the time point at the end of the order N_i in the previous workplace $S_{(j-1)}$ and time point at the end of the order N_i in the treated workplace S_j , therefore:

The lead-time area of the order N_i in the workplace S_j can be calculated as:

1.2 Srednji pretočni čas delovnega mesta S_j

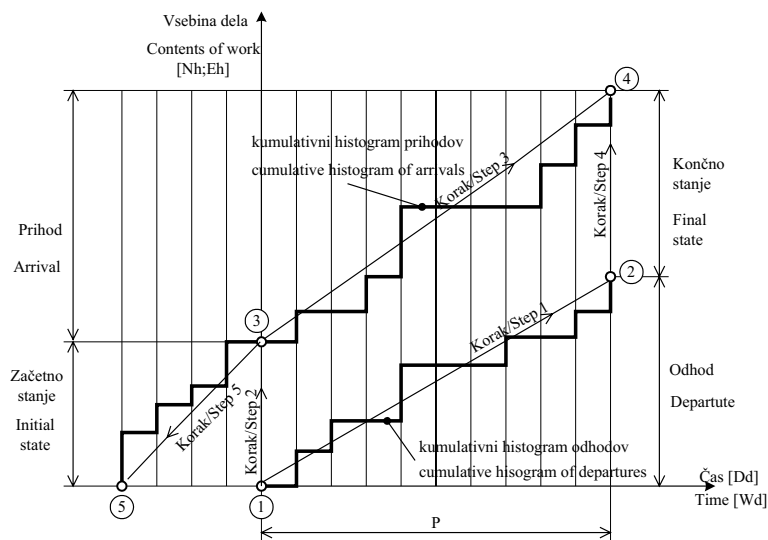
Zbrani podatki o pretoku množice naročil $N_1, \dots, N_i, \dots, N_m$ preko delovnega mesta S_j v opazovanem časovnem koraku P omogočajo konstruiranje diagrama pretoka naročil delovnega mesta oziroma operacije, ki se izvede v zaporedju petih korakov (sl. 5):

1. korak: risanje zbirnega histograma odhoda naročil z delovnega mesta (od točke 1 na sliki 5 se pomikamo proti točki 2),
2. korak: določitev začetnega stanja naročil na delovnem mestu (od točke 1 k točki 3),
3. korak: risanje zbirnega histograma prihoda naročil na delovno mesto (od točke 3 k točki 4),
4. korak: določitev končnega stanja naročil na delovnem mestu (od točke 2 k točki 4),
5. korak: risanje zbirnega histograma prihoda naročil na delovno mesto pred opazovanim časovnim korakom (od točke 3 k točki 5).

1.2 Average lead time of the workplace S_j

The acquired data on the flow of orders $N_1, \dots, N_i, \dots, N_m$ through the workplace S_j in the treated interval P means we can construct a diagram of the order flow through the workplace (operation), which is done in five steps (see Figure 5):

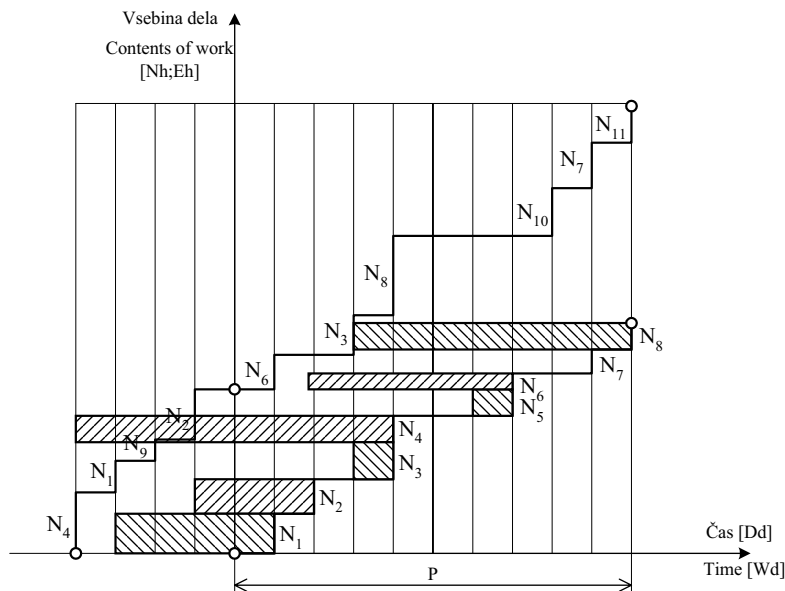
- Step 1: drawing cumulative histogram of departed orders from the workplace (from point 1 on Figure 5 towards point 2),
- Step 2: definition of the initial state of orders in the workplace (from point 1 to point 3),
- Step 3: drawing the cumulative histogram of the arrivals of orders to the workplace (from point 3 to point 4),
- Step 4: definition of the final state of orders in the workplace (from point 2 to point 4),
- Step 5: drawing the cumulative histogram of the arrival of orders to the workplace before the treated interval (from point 3 to point 5).



Sl. 5. Diagram pretoka delovnega mesta S_j
Fig. 5. Flow diagram of the workplace S_j

V diagram pretoka delovnega mesta S_j je mogoče na podlagi podatkov o časovnih točkah prihoda in odhoda posameznega naročila na delovno mesto, z delovnega mesta in podatkov o načrtovanem času za posamezno naročilo, ki je v opazovanem časovnem koraku P odšlo z delovnega mesta, vrisati površine pretočnih časov, kar prikazuje slika 6.

On the basis of the data about the time points of a particular order arrival to and departure from the workplace S_j and the data about the planned processing time for a particular order, which departed from the workplace during the treated interval P , it is possible to draw the lead-time areas in the flow diagram of the workplace S_j , as presented in Figure 6.



Sl. 6. Diagram pretoka delovnega mesta S_j s površinami pretočnih časov
 Fig. 6. Flow diagram of the workplace S_j with lead-time areas

Ko govorimo o pretočnem času delovnega mesta S_j , vedno mislimo na srednji pretočni čas naročil, ki so v opazovanem časovnem koraku P odšla z delovnega mesta S_j :

When dealing with the lead time of the workplace S_j we always have in mind the average lead time of the orders that departed from the workplace S_j in the treated interval P :

$$\overline{TP}_j = \frac{\sum_{i=1}^m PTP_{ij}}{\sum_{i=1}^m TNAR_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^m TP_{ij} \cdot TNAR_{ij}}{\sum_{i=1}^m TNAR_{ij}} \quad (3)$$

\overline{TP}_j - srednji pretočni čas delovnega mesta S_j

\overline{TP}_j - average lead time of the workplace S_j

1.3 Srednji pretočni časi delovnih mest delavnice

1.3 Average lead times of workplaces in a workshop

Ker pa izvedba naročil v opazovanem časovnem koraku P običajno ni vezana le na eno delovno mesto, temveč na množico delovnih mest delavnice: $S_1, \dots, S_j, \dots, S_n$, je treba ugotoviti srednje pretočne čase vseh delovnih mest delavnice.

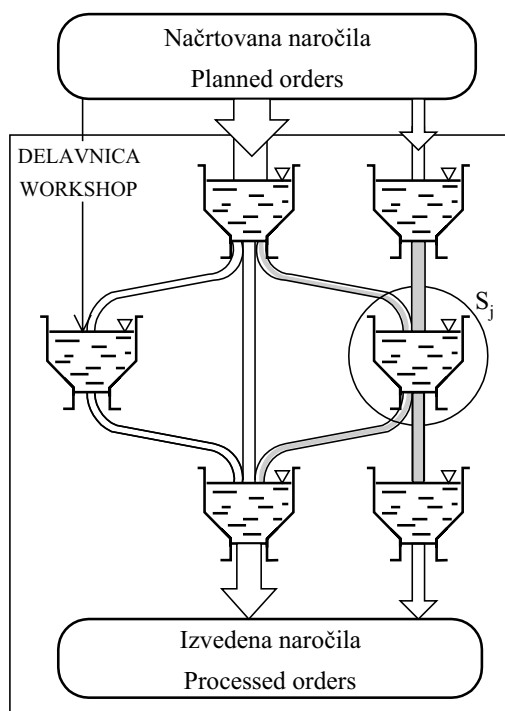
The processing of orders in the treated interval P usually does not depend just on one workplace but on several workplaces in a workshop: $S_1, \dots, S_j, \dots, S_n$. Therefore, it is necessary to determine the average lead times of all the workplaces in a workshop.

Pretok množice naročil preko delovnih mest delavnice si lahko ponazorimo z modelom mreže lijakov delavnice [5], ki prikazuje lokacijo delovnih mest delavnice in intenzivnost načrtovanih prihodov in odhodov naročil na delovno mesto ali z delovnih mest. Slika 7 prikazuje primer modela mreže lijakov delavnice.

The flow of the set of orders through workplaces in a workshop can be modelled by a mesh of funnels [5] that represent the locations of the workplaces in a workshop and the intensity of planned arrivals to and departures from the workplaces. Figure 7 presents a sample workshop funnel-mesh model.

Da bi prišli do pravih podatkov o srednjih pretočnih časih delovnih mest delavnice, je treba izvesti meritve prihodov in odhodov naročil na delovna mesta

In order to obtain the actual data on the average lead times of workplaces in a workshop it is necessary to measure the arrival and departure times



Sl. 7. Model mreže lijakov delavnice
Fig. 7. Workshop funnel-mesh model

ali z delovnih mest delavnice v opazovanem časovnem intervalu P . Izvedene meritve pretoka naročil omogočijo konstruiranje diagramov pretoka delovnih mest delavnice in končno ugotovitev srednjih pretočnih časov.

Rezultat v delavnici izvedenih meritev je torej množica srednjih pretočnih časov delovnih mest delavnice \overline{TP} :

$$\overline{TP} = \{\overline{TP}_1, \dots, \overline{TP}_j, \dots, \overline{TP}_n\} \quad (4),$$

\overline{TP}_j - srednji pretočni čas delovnega mesta S_j ($1 = j = n$)

V opazovanem časovnem koraku P ugotovljena množica srednjih pretočnih časov delovnih mest delavnice \overline{TP} je osnova za izvedbo realnega pretočnega terminiranja s tehnološkimi oziroma montažnimi postopki predpisanih operacij izdelovalnih oziroma montažnih naročil, načrtovanih v naslednjem časovnem koraku ($P+1$).

Raziskovalci *Laboratorija za proizvodne sisteme* smo prišli do sklepa, da realnega pretočnega terminiranja operacij ni brez izvedbe stalnega opazovanja srednjih pretočnih časov delovnih mest delavnice.

Praktično testiranje postopka ugotavljanja srednjih pretočnih časov delovnih mest je pokazalo na nujnost računalniške podpore pri konstruiranju diagramov pretoka in izračunu srednjih pretočnih časov delovnih mest.

Da bi rešili problem učinkovitosti postopka ugotavljanja srednjih pretočnih časov, smo sodelavci *Laboratorija za proizvodne sisteme* izdelali in uspešno testirali računalniški program FS-Control, ki omogoča hitro konstruiranje diagramov pretoka in izračun srednjih pretočnih časov delovnih mest delavnice.

in the workplaces in a workshop in the treated interval P . With these data it is possible to draw flow diagrams for workplaces in a workshop and to calculate average lead times.

On the basis of the measured results a set of the average lead times of workplaces in a workshop is obtained \overline{TP} :

\overline{TP}_j - average lead time of the workplace S_j ($1 \leq j \leq n$)

The set of average lead times of workplaces in the workshop (in the treated interval P) \overline{TP} is used for a realistic flow termination with technology and assembly methods of the prescribed operations of manufacturing and assembly orders, planned in the next ($P+1$) interval.

Production Systems Laboratory researchers made a conclusion that the realistic flow termination of operations is not possible without continuous monitoring of the average lead times of workplaces in a workshop.

Practical testing of the method for calculating the average lead times of workplaces revealed the necessity of computer support for drawing flow diagrams and calculating the average lead times of workplaces.

In order to solve the efficiency issue of the average lead-times-calculation method, the employees of the *Production Systems Laboratory* developed and successfully tested the FS-Control computer software, which allows for the rapid drawing of flow diagrams and the calculation of the average lead times of workplaces in a workshop.

2 PRESKUS POSTOPKA UGOTAVLJANJA SREDNJIH PRETOČNIH ČASOV DELOVNIH MEST

Predlagani postopek ugotavljanja srednjih pretočnih časov delovnih mest smo preskusili na primeru podjetja, ki je izdelovalec strojev za pekarnice in kemično industrijo.

V podjetju so organizirani štirje upravljalni centri s skupno 55 delovnimi mesti:

- upravljalni center sklopov in strojev s 16 delovnimi mesti,
- upravljalni center rotacijskih delov s 6 delovnimi mesti,
- upravljalni center nerotacijskih delov z 12 delovnimi mesti in
- upravljalni center delov in iz tanke pločevine s 17 delovnimi mesti.

Po dogovoru s poslovodstvom podjetja smo v preskus ugotavljanja srednjih pretočnih časov delovnih mest vključili delovna mesta upravljalnega centra rotacijskih delov s 6 delovnimi mesti:

M 33.248	-	struženje, veliko
M 33.262	-	karusel,
M 33.383	-	ozobljenje,
M 34.343	-	frezanje horizontalno-srednje,
M 34.344	-	frezanje horizontalno-veliko,
M 34.352	-	RŠK frezanje univerzalno.

Služba priprave proizvodnje je pri dosedanjem pretočnem terminiranju operacij uporabljala enotno oceno srednjega pretočnega časa delovnih mest:

$$\overline{TP}^* = 6 \text{ Dd}$$

2.1 Zbiranje podatkov o pretoku naročil

Zbiranje podatkov o pretoku naročil preko delovnih mest upravljalnega centra rotacijskih delov je bilo izvedeno v letu 1999, in sicer v časovnem obdobju od 150 Dd do 190 Dd.

V času zapisovanja pretoka naročil preko delovnih mest so sodelavci podjetja za vsako naročilo, ki je prišlo oziroma odšlo z delovnega mesta, registrirali:

- številko naročila, ki je prišlo oziroma odšlo z delovnega mesta,
- termin prihoda oziroma odhoda naročila z delovnega mesta,
- normirani čas izvedbe naročila.

Preglednica 1 prikazuje del zbranih podatkov o pretoku naročil preko šestih delovnih mest upravljalnega centra rotacijskih delov.

Kakor vidimo iz preglednice 1, je v opazovanem časovnem koraku iz delovnih mest odšlo različno število naročil (najmanj 12 naročil z delovnega mesta M 34.344, največ 73 naročil z delovnega mesta M 33.248). Tudi normirani časi izvedbe naročil TNAR močno odstopajo in se gibljejo v mejah od 0,75 Nh do 64 Nh.

2 TEST OF THE METHOD FOR CALCULATING THE AVERAGE LEAD TIMES OF WORKPLACES

We tested the proposed method for calculating the average lead times of workplaces in a sample case of a company that produces machines for bakeries and the chemical industry.

The company has four production centres (totalling 55 workplaces):

- the components and machines centre (16 workplaces),
- the rotational parts centre (6 workplaces),
- the non-rotational parts centre (12 workplaces),
- the thin sheet metal parts centre (17 workplaces).

It was agreed with the company management that the 6 workplaces in the rotational parts centre would be involved in a test calculation of average lead times:

M 33.248	-	turning, large,
M 33.262	-	vertical lathe,
M 33.383	-	gear cutting,
M 34.343	-	horizontal milling – middle,
M 34.344	-	horizontal milling – large,
M 34.352	-	CNC universal milling.

The production department used the uniform estimate of the average lead time of workplaces for flow termination of operations:

$$\overline{TP}^* = 6 \text{ [Wd]}$$

2.1 Data acquisition on the flow of orders

Data acquisition on the flow of orders through the workplaces of the rotational parts department was done in 1999, in the interval from 150 Wd till 190 Wd.

During the interval of monitoring the flow of orders through the workplaces the company employees took a note of the following data for each order that arrived to or departed from the workplace:

- order number,
- arrival and departure term of the order,
- normative time for order processing.

Table 1 presents part of the data acquired on the flow of orders through the six workplaces in the rotational parts department.

It can be seen from table 1 that different numbers of orders departed from the workplaces in the treated interval (minimum: 12 orders from the workplace M 34.344: maximum: 73 orders from the workplace M 33.248). Normative times for processing orders TNAR also deviated considerably: from 0.75 Nh to 64 Nh.

Preglednica 1. Podatki o pretoku naročil preko delovnih mest opazovanega oddelka
 Table 1. Data on the flow of orders through workplaces in the treated department

Delovno mesto/ Workpace: M 34.352		Opazovani časovni korak: od 150 Dd do 190 Dd/ Treated interval: from 150 Wd till 190 Wd				
Zap. št. nar./ Ord. seq. num.:	Delovno mesto/ Workpace: M 34.344	Opazovani časovni korak: od 150 Dd do 190 Dd/ Treated interval: from 150 Wd till 190 Wd				
1	Zap. št. nar./ Ord. seq. num.:	Delovno mesto/ Workpace: M 34.343	Opazovani časovni korak: od 150 Dd do 190 Dd/ Treated interval: from 150 Wd till 190 Wd			
2						
3	Zap. št. nar./ Ord. seq. num.:	Delovno mesto/ Workpace: M 33.383	Opazovani časovni korak: od 150 Dd do 190 Dd/ Treated interval: from 150 Wd till 190 Wd			
25						
26	Zap. št. nar./ Ord. seq. num.:	Delovno mesto/ Workpace: M 33.262	Opazovani časovni korak: od 150 Dd do 190 Dd/ Treated interval: from 150 Wd till 190 Wd			
11						
12	Zap. št. nar./ Ord. seq. num.:	Delovno mesto/ Workpace: M 33.248	Opazovani časovni korak: od 150 Dd do 190 Dd/ Treated interval: from 150 Wd till 190 Wd			
14						
15	Zap. št. nar./ Ord. seq. num.:	Delovno mesto/ Workpace: M 33.248	Opazovani časovni korak: od 150 Dd do 190 Dd/ Treated interval: from 150 Wd till 190 Wd			
14						
15	Zap. št. nar./ Ord. seq. num.:	Delovno mesto/ Workpace: M 33.248	Opazovani časovni korak: od 150 Dd do 190 Dd/ Treated interval: from 150 Wd till 190 Wd			
14						
60	1	Zapored. št. nar./ Order sequential number.	Številka naročila/ Order number	Termin prihoda/ Arrival term [Nh]	Termin odhod [Dd]/ Departure term [Wd]	Normirani čas izvedbe naročila TNAR / Normative time for order processing TO [Nh]
61	2					
	3					
		1	31038175	129	160	8,50
		11	35068953	135	162	10,00
		12	35067049	137	158	13,50
		72	35066483	190	194	7,25
		73	35078943	190	198	1,50

2.2 Srednji pretočni časi delovnih mest upravljalnega centra

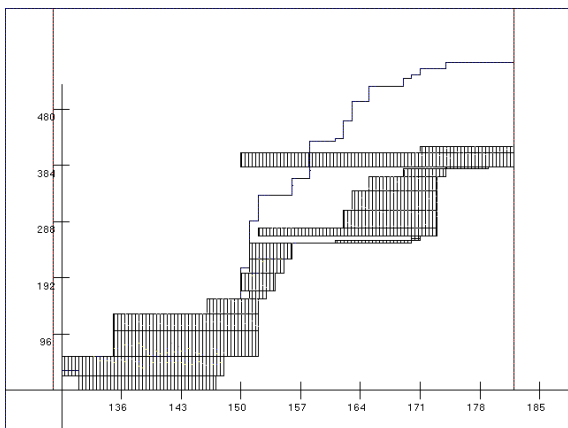
Zbrani podatki o pretoku naročil preko delovnih mest (pregl. 1) so predstavljali vhodne podatke za delo z računalniškim programom FS-Control, s katerim smo za vseh šest delovnih mest upravljalnega centra rotacijskih delov skonstruirali oziroma izpisali:

- diagrame pretoka delovnih mest s površinami pretočnih časov naročil, ki so v opazovanem časovnem intervalu odšla z delovnih mest (sl. 8),
- ugotovljene vrednosti karakterističnih veličin diagramov pretoka:
 - začetna stanja naročil,
 - prihodi naročil,
 - odhodi naročil,
 - končna stanja naročil,
 - srednji pretočni časi delovnih mest, kar prikazuje preglednica 2.

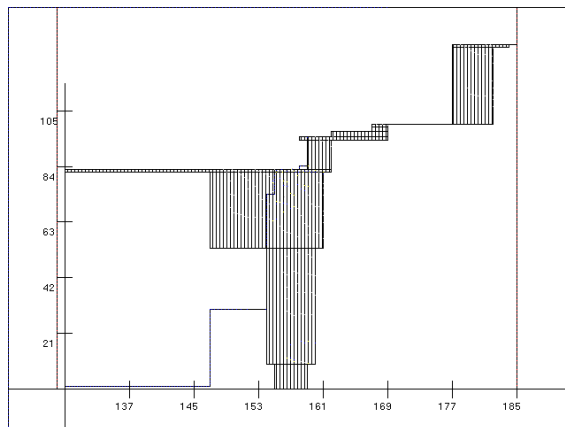
2.2 Average lead times of workplaces

The data on the flow of orders through workplaces (Table 1) are input data to the FS-Control software, which was used to get the following data for all six workplaces:

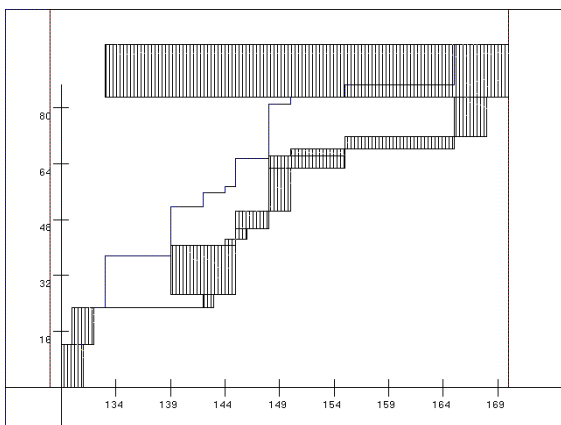
- flow diagrams of workplaces with lead-times areas of orders that departed from workplaces in the treated interval (Figure 8),
- calculated values of characteristic quantities of flow diagrams:
 - initial states of orders,
 - arrivals of orders,
 - departures of orders,
 - final states of orders,
 - average lead times of workplaces as shown in Table 2.



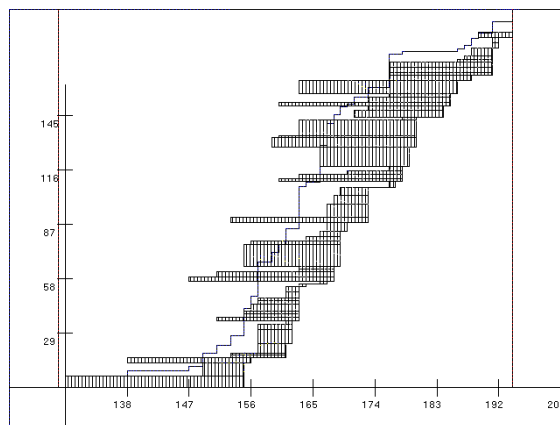
a) Delovno mesto M34.352 – RŠK frezanje, univerzalno
Workplace M34.351 – CNC milling



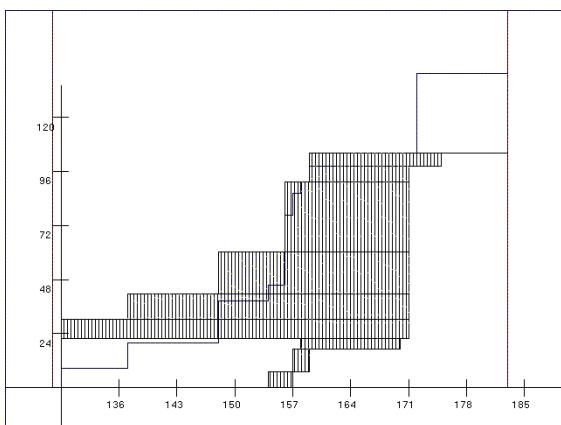
b) Delovno mesto M34.344 – frezanje, veliko
Workplace M34.344 – milling, large



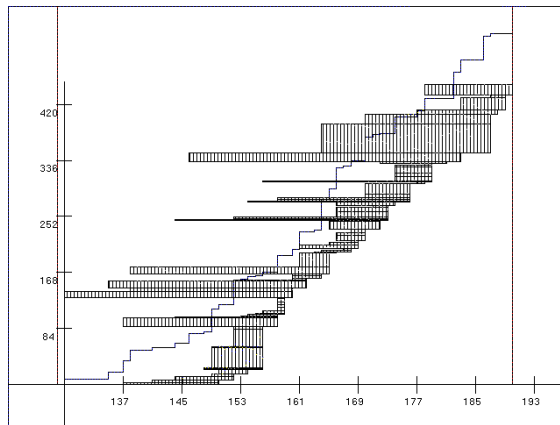
c) Delovno mesto M34.343 – frezanje, srednje
Workplace M34.343 – milling, middle



d) Delovno mesto M33.383 – ozobljenje
Workplace M33.383 – gearcutting



e) Delovno mesto M33.262 – karusel
Workplace M33.262 – vertical lathe



f) Delovno mesto M33.248 – struženje, veliko
Workplace M33.248 – turning, large

Sl. 8. Diagram pretoka šestih delovnih mest centra rotacijskih delov
Fig. 8. Flow diagram of six workplaces in the rotational parts department

Preglednica 2. Vrednosti karakterističnih veličin diagramov pretoka opazovanih delovnih mest
 Table 2. Values of characteristic quantities of flow diagrams for the treated workplaces

Upravljalni center: ROTACIJSKI DELI Department: ROTATIONAL PARTS		Opazovani časovni interval: od 150 Dd do 190 Dd Treated interval: from 150 Wd till 190 Wd			
Karakteristične veličine diagramov pretoka/ Characteristic quantities of flow diagrams: Delovno mesto S_j / Workplace M_i :	Začetno stanje naročil/ Initial state of orders Nh	Prihodi naročil/ Arrivals of orders Nh	Odhodi naročil/ Departures of orders Nh	Končno stanje naročil/ Final state of orders Nh	UGOTOVLJENI SREDNJI PRETOČNI ČAS \overline{TP}_j Dd/ CALCULATED AVERAGE LEAD TIME \overline{TP}_j Wd
M 34.352	129,70	457,30	415,70	171,30	11,89
M 34.344	1,00	129,65	129,90	0,75	7,27
M 34.343	0,00	100,25	98,05	2,20	8,53
M 33.383	9,00	191,71	189,24	11,47	10,18
M 33.262	20,00	132,55	104,25	48,00	18,38
M 33.248	114,45	421,85	452,05	84,25	11,71

Analiza diagramov pretoka in ugotovljenih vrednosti karakterističnih veličin diagramov pretoka opazovanih delovnih mest upravljalnega centra rotacijskih delov nas je pripeljala do naslednjih sklepov:

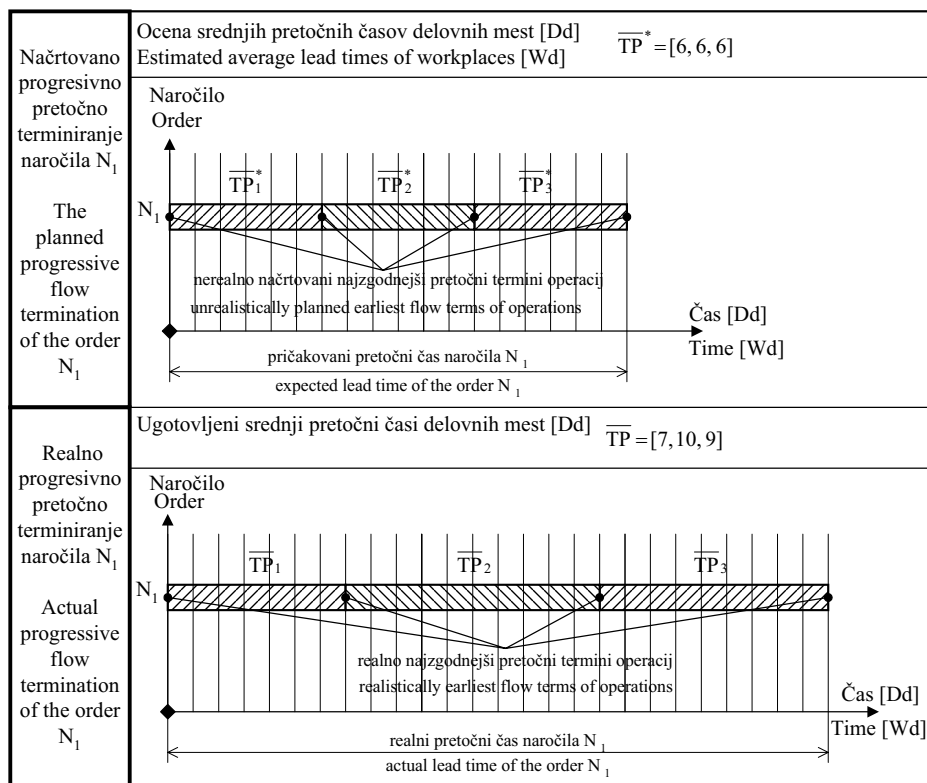
- ocena službe priprave proizvodnje, da bo v opazovanem časovnem koraku od 150 do 190 Dd srednji pretočni čas na vseh šestih delovnih mestih dosegel vrednost $\overline{TP}^* = 6$ Dd ni bila realna, torej je bilo tudi izvedeno pretočno terminiranje operacij nerealno (preglednica 2 kaže, da ugotovljeni srednji pretočni časi delovnih mest bistveno odstopajo od ocene),
- vrednosti karakterističnih veličin diagramov pretoka delovnih mest med seboj močno odstopajo, kar govori o tem, da je nujno treba spremljati pretok naročil preko posameznega delovnega mesta upravljalnega centra,
- nerealna ocena srednjih pretočnih časov delovnih mest je povzročila ugotovljeno nedoseganje načrtovanih terminov izvedbe operacij, kar potrjuje primer, prikazan na sliki 9.
- površine pretočnih časov naročil opazovanih delovnih mest kažejo, da bi bilo mogoče v prihodnosti pretočne čase naročil in s tem tudi srednje pretočne čase delovnih mest bistveno skrajšati, in to z upoštevanjem naslednjih ukrepov:
 - dosledno upoštevanje prioritete pravila izvedbe naročil na delovnih mestih FIFO (naročilo, ki prvo pride na delovno mesto, naj bo tudi prvo izvedeno) [6],
 - uvedba metode na obremenitev orientiranega spuščanja naročil (spuščanje naročil na podlagi podatkov o obremenitvi in učinku delovnega mesta) [7],
 - krajšanje pripravljalnih in končnih časov (uporaba metode SMED) [8].

Z izvedenimi meritvami prihoda in odhoda naročil na delovnem mestu ali z delovnih mest upravljalnega centra rotacijskih delov v opazovanem časovnem koraku P in ugotovitvijo pravih vrednosti srednjih pretočnih časov

Analysis of the flow diagrams and the calculated values of the characteristic quantities of flow diagrams for the treated workplaces of the rotational parts department led us to the following conclusions:

- estimated value of the average lead time (made by the production department) for all six workplaces $\overline{TP}^* = 6$ Wd in the interval from 150 to 190 Wd was unrealistic and therefore the actual flow termination of the operations was also unrealistic (it can be seen from Table 2 that the calculated lead times differ considerably from the estimated value),
- values of the characteristic quantities of the flow diagrams of the workplaces differ considerably for different workplaces. This means that it is necessary to monitor the flow of orders through each particular workplace in a department,
- due to an unrealistic estimate of average lead times of workplaces, the planned terms of operation processing were not met, which was proved by the sample case shown in Figure 9.
- lead-time areas of orders on the treated workplaces indicate that it would be possible to considerably reduce the lead times of orders (thus reducing the average lead times of the workplaces) in future if the following measures are taken into account:
 - strict compliance with the FIFO priority rule regarding the processing of orders in workplaces (the order which comes first to the workplace should be processed first) [6],
 - implementation of the method for releasing orders based on the load of the workplace [7],
 - reduction of setup times (using the SMED method) [8], [9].

The measurements of arrivals and departures of orders to/from workplaces in the interval P and the calculation of actual values of the average lead times of workplaces provided the basic data for the



Sl. 9. Pričakovano in ugotovljeno pretočno terminiranje naročila N_1
 Fig. 9. Planned and actual lead times determination of the order N_1

delovnih mest je služba priprave proizvodnje prišla do pglavntnih podatkov za realno pretočno terminiranje operacij v naslednjem časovnem koraku ($P+1$).

production department and allowed them to realistically carry out flow termination of operations in the next ($P+1$) interval.

3 SKLEP

3 CONCLUSION

Analiza stanja v malih in srednje velikih podjetjih je pokazala, da večina podjetij izvaja pretočno terminiranje operacij na podlagi ocenjenih vrednosti srednjih pretočnih časov delovnih mest in zato ugotovljeni pretočni termini izvedbe operacij močno odstopajo od načrtovanih.

Analyses in small and medium-sized companies have revealed that most companies carry out the lead times determination on the basis of the estimated values of the average lead times of workplaces and thus the actual flow terms of operation processing differ considerably from the planned ones.

V tem prispevku predlagani postopek za ugotavljanje srednjih pretočnih časov delovnih mest v opazovanem časovnem koraku P vključuje izvedbo meritev pretoka naročil preko delovnih mest, konstruiranje diagramov pretoka, določitev vrednosti karakterističnih veličin diagramov pretoka in končno oblikovanje množice ugotovljenih srednjih pretočnih časov delovnih mest, ki je temelj za izvedbo pretočnega terminiranja operacij v naslednjem, to je časovnem koraku ($P+1$). S stalnim opazovanjem srednjih pretočnih časov delovnih mest pridemo od statičnega k dinamičnemu pretočnemu terminiranju operacij, ki zagotavlja realne termine izvedbe s tehnološkimi postopki načrtovanih operacij.

In the article a proposed method for calculating the average lead times of workplaces in the treated interval P consists of measuring orders flow through workplaces, drawing the flow diagrams, calculating of characteristic quantities of flow diagrams, and forming the set of measured average lead times of workplaces, which is the foundation for lead times determination in the next ($P+1$) interval. Continuous monitoring of average lead times of workplaces allows for the transition from static to dynamic lead times determination, which provides realistic processing terms of the planned operations.

Izvedeni preskus ugotavljanja srednjih pretočnih časov delovnih mest upravljalnega centra rotacijskih delov je pokazal, da je bila enotna ocena srednjega pretočnega časa delovnih mest upravljalnega centra rotacijskih delov nerealna, saj vrednosti

The performed experiment of calculating the lead times of workplaces in the rotational parts department has shown that the uniform estimate of the average lead time of workplaces was

ugotovljenih srednjih pretočnih časov delovnih mest bistveno prekoračujejo ocenjeno vrednost.

Vodstvo podjetja je po izvedeni predstavitvi rezultatov prvega preskusa odločilo, da se preskus izvede tudi v drugih treh upravljalnih centrih, in sicer z namenom, da bi služba priprave proizvodnje podjetja prišla do pravih podatkov za izvedbo pretočnega terminiranja naročil v prihodnjih časovnih intervalih.

unrealistic as the actual values considerably exceeded the estimated value.

After the presentation of the first experimental results the company management decided that the experiment should also be carried out in an other three departments so that the production department would obtain realistic data for the flow termination of orders in future intervals.

4 LITERATURA 4 REFERENCES

- [1] Fandel, G., P. Francois, K.-M. Gubitz (1997) NKP- und integrierte betriebliche Softwaresysteme. *Springer Verlag*, Berlin, Heidelberg, New York, 868-911.
- [2] Roos, E., K. Hirt, K. Krings (1992) Marktspiegel NKP-Systeme auf dem Prüfstand, *Verlag TÜV Rheinland GmbH*, Köln, 23-28.
- [3] Wiendahl, H.P. (1995) Load-oriented manufacturing control, *Springer Verlag*, Berlin, Heidelberg, New York, Paris, Tokyo, 13-16.
- [4] Wiendahl, H.P. (1997) Fertigungsregelung, *Carl Hanser Verlag*, München. Wien, 83-102.
- [5] Starbek, M., D. Menart (2000) The optimization of material flow in production, *International Journal of Machine Tools & Manufacture 40*, 1299-1310.
- [6] Baker, K.R. (1974) Introduction to sequencing and scheduling, *J. Wiley & Sons Inc.* New York, 195-200.
- [7] Shigeo, S. (1997) A Revolution in manufacturing, the SMED system. *Productivity Press*, 126-128.
- [8] Polajnar, A., B. Buchmeister, M. Leber (1995) Rationalization of series production by applying the principles of type technology. *Journal of Mechanical Engineering 7-8*, Ljubljana.

Naslov avtorjev: prof.dr. Marko Starbek
 prof.dr. Janez Grum
 asist.dr. Janez Kušar
 Fakulteta za strojništvo
 Univerza v Ljubljani
 Aškerčeva 6
 1000 Ljubljana
 marko.starbek@fs.uni-lj.si
 janez.grum@fs.uni-lj.si
 janez.kusar@fs.uni-lj.si

Authors' Addresses: Prof.Dr. Marko Starbek
 Prof.Dr. Janez Grum
 Asisst.Dr. Janez Kušar
 Faculty of Mechanical Eng.
 University of Ljubljana
 Aškerčeva 6
 1000 Ljubljana, Slovenia
 marko.starbek@fs.uni-lj.si
 janez.grum@fs.uni-lj.si
 janez.kusar@fs.uni-lj.si

Prejeto: 25.9.2000
 Received:

Sprejeto: 29.3.2002
 Accepted:

Strokovna literatura Professional Literature

Ocene knjig

Marko Zlokarnik: *Stirring, Theory and Practice*

Zal.: WILEY-VCH, Weinheim, New York,
Chichester, Brisbane, Singapore, Toronto, 2001.
Obseg: format 17 × 24 cm, 362 strani, 174 slik,
31 preglednic, 710 lit. pod.
Cena: pri Springer Verlag: 70,05 €

Mešanje je eden pomembnejših mehanskih tehnoloških postopkov v procesni industriji. Praktično ni kemičnega produkta, ki bi v fazi proizvodnje obšlo mešanje. Tako se mešanje pojavlja praktično v vseh industrijsko pomembnejših panogah, poleg že omenjene kemijske tudi v farmacevtski, živilski, papirniški industriji in drugod.

Namen oziroma naloga mešanja je, npr. pri homogenizaciji tekočin, doseči izenačitev koncentracijske ali temperaturne razlike, pri intenziviranju prestopa toplote zagotoviti čim večji prestop toplote med toplotnim prenosnikom in tekočino, pri intenziviranju prenosa snovi v večfaznih sistemih zagotoviti čim hitrejšo izmenjavo snovi, pri suspendiranju trdnih delcev preprečiti usedanje delcev v tekočini ter pri dispergiranju plina v kapljevino, ali ene netopne kapljevine v drugo, zagotoviti čim večjo stično površino.

V knjigi so omenjene naloge mešanja podrobno obravnavane in razdeljene v osem poglavij. Upoštevane so tudi reološke lastnosti sistemov, za vsak namen mešanja je podana zanesljiva povečevalna metoda. Podrobneje je obravnavano tudi mešanje v ceveh (statična mešala).

Zaradi tolikšne raznolikosti izvedb mešanja knjiga obsega kar 710 lit. navedb vse do konca leta 2000 in podaja dober pregled po posameznih področjih. Knjiga je primerna za vse, ki se ukvarjajo z mešanjem, tako pri znanstveno-raziskovalnem delu kakor tudi pri praktični uporabi v industrijski praksi.

A. Bombač

H. Mayr: *Projekt Engineering*

Zal.: Fachbuchverlag Leipzig in Carl Hanser Verlag,
München 2001.
Obseg: format 16 × 23 cm, 294 strani.
Cena je 29,90 €.

Knjiga je razdeljena na tri glavna poglavja. Prvo obravnava problematiko razvoja projekta, podaja osnovne pojme, npr. sistem, organizacija, projekt, krog

razvoja projekta, krog razvoja proizvoda in projektne inženiring.

Drugo poglavje je namenjeno obravnavi problematike organizacije projekta (organigrami) in zagotavljanju kakovosti projekta (kakovost, stroški, čas).

Tretje poglavje podaja pregled posebnih nalog, povezanih s projektom, kamor sodijo raziskava ciljev, analize, uvjanje in testiranje projektov.

Knjiga je namenjena študentom proizvodnega inženirstva ter načrtovalcem in vodjem projekta.

M. Starbek

M. Mayr: *Technische Mechanik Statik/Kinematik - Kinetik - Schwingungen/ Festigkeitslehre*

Zal.: Carl Hanser Verlag München, Wien,
3. izdaja, 2000.
Obseg: format 21 × 23 cm, 454 strani, 472 slik.
Cena je 29,90 €.

Pred nami je tretja izdaja učbenika Tehniška mehanika znanega profesorja Martina Mayra iz Augsburga. Učbenik je namenjen študentom strojništva in elektrotehnike, prav tako si lahko z njegovo pomočjo poglobijo znanje mehanike absolventi višjih strokovnih šol strojne smeri. Vsebina knjige je razdeljena v tri glavne dele. Prvi del je statika in je obravnavana na 99 straneh. V drugem delu so obravnavani kinematika, kinetika in nihanja na skupaj 132 straneh. Najbolj obsežna je vsebina trdnosti na 194 straneh. Vsak del je sklenjena celota in je obravnavana neodvisno od preostalih delov mehanike. Učbeniku je na 38 straneh priložena še zbirka formul, preglednic in diagramov, ki rabijo za samostojno reševanje nalog iz mehanike. V tej prilogi je največ podatkov o snovnih lastnostih materialov in geometrijskih značilnosti prereзов, ki so nujno potrebni za reševanje predvsem nalog iz trdnosti.

Obseg posameznih vsebin kakor tudi stopnja zahtevnosti, ki so obravnavane v učbeniku, je zelo prilagojen našim razmeram pri visokoškolskem strokovnem študiju strojništva. Ker so vsebine osnovnih predmetov mehanike pri univerzitetnem študiju zelo podobne visokoškolskemu strokovnemu študiju, je učbenik lahko namenjen tudi tem študentom.

Pri vsakem poglavju avtor najprej našteje nove pojme, ki jih obravnava v okviru posameznega

poglavja. Razlaga, ki sledi, je dokaj racionalna, vendar jasna. Vsak pomemben sklep je izpisan na potemnjeno podlago, kar omogoča hitro ponavljanje in utrjevanje snovi. Poglavje končujejo računski primeri, naloge in vprašanja za utrjevanje znanja. Učbenik je bogato ilustriran s tehničnimi skicami in tudi nekaterimi karikaturami, ki knjigo naredijo še bolj prijazno. Posebna privlačnost knjige je v reševanju problemov mehanike pri obravnavanju številnih realnih primerov tehnične stroke. Vsakega izmed treh glavnih delov knjige končujejo izpitne naloge, ki so razporejene v štiri težavnostne stopnje, ter odgovori na vprašanja in rezultati nalog.

V učbeniku je skupaj 272 vprašanj, s katerimi preverjamo razumevanje snovi, 101 rešen primer, 171 nalog z rezultati in 44 izpitnih nalog. Učbenik končujejo obširni spisek literature, seznam uporabljenih simbolov in stvarno kazalo.

Učbenik podpira tudi zbirka nalog, ki jo je isti avtor izdal pred dvema letoma in katere ocena je bila pred kratkim objavljena tudi v SV.

Učbenik priporočam študentom strojništva in drugim, ki imajo v študijskem programu osnovne predmete tehniške mehanike.

J. Stropnik

J. Härdler: Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure

Zal: Carl Hanser Verlag, München 2001.

Obseg: format 17 × 25 cm, 578 strani.

Cena je 30,58 €.

Učbenik je prilagojen študentom proizvodnega inženirstva, pa tudi inženirjem v praksi. Zajema celotni spekter poslovne ekonomike, in to v kratki in pregledni obliki. Vsakemu poglavju knjige so dodani študijski primeri, vprašanja in naloge. Učbenik vsebuje tudi rešitve nalog, kar dopolnjuje pomoč pri študiju.

V poglavju - osnove ekonomike podjetij - so opisani osnovni pojmi in področja ekonomike podjetja. Posebno poglavje je namenjeno vprašanju gospodarjenja z osebjem, delovnimi sredstvi in materialom.

Potrebno so opisane službe trženja, finančnega gospodarjenja, računovodstva in vodenja podjetja.

Posebno poglavje je namenjeno gradnji informacijskega in komunikacijskega sistema ter trendu računalniško podprte izvedbe del.

Učbenik je namenjen študentom proizvodnega inženiringa ter inženirjem, ki se vsakodnevno srečujejo s problemi ekonomike podjetja.

M. Starbek

W. Dreger: Erfolgreiches Risiko-Management bei Projekten

Zal.: Expert Verlag GmbH, Renningen 2000.

Obseg: format 14,5 × 21 cm, 473 strani, 345 slik.

Cena je 44,99 €.

Knjiga opisuje tveganja pri načrtovanju projektov s poudarkom na vključitvi tveganja pri vodenju projekta.

Podrobno je opisan pojem tveganja, pregled tveganj z vzroki njihovega nastanka, hierarhija tveganja in prioritete tveganj.

Poseben poudarek je v knjigi dan splošnemu tveganju (tveganje podjetja, osebju, okolice), posebnemu tveganju (tveganje sistema, tveganje projekta, pravna tveganja in tveganju partnerjev) in izpeljanemu tveganju (gospodarska tveganja).

Bralec se seznanja tudi z lokalizacijo tveganja in vodenja tveganja (ukrepi, opazovanje tveganj, rezultati tveganj, osebnost projektne vodje).

Podani so tudi pravni varnostni ukrepi, ki popisujejo vzroke nastanka, primer prikaza možne obrambe in druge pravne osnove.

Knjiga je namenjena vodjem in članom projektne skupine ter projektne vodnji.

M. Starbek

I. Friederici: Die strategischen Instrumente eines Managementsystems

Zal.: Expert Verlag GmbH, Renningen 2000.

Obseg: format 16 × 23 cm, 119 strani, 42 slik.

Cena je 50,11 €.

Knjiga podaja pregled petih gradnikov strateškega vodenja malih in srednje velikih podjetij ter način členitve podjetja z vidika hierarhije, funkcij in poslovnih procesov.

Prvi gradnik - vizija in smernice - podaja možne perspektive nekega podjetja.

Drugi gradnik - cilji in ukrepi za razvoj - opisuje ciljno piramido, formulacijo ciljev in ukrepe za doseg ciljev.

Tretji gradnik - organizacija in vodenje - popisuje vodenje podjetja, opis delovnih mest in procesno členitev potekov.

Četrti gradnik - dinamično večanje kakovosti - popisuje odgovornosti poslovodij in možnosti sodelavcev.

Peti gradnik - nadzorovanje in vrednotenje sistema - opisuje notranji pregled sistema, pregled procesov in postopkov, zunanji pregled in pregled vodenja.

Knjiga je namenjena vodjem malih in srednjih podjetij, svetovalcem in študentom proizvodnega inženirstva.

M. Starbek

L. Herrmann: Zeitgemäße Schichtpläne

Zal.: Expert Verlag GmbH, Renningen 2001.

Obseg: format 15 × 21 cm, 168 strani.

Cena je 25,05 €.

Na podlagi velikega števila primerov iz proizvodnje se bralcu posreduje metodično orodje za konstruiranje načrta izmer.

Knjiga prikazuje različne možnosti oblikovanja delovnega časa in prehoda na prilagodljiv sistem izmen. Navedenih je tudi nekaj osrednjih pravnih robnih pogojev, ki jih je treba upoštevati pri načrtovanju izmen.

Podrobno so obdelani posebni vidiki načrtovanja izmen (sistem časovnih oken, izbirni delovni čas in letni delovni čas).

Posebno poglavje je namenjeno obravnavi problema prilagodljivosti načrta delovnih izmen (prilagajanje na nihanje potreb po osebju, prilagodljivost dela in načrti izmen, zajemanje časov pri izmenskem delu, nagrade produktivnosti).

Knjiga je namenjena delavcem v kadrovskih službah podjetij in vsem tistim, ki se ukvarjajo s problematiko časa.

M. Starbek

D. Liedtke - R. Jönsson: Wärmebehandlung

Zal.: Expert Verlag GmbH, Renningen, 4. predel.izd. 2001.

Obseg: format 15 × 23 cm, 313 strani, 421 slik, 92 preglednic, 516 lit. pod.

Cena je 47 €.

Predložena knjiga z naslovom Toplotna obdelava je tretja dopolnjena izdaja. V delu so obravnavani različni postopki toplotne obdelave železnih zlitin, ki sta jih avtorja knjige ločeno pripravila v posameznih poglavjih. Celotno delo vsebuje 14 poglavij, in sicer:

1. Splošno o zgradbi čistega železa, zlitin železa in ogljika oziroma železa ogljika in drugih legirnih elementov. Sledi obravnava legirnih elementov z vidika mikrostrukturnih premen in vpliv hitrosti segrevanja in ohlajanja na mikrostrukturne spremembe v jeklu.
2. Obravnava posameznih faz kaljenja jekel s posebnimi vidiki segrevanja in pregrevanja jekel na kalilno temperaturo in tudi gašenje. Posebno poglavje obravnava tudi problematiko spremembe izmere in oblike strojnih delov po toplotni obdelavi.
3. Obravnava prekaljivosti jekel z vidika opisa postopka, merjenja trdote, konstruiranje ustreznih diagramov na podlagi krivulje prekaljivosti in uporabo podatkov o prekaljivosti strojnih delov.

4. Praktični napotki pri kaljenju in popuščanju orodnih jekel, tudi po poboljšanju konstrukcijskih jekel.
5. Prikaz indukcijskega površinskega kaljenja z vidika izbire induktorja, izbire pogojev segrevanja in pogojev gašenja. Rezultati površinskega kaljenja so obravnavani z vidika poteka trdote, zaostalih napetosti v površinskem sloju in obnašanje tako obdelanih strojnih delov v obratovanju. Prav tako so v delu prikazani tudi drugi postopki površinskega kaljenja toda v znatno manjšem obsegu kakor pri indukcijskem kaljenju.
6. Obravnavani so vsi osnovni postopki žarjenja jekel, ki vključujejo tako opis procesov žarjenja kakor tudi spremljajoče mikrostrukturne spremembe.
7. V posebnem poglavju so prikazani različni postopki ogljičenja in kaljenja površinskega sloja in morebitno poboljšanje jedra iz malo ogljičnih jekel. V tem delu je prikazan tudi proces karbonitriranja. Celoten proces ogljičenja oziroma karbonitriranja je obravnavan tudi iz termodinamičnega vidika, ko je treba zagotoviti ustrezno plinsko zmes, da dobimo želene lastnosti površinskega sloja.
8. Nitiranje in nitrokarboriranje sta podobna postopka, opredeljena s temperaturnimi in atmosferskimi pogoji, pri katerih se izvaja toplotna obdelava. Proces nitiranja in nitrokarboniranja je prikazan tudi z vidika mikrostrukturnih sprememb in dosežene trdote v površinskem sloju.
9. Boriranje in kromiranje sta postopka, ki se pogosto uporabljata v praksi, zato sta vključena v ta sklop vsebin. Oba postopka sta obravnavana tudi z mikrostrukturnega vidika, dosežene trdote in z vidika drsnih oziroma tornih lastnosti.
10. Pregled postopkov preskušanja toplotno obdelanih strojnih delov z vidika merjenja trdote, globine kaljenega sloja, dalje lomni testi, adhezijski testi, makro- in mikroskopske preiskave ter popis difuzijskih slojev.
11. Priprava tehnološke dokumentacije toplotno obdelanih delov, izdelava tehnoloških načrtov in posebnosti pri toplotni obdelavi oziroma zahteve pri izvajanju toplotne obdelave.
12. Ugotavljanje napak pri toplotni obdelavi in iskanje vzrokov za njihov nastanek, pa tudi načrtovanje tehnologije toplotne obdelave, ki omogoča zmanjšanje napak na najmanjšo stopnjo.

Delo je namenjeno konstrukterjem in tehnologom, ki se ukvarjajo s konstruiranjem strojev in naprav oziroma s predpisovanjem ali izvajanjem toplotne obdelave.

J. Grum

A. Jehn (Hrsg.): Galvanische Schichten

Zal.: Expert Verlag GmbH, Renningen, 2. predel.izd.
1999

Obseg: format 15 × 21 cm, 256 strani, 161 slik,
35 preglednic, 145 lit. pod.

Cena je 44 €.

Knjiga založbe Expert Verlag iz Renningen Malsmsheima je že 406. zvezek iz serije Kontakt & Studium. Naslov predložene knjige je Galvanske prevleke in vključuje nekatere postopke površinskih prevlek, ki nastanejo po kemičnem, elektro-kemičnem ali fizikalno-kemičnem načinu. V prvem poglavju so podane galvanske in kemijske osnove kovinskih prevlek po običajnih in neobičajnih postopkih. Nato v drugem poglavju preide na razvoj novih večplastnih galvanskih prevlek za različne kombinacije materialov. V tretjem poglavju sledijo prikazi različnih postopkov okrasnega galvaniziranja. V četrtem in petem poglavju so obdelani galvanski nanosi za spajanje in vrste stičnih materialov in galvanskih nanosov bakra v industriji prevodnih plošč. V šestem poglavju sledijo krom-nikljevi in cinkovi galvanski nanosi za izboljšanje korozijske in obrabne odpornosti. Nato sledijo cink

in cink-svinčeve prevleke za uporabo v elektronski industriji, ki pa jim sledijo prikazi različnih tehnik za pripravo površin pred galvanskim nanosom. V 10. in 11. poglavju je podan pregled opreme za elektrokemično galvansko nanašanje plasti in nazori v svetu o nastajanju galvanskih obratov.

V nadaljevanju so prikazana pravila konstruiranja strojnih delov za manjše galvanske nanose. Sledijo pregledi različnih tehnik galvanskih slojev, s katerimi določamo mehanske in tehnične lastnosti galvanskih nanosov in tudi korozijsko odpornost.

V sklepnem delu avtorji podajo tudi statistično analizo rezultatov v obratih in za izdelke z galvansko zaščito.

Delo je namenjeno predvsem tehnologom in tudi konstrukterjem, ki si želijo pridobiti ali poglobiti znanje o galvanskih nanosih. Delo je primerno tudi kot študijski pripomoček predvsem za poklicne inženirske šole, saj je mogoče pridobiti številne koristne informacije o načinih izdelave galvanskih prevlek o kakovosti galvanskih plasti in njihovih lastnosti.

J. Grum

Teco Werkzeugmaschinen GmbH

**Vodilno trgovsko podjetje za sodobne
rabljene orodjarske stroje**

**Führendes Handelshaus für moderne
gebrauchte Werkzeugmaschinen**

40721 Hilden, Westring
Tel.: +49-2103-3683-0 Fax: +49-2103-3682-20/21
E-mail: teco-werkzeugmaschinen@megabit.com
Internet: www.teco-germany.com

Osebnosti vesti

Personal Events

Doktorati, diplome

DOKTORATI

*

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru je dne 15. februarja 2002 mag. **Rebeka Rudolf** z uspehom zagovarjala svojo doktorsko disertacijo z naslovom "Notranja oksidacija diskontinuiranih kompozitov iz sistema Cu-C".

S tem je navedeni kandidat dosegla akademsko stopnjo doktorja tehničnih znanosti.

DIPLOMIRALISO

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani sta pridobila naziv univerzitetni diplomirani inženir strojništva:

dne 28. februarja 2002: Uroš BOŽIČ in Aleš GORKIČ.

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru sta pridobila naziv univerzitetni diplomirani inženir strojništva:

dne 28. februarja 2002: Borut LEŠNIK in Tadej SEMENIČ.

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

dne 7. februarja 2002: Rajko IVANOVIČ, Karel KOMOČAR in Miha PAVLI;

dne 11. februarja 2002: Jože GORNIK, Gregor MENARD, Simon MENARD, Aleš PAVEC, Edvard PUCER, Gregor SLAMNIK, Boštjan ZAMIDA in Bojan ZRINSKI.

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

dne 28. februarja 2002: Tomislav BRANILOVIČ, Bojan GRABLJEVIČ, Jože KASTELIČ, Boris PLANINC in Miljenko STRMEČKI.

*

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

dne 28. februarja 2002: Tomaž POLŠAK.

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 tipkanih strani. Izjemoma so strokovni članki, na željo avtorja, lahko tudi samo v slovenščini, vsebovati pa morajo angleški povzetek.

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 naj bo pisano na listih formata A4, z dvojnimi presledki med vrstami in s 3 cm širokim robom, da je dovolj prostora za popravke lektorjev. Najbolje je, da pripravite besedilo v urejevalniku Microsoft Word. Hkrati dostavite odtis članka na papirju, vključno z vsemi slikami in preglednicami ter identično kopijo v elektronski obliki.

Prosimo, da ne uporabljate urejevalnika LaTeX, saj program, s katerim pripravljamo Strojniški vestnik, ne uporablja njegovega formata. V urejevalniku LaTeX oblikujte grafe, preglednice in enačbe in jih stiskajte na kakovostnem laserskem tiskalniku, da jih bomo lahko presneli.

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

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 (CSG).

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 typed pages. In exceptional cases, at the request of the authors, speciality papers may be written only in Slovene, but must include an English abstract.

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 miniversion 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 A4 format, with double spacing and margins of 3 cm to provide editors with space to write in their corrections. Microsoft Word for Windows is the preferred format for submission. One hard copy, including all figures, tables and illustrations and an identical electronic version of the manuscript must be submitted simultaneously.

Please do not use a LaTeX text editor, since this is not compatible with the publishing procedure of the Journal of Mechanical Engineering. Graphs, tables and equations in LaTeX may be supplied in good quality hard-copy format, so that they can be copied for inclusion in the Journal.

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.

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).

Slike

Slike morajo biti zaporedno oštevilčene in označene, v besedilu in podnaslovu, kot sl. 1, sl. 2 itn. Posnete naj bodo v kateremkoli od razširjenih formatov, npr. BMP, JPG, GIF. Za pripravo diagramov in risb priporočamo CDR format (CorelDraw), saj so slike v njem vektorske in jih lahko pri končni obdelavi preprosto povečujemo ali pomajšujemo.

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 dvojezične.

Za vse slike po fotografskih posnetkih je treba priložiti izvorne fotografije ali kakovostno narejen posnetek. V izjemnih primerih so lahko slike tudi barvne.

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] Tamg, 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 poštne naslove, številke telefona in faksa ter 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 izvorno 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.

Rokopisi člankov ostanejo v arhivu SV.

Vsa nadaljnja pojasnila daje:

Uredništvo
STROJNIŠKEGA VESTNIKA
p.p. 197/IV
1001 Ljubljana
Telefon: (01) 4771-757
Telefaks: (01) 2518-567
E-mail: strojniksi.vestnik@fs.uni-lj.si

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. Figures may be saved in any common format, e.g. BMP, GIF, JPG. However, the use of CDR format (CorelDraw) is recommended for graphs and line drawings, since vector images can be easily reduced or enlarged during final processing of the paper.

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.

Good quality black-and-white photographs or scanned images should be supplied for illustrations. In certain circumstances, colour figures may be considered.

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] Tamg, 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 following information about the authors should be enclosed with the paper: names, complete postal addresses, telephone and fax numbers 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.

Papers will be kept in the archives of the JME.

You can obtain further information from:

Editorial Board of the
JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING
P.O.Box 197/IV
1001 Ljubljana, Slovenia
Telephone: +386 (0)1 4771-757
Fax: +386 (0)1 2518-567
E-mail: strojniksi.vestnik@fs.uni-lj.si