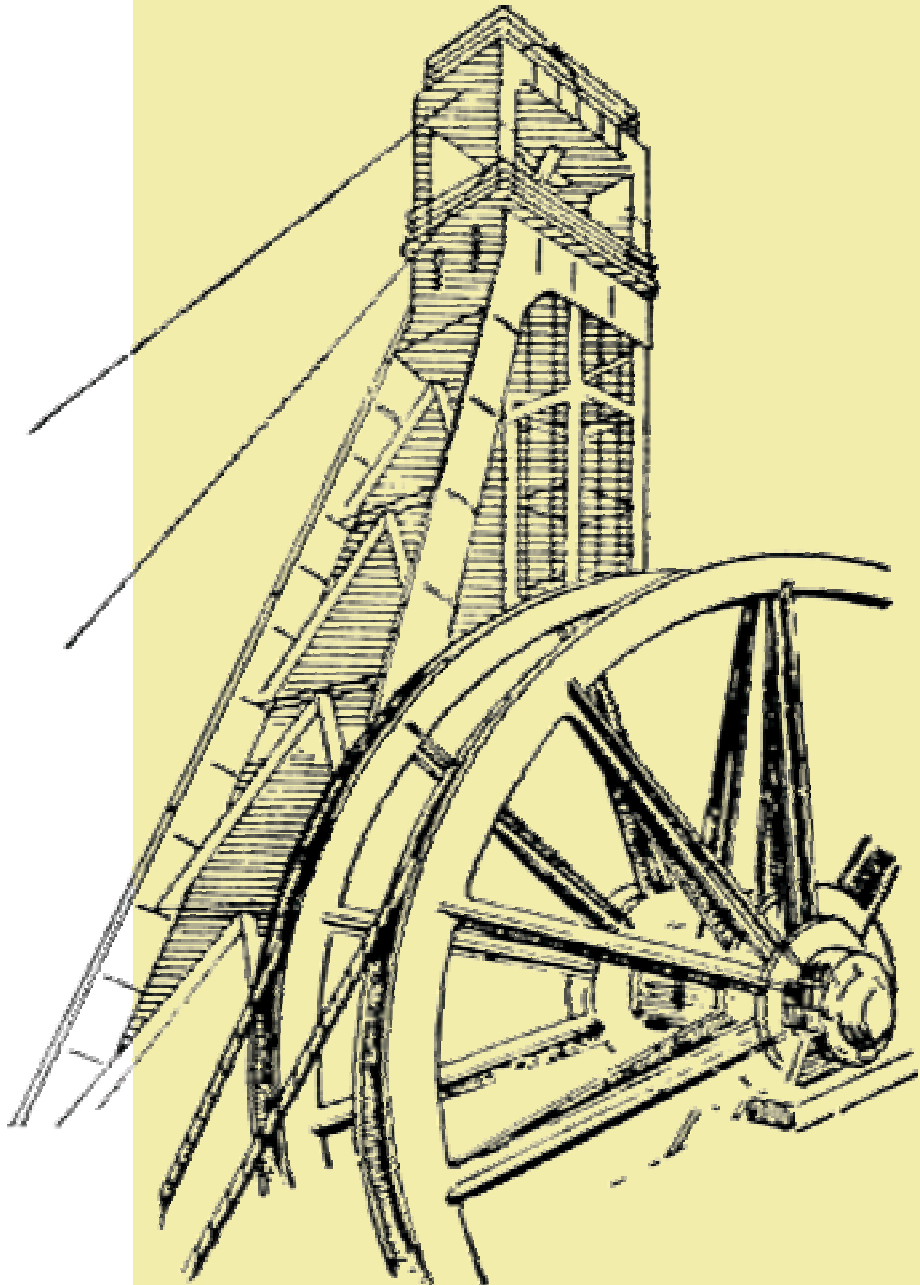


let./vol. **51** - št./no. **6/05** - str./pp. **279-362**  
zvezek/issue **482**

# **STROJNIŠKI VESTNIK**

## **JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING**



cena 800 SIT



9 770039 248001

ISSN 0039-2480

## Vsebina - Contents

**Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering**  
**letnik - volume 51, (2005), številka - number 6**  
**ISSN 0039-2480**

**Izhaja mesečno - Published monthly**

### **Razprave**

- Kokalj, F., Samec, N., Škerget, L.: Analiza pogojev  
zgorevanja v sekundarni komori pilotne  
sežigalnice na podlagi računske dinamike  
tekočin 280
- Kušar, J., Berlec, T., Duhovnik, J., Grum, J., Starbek,  
M.: Ugotavljanje in izkoriščanje skritih  
logističnih zmožnosti podjetja 304
- Petek, A., Pepelnjak, T., Kuzman, K.: Nova metoda za  
določevanje krivulje mejnih deformacij v  
digitalnem okolju 330
- Bazaras, Ž., Leonavičius, M.: Simulacija bočnega  
nihanja potniških vagonov 346

### **Strokovna literatura**

- Ocena knjige  
Nove knjige

### **Osebne vesti**

80. obletnica prof.dr. Janeza Dekleve  
Doktorati, magisteriji in diplome

### **Navodila avtorjem**

### **Papers**

- Kokalj, F., Samec, N., Škerget, L.: An Analysis of the  
Combustion Conditions in the Secondary  
Chamber of a Pilot-Scale Incinerator Based  
on Computational Fluid Dynamics
- Kušar, J., Berlec, T., Duhovnik, J., Grum, J., Starbek,  
M.: Finding and Exploiting the Hidden  
Logistic Potentials in a Company
- Petek, A., Pepelnjak, T., Kuzman, K.: An Improved  
Method for Determining a Forming Limit  
Diagram in the Digital Environment
- Bazaras, Ž., Leonavičius, M.: Simulating the Lateral  
Vibrations of Passenger Wagons

### **Professional Literature**

- 356 Book Review  
356 New Books

### **Personal Events**

- 358 80th Anniversary of Prof.Dr. Janez Dekleva  
359 Doctor's, Master's and Diploma Degrees

### **361 Instructions for Authors**

## **Analiza pogojev zgorevanja v sekundarni komori pilotne sežigalnice na podlagi računske dinamike tekočin**

### **An Analysis of the Combustion Conditions in the Secondary Chamber of a Pilot-Scale Incinerator Based on Computational Fluid Dynamics**

Filip Kokalj - Niko Samec - Leopold Škerget

*Predstavljena je numerična analiza zgorevanja v sekundarni komori (termoreaktorju) dvostopenjske pilotne sežigalnice z uporabo računske dinamike tekočin (RDT-CFD). Z raziskavo smo se osredotočili na analizo fizikalnih pogojev popolnega zgorevanja, kakor so temperatura, čas zadrževanja in turbulentno mešanje. Uporabili smo več izvedb programov vrste CFX za RDT, ki omogočajo uporabo različnih modelov zgorevanja v odvisnosti od vrste in načina zgorevanja. Izbira ustreznega modela zgorevanja je potekala na podlagi primerjave numeričnih rezultatov z izmerjenimi vrednostmi nekaterih makroparametrov zgorevanja v termoreaktorju. Uporabili smo modele na temelju enostopenjske bimolekularne kemijske reakcije in modela večstopenjskih reakcij, ki omogočata bolj natančno napoved dogajanja v sekundarni komori pilotne sežigalnice. Z večstopenjskima modeloma lahko izračunamo lokalne koncentracije ostankov nepopolnega zgorevanja, kar je izrednega pomena za primerno oblikovanje in optimiranje kurilnih naprav. Na podlagi izbranega modela zgorevanja je izvedena temeljna analiza zgorevanja v termoreaktorju z vidika doseganja pogojev popolnega zgorevanja pri različnih obratovalnih razmerah, ki so posledica spremenljive količine, sestave in kurilne vrednosti plinov iz primarne komore. Prišli smo do pomembne ugotovitve, da na kakovost zgorevanja v termoreaktorju v največji meri vplivata način dovoda sekundarnega in terciarnega zraka ter njuno razmerje.*

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: zgorevanje, analize numerične, modeli zgorevanja, računska dinamika tekočin)**

*A numerical analysis of the combustion in the secondary chamber (thermoreactor) of a two-stage pilot-scale incinerator using computational fluid dynamics (CFD) is presented. The focus of the research was on those physical conditions that ensure complete combustion, i.e., temperature, residence time and turbulent mixing. Various versions of the CFD program package CFX were used; they offer different combustion models for specific types and forms of combustion processes. The selection of an appropriate combustion model was based on a comparison of the numerical results and experimental values of some combustion macro parameters in a thermoreactor. Combustion models based on a one-step bimolecular chemical reaction and models based on multi-step reactions were used; this enabled a more detailed prediction of the combustion conditions in the secondary chamber of a pilot-scale incinerator. The products of incomplete combustion that are very important for the designing and optimization of combustion devices can be predicted by applying multi-step reaction models. An ultimate analysis of the complete combustion conditions was made based on a selected combustion model by considering those different operating conditions, causing variations in the quantity, composition and heating values of the gases coming from the primary chamber. The important conclusions are that the secondary and tertiary air intakes and the relationship between them have the greatest influence on the combustion quality in the thermoreactor.*

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: combustion, numerical analysis, combustion models, computational fluid dynamics)**

#### 0 UVOD

Postopki toplotne obdelave odpadkov, ki omogočajo energijsko izrabo odpadkov, so dandanes

#### 0 INTRODUCTION

Nowadays, thermal waste-treatment techniques and technologies enabling energy recovery

zelo razvite tehnologije. Ena takšnih tehnologij je tudi sežig oziroma zgorevanje odpadkov. Njegova glavna naloga je toplotni razkroj organskih snovi in proizvodnja energije iz odpadkov. Pri postopku sežiga lahko pride tudi do nastanka onesnaževal, katerih količina v dimnih plinih je v veliki meri odvisna od kakovosti zgorevanja.

Z vidika navedenega je zelo pomembno poznavanje fizikalno-kemijskih pojavov v zgorevalnem prostoru, ki jih je mogoče dokaj natančno simulirati in analizirati z ustreznimi modeli računske dinamike tekočin (RDT) ([16], [8] in [7]). Rezultati numeričnih simulacij postopkov zgorevanja v različnih razmerah obratovanja omogočajo veliko podporo pri oblikovanju zgorevalnega prostora z vidika učinkovitega doseganja pogojev popolnega zgorevanja [12]. Nadalje zagotavljajo dobro oceno makroparametrov postopkov zgorevanja, ki jih je mogoče razmeroma preprosto preveriti na podlagi meritev [6]. Z numeričnimi simulacijami postopkov zgorevanja lahko ocenimo tudi obratovalno območje sežigalnice, predvsem z vidika različnih količin in kurilne vrednosti odpadkov, količine dimnih plinov in dodanega zraka.

Težišče prispevka je namenjeno numerični analizi pogojev zgorevanja na temelju:

- zagotovitve homogenosti temperaturnega polja (izogniti se področjem najbolj nizkih in visokih temperatur, ki pomenijo jedra za mogoč nastanek onesnaževal),
- učinkovitosti zgorevanja na osnovi koncentracij produktov zgorevanja in
- dovajanja sekundarnega in terciarnega zraka pod različnimi pogoji

v sekundarni komori sežigalnice. Na podlagi modeliranja zgorevanja v sekundarni komori pilotne sežigalnice je podana primerjava različnih modelov zgorevanja v okviru programa CFX. Nadalje je podana ocena, kateri model zgorevanja je najbolj natančen, stabilen in omogoča hiter izračun.

Praktično uporabnost numeričnega modeliranja in simulacij zgorevanja v sežigalnicah so do sedaj potrdili številni raziskovalci ([5], [7], [8] in [10]). Skupna ugotovitev vseh je, da je uporaba numeričnih orodij modeliranja in simulacij zgorevanja lahko zelo koristna in praktično uporabna, če uporabljeni ustrezni numerični modeli dovolj natančno opisujejo dejanske fizikalne razmere v zgorevalnem prostoru ([12], [13] in [4]). S tega vidika je velika pozornost namenjena prav izbiri ustreznega modela zgorevanja, ki

from waste are highly developed. One of these techniques is incineration, also known as waste combustion. Its aims are the thermal destruction of organic compounds and the production of energy from the waste. Some pollutants can be formed during the incineration process, whose quantity in the flue gasses depends on the quality of the combustion.

Based on the above facts, it is of key importance to have the necessary knowledge of the physical and chemical processes in a combustion chamber in order to accurately simulate and analyze them using the appropriate CFD packages ([16], [8] and [7]). Results from numerical simulations of combustion processes under various operating conditions provide important support in the design of a combustion chamber to the stage of complete combustion-condition fulfilment [12]. Furthermore, they ensure good estimations regarding some macro parameters of combustion processes and can be fairly easily examined by measurements [6]. A numerical simulation of the combustion process also enables a review of an incinerator's operating conditions, especially the amounts and calorific values of the input waste stream, the amount of flue gases and the quantity of added combustion air.

The main concern of this paper is focused on the numerical analyses of combustion conditions based on:

- assurance of a homogenous temperature field (to avoid low and high peak temperature areas presenting cores of possible pollutant formation),
- combustion efficiency when considering combustion products' compositions,
- various intake conditions of secondary and tertiary combustion air,

in the secondary chamber of an incinerator. A comparison of different combustion models involved in the CFX program was done based on combustion simulation in the secondary chamber of the pilot-scale incinerator. Furthermore, an assessment will be presented as to which of the combustion models is the most accurate, stable and fast.

The practical values of combustion modelling and incineration simulation have so far been confirmed by many investigators ([5], [7], [8] and [10]). The common denominator of their findings is that the application of numerical modelling tools and combustion simulation can be very useful and have practical applications if the chosen numerical models closely resemble, in physical terms, the actual conditions in the combustion chamber ([12], [13] and [4]). From this point of view, great attention was placed on the selection of an adequate com-

omogoča najbolj natančno analizo sežiga v termoreaktorju.

### 1 OPIS PILOTNE PREIZKUSNE SEŽIGALNICE

V naši raziskavi je uporabljena pilotna sežigalnica (sl. 1), katere tehnologija zgorevanja sodi v skupino dvostopenjskih oziroma dvokomornih sežigalnic, ki so bile prvotno razvite za sežig industrijskih, bolnišničnih in drugih nevarnih odpadkov. Takrat je zakonodaja za sežig teh odpadkov predpisovala strožja merila obratovanja kakor za sežig komunalnega (gospodinjskega) odpada. Glavni namen uporabe sekundarne komore je bil izboljšati kakovost zgorevanja in kolikor je le mogoče zmanjšati emisije strupenih onesnaževal [1].

Delovanje tovrstnih sežigalnic temelji na primanjkljaju zraka v primarni komori in na presežku zraka v sekundarni komori. To zagotavlja dobro zgorevanje, majhne emisije in manjšo porabo dodatnega goriva, če je kurilna vrednost odpadkov prenizka za samostojno zgorevanje [13].

Postopek zgorevanja dvokomornih sežigalnic je zasnovan na dveh fizikalno-kemijskih pojavih:

- segrevanju, sušenju in semipirolitičnem uplinjanju odpadkov v primarni komori in

combustion model, which would enable the most accurate analyses of incineration in the thermoreactor.

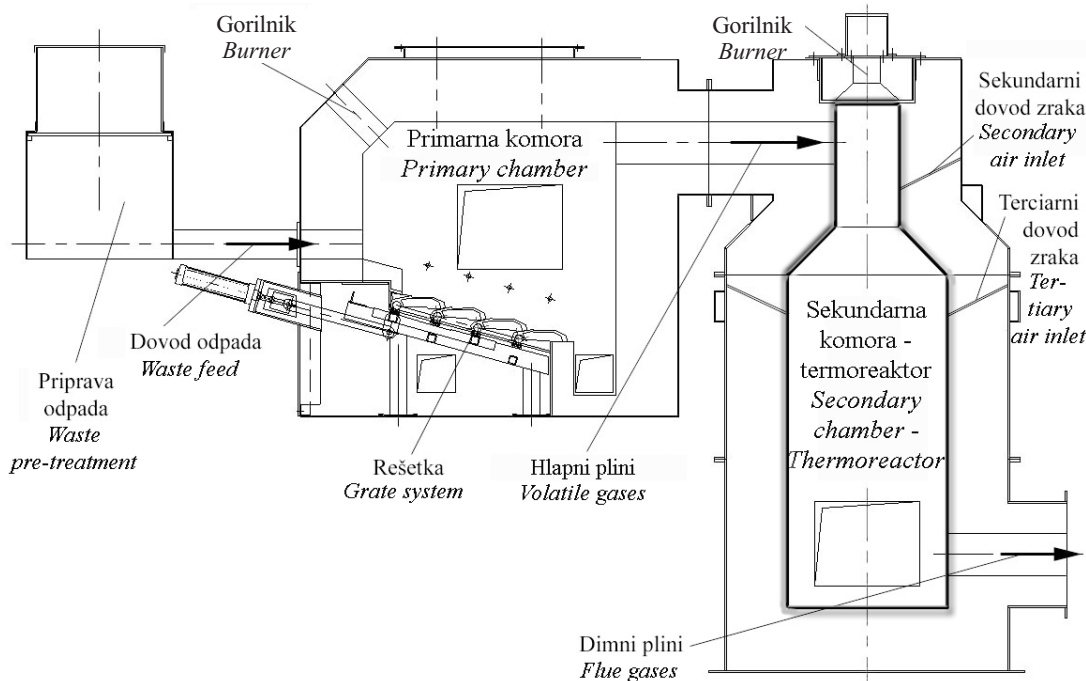
### 1 DESCRIPTION OF AN EXPERIMENTAL PILOT-SCALE INCINERATOR

This study was conducted on a pilot-scale incinerator (Figure 1); its combustion technology belongs to the group of two-stage or two-chamber incinerators, originally developed for the incineration of industrial, hospital and other hazardous waste. At that time the legislation demanded that the treatment of such waste was stricter than for municipal (household) waste incineration. The main purpose of the secondary chamber was to improve the combustion quality in order to reduce emissions of toxic pollutants as much as possible [1].

The function of these incinerators is based on primary-chamber starved-air and secondary-chamber excess-air conditions. This enables good combustion, low emissions and lower consumption of additional fuel when the calorific value of the waste is too low to enable self-combustion [13].

The combustion process in two-chamber incinerators is based on two groups of physical-chemical processes:

- warming, drying, semi-pyrolitic gasification of the waste in the primary chamber,



Sl. 1. Shema pilotne dvostopenjske sežigalnice  
Fig. 1. Schematic representation of a two-stage pilot-scale incinerator



- mešanju gorljivih plinov z zrakom, vžig in popolno zgorevanje v sekundarni zgorevalni komori.

Nepopolno zgorevanje v primarni komori predstavlja pirolitično uplinjevalne postopke, ki potekajo v razmerah pomanjkanja zraka. Količina dovedenega zraka znaša okrog 70% stehiometrično potrebnega zraka. Temperatura v primarni komori je odvisna od sestave odpada in se spreminja med 650 °C in 850 °C. Višje temperature kažejo na to, da zgori v primarni komori več plinov, zato pa gredo potem v sekundarno komoro plini z nižjo kurilno vrednostjo. Zagotavljanje stabilnih obratovalnih razmer v celotni sežigalnici je vezano na strukturo odpadkov, ki prihajajo v primarno komoro. Sestava odpadkov v veliki meri vpliva tudi na količino in kakovost plinov, ki se sproščajo v primarni komori.

Termoreaktor je fizično ločen od primarne komore. Opremljen je z gorilnikom, ki zagotavlja zagon in stabilno obratovanje tudi v primeru nižjih kurilnih vrednosti plinov iz primarne komore. Na postopke v termoreaktorju v veliki meri vplivata količina in smer dovoda sekundarnega in terciarnega zraka. Ta mora zagotoviti ustrezno mešanje plinov in učinkovito zgorevanje. Predvsem je pomembno doseganje velike homogenosti zmesi reaktantov in temperaturnega polja, da ne pride do nastanka neželenih produktov nepopolnega zgorevanja.

## 2 MODELIRANJE TURBULENTNEGA REAKTIVNEGA TOKA

Zgorevanje v termoreaktorju je dokaj natančno popisano s sistemom diferencialnih enačb (Navier Stokesove enačbe - NSE) reaktivnega toka. Sistem enačb sestavljajo zakon o ohranitvi snovi, gibalne količine in energije. NSE lahko rešimo neposredno za laminarni kakor tudi za turbulentni reaktivni tok, za kar pa porabimo veliko računskih moči in časa. Zato se je uveljavila Reynoldsova zamisel o dekompoziciji trenutne vrednosti poljubne makroskopske veličine toka na časovno povprečno vrednost in njej pripadajoči oscilirajoči del za simulacijo turbulentnih reaktivnih tokov:

$$\phi(x_i, t) = \bar{\phi}(x_i) + \phi'(x_i, t) \quad (1)$$

kjer je:

which is:

$$\bar{\phi}(x_i) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi(x_i, t) dt \quad (2)$$

- mixing of the volatile gases with air, ignition and complete combustion in the secondary combustion chamber.

Incomplete combustion in the primary chamber represents the pyrolytic and gasification processes and takes place during air shortage. The quantity of air added is around 70% of the stoichiometric air needed. The temperature in the primary chamber depends on the waste's composition and varies from 650 to 850°C. Higher temperatures indicate that more gases have been burnt in the primary chamber and consequently lower-calorific-value gases then pass to the secondary chamber. Stable operating conditions for the whole incinerator depend on the waste composition introduced into the primary chamber. Waste composition greatly influences the quantity and quality of the volatile gases released in the primary chamber.

The thermoreactor is physically separated from the primary chamber. It is equipped with a burner that ensures start-up and stable operation, even in the case of lower calorific gas values coming from the primary chamber. The amount and direction of the secondary- and tertiary-air induction in the thermoreactor play an important role in the thermoreactor processes. It has to ensure proper mixing of the gases and efficient combustion. Crucially, it is important to achieve a high homogeneity of the reactant mixture and the temperature field to prevent the formation of undesirable products due to incomplete combustion.

## 2 TURBULENT – REACTING FLOW MODELING

The combustion in a thermoreactor is described quite accurately by a system of differential equations (Navier Stokes equations – NSEs) of the reacting flow. It is composed of continuity-, momentum- and energy-conservation equations. The NSEs can be solved directly for laminar, as well as for turbulent reacting flow, by spending a lot of computational power and time. Therefore, the Reynolds idea of the arbitrary macroscopic value of fluid flow decomposition being on the time-averaged value and its variable part, has been widely used for turbulent reacting flow simulations:

To povprečenje je dalo Reynoldsove povprečene NSE (RPNS), predstavljene v naslednji obliki:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{v}_j) = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \bar{v}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{v}_j \bar{v}_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \bar{f}_{vi} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} + \overline{\rho v'_j v'_i}) \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \bar{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{v}_j \bar{h}) - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{q}_j + \overline{\rho v'_j h'}) = \bar{I}_T + \bar{I}_R \tag{5}$$

$\bar{\rho}$ ,  $\bar{h}$  in  $\bar{v}_j$  so srednje vrednosti gostote, entalpije in hitrosti tekočine,  $\bar{f}_{vi}$  je vsota vseh prostorninskih sil,  $p$  je tlak,  $\bar{I}_T$  zgorevalni in  $\bar{I}_R$  sevalni izvorni/ponorni člen,  $\bar{\tau}_{ij}$  in  $\bar{q}_j$  sta viskozni napetostni tenzor in toplotni tok. Z uporabo RPNS nastanejo dodatni členi, ki jih imenujemo Reynoldsove napetosti ( $\overline{\rho v'_j v'_i}$ ) in tokovi ( $\overline{\rho v'_j \phi'}$ ). Modelirani so z uvajanjem turbulentne viskoznosti  $\eta_t$ . Reynoldsov napetostni tenzor je določen z Boussinesqovim modelom turbulentne viskoznosti  $\eta_t$ :

$$\overline{\rho v'_j v'_i} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \left( \rho k + \eta_t \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) - \eta_t \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \tag{6}$$

Turbulentno viskoznost lahko izračunamo z uporabo različnih turbulentnih modelov za sklenitev sistema Reynoldsovih enačb. Za potrebe modeliranja predstavljenega reaktivnega toka smo uporabili dvoenačbni turbulentni model  $k - \epsilon$ . Uporabo turbulentnega modela  $k - \epsilon$  je v primerih modeliranja reaktivnih tokov pokazalo več avtorjev ([5], [7], [8], [10] in [16]) kot zelo uspešno. Turbulentna viskoznost se izračuna z uporabo:

$$\eta_t = \rho C_\eta \frac{k^2}{\epsilon} \tag{7}$$

kjer je  $k$  turbulentna kinetična energija –  $k = 0,5(\overline{v'_i v'_i})$  in  $\epsilon$  njeno razsipanje (nepovračljiva sprememba kinetične energije v notranjo energijo).

Lokalne vrednosti  $k$  in  $\epsilon$  se izračunajo z uporabo naslednjih prenosnih enačb:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{v}_j k) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = I_k \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{v}_j \epsilon) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] = I_\epsilon \tag{9}$$

izvirna člena sta modelirana kot:

$$I_k = \eta_t \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \tag{10}$$

This transformation produces the Reynolds' averaged NSEs (RANS), as presented in the following form:

$\bar{\rho}$ ,  $\bar{h}$  and  $\bar{v}_j$  are the mean values of density, enthalpy and fluid velocity,  $\bar{f}_{vi}$  is the sum of all the volume forces,  $p$  is the pressure,  $\bar{I}_T$  is the combustion and  $\bar{I}_R$  is the radiation source/sink terms.  $\bar{\tau}_{ij}$  and  $\bar{q}_j$  are the viscous stress tensor and the heat flux, respectively. Applying RANS, some additional terms have been produced named the Reynolds' stresses ( $\overline{\rho v'_j v'_i}$ ) and fluxes ( $\overline{\rho v'_j \phi'}$ ). They are modelled by the introduction of the turbulent viscosity  $\eta_t$ . The Reynolds' stress tensor is expressed with the Boussinesq model of turbulent viscosity  $\eta_t$ :

Turbulent viscosity can be determined using various turbulent models to closedown the system of Reynolds' equations. The two-equation  $k - \epsilon$  turbulent model is used for the purpose of the presented reacting flow modelling. The application of the  $k - \epsilon$  turbulent model in the modelling of reacting flows has already been proven by many authors ([5], [7], [8], [10] and [16]) as a very successful one. The turbulent viscosity is computed using:

where  $k$  is turbulent kinetic energy –  $k = 0,5(\overline{v'_i v'_i})$  and  $\epsilon$  is its dissipation (irreversible transformation of kinetic energy into internal energy).

Local values of  $k$  and  $\epsilon$  are computed using the following transport equations:

the source terms are modelled as:

$$I_\varepsilon = C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left[ \eta_t \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \right] - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

Reynoldsov entalpijski tok  $\overline{\rho v'_j h'}$  v enačbi (5) je prav tako določen s turbulentno viskoznostjo:

The Reynolds' enthalpy flux  $\overline{\rho v'_j h'}$  in equation (5) is also defined with turbulent viscosity:

$$\overline{\rho v'_j h'} = - \frac{\eta_t}{Pr_t} c_p \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (12)$$

kjer je  $Pr_t$  turbulentno Prandtlovo število.  $C_{\eta p}$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\sigma_k$  in  $\sigma_\varepsilon$  so stalnice, katerih vrednosti, ki smo jih uporabili v našem delu, so:  $C_\eta=0,09$ ;  $C_1=1,44$ ;  $C_2=1,92$ ;  $\sigma_k=1$  in  $\sigma_\varepsilon=1,3$ .

where  $Pr_t$  is the turbulent Prandtl number.  $C_{\eta p}$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\sigma_k$  and  $\sigma_\varepsilon$  are constants, and their values used in the presented work are:  $C_\eta=0.09$ ;  $C_1=1.44$ ;  $C_2=1.92$ ;  $\sigma_k=1$  and  $\sigma_\varepsilon=1.3$ .

Konvektivno-difuzivna enačba masnega deleža ( $\xi_k$ ) komponente  $k$  ima zaradi Reynoldsovega povprečenja dodatni člen, ki ga imenujemo turbulentni tok masnega deleža:

The convection-diffusive equation of mass species ( $\xi_k$ ) of the component  $k$  has, due to Reynolds' averaging, an additional term called the turbulent mass species flux:

$$\overline{\rho \xi_k v'_j} = \frac{\eta_t}{Sc_t} \frac{\partial \xi_k}{\partial x_j} \quad (13)$$

in ga lahko modeliramo s turbulentno viskoznostjo z uporabo modela  $k-\varepsilon$ . Celotna konvektivno-difuzivna enačba za masni delež je:

and can be modelled with turbulent viscosity using the  $k-\varepsilon$  model. The complete advection-diffusive mass species equation is:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho \xi_k}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho v_j \xi_k}) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \rho D_k + \frac{\eta_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \xi_k}{\partial x_j} \right] = \overline{I_{\xi_k}} \quad (14)$$

kjer je  $Sc_t$  turbulentno Schmidtovo število in  $D_k$  je molekularna snovska difuzivnost sestavine  $k$ . Z novim členom:

where  $Sc_t$  is the turbulent Schmidt number and  $D_k$  the molecular diffusion coefficient of component  $k$ . With the new term:

$$\Gamma_{k,eff} = \rho D_k + \frac{\eta_t}{Sc_t} = \Gamma_k + \frac{\eta_t}{Sc_t} \quad (15)$$

lahko enačbo (14) ponovno zapišemo kot:

equation (14) can be rewritten as:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho \xi_k}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho v_j \xi_k}) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{k,eff} \frac{\partial \xi_k}{\partial x_j} \right) = \overline{I_{\xi_k}} \quad (16)$$

Izvorni člen energijske enačbe ( $\overline{I_T}$ ) in enačbe masnega deleža ( $\overline{I_{\xi_k}}$ ) izračunamo z naslednjima enačbama, pri čemer je  $\overline{\omega_k}$  izračunana s turbulentnim modelom zgorevanja:

The source terms of the energy ( $\overline{I_T}$ ) and mass species ( $\overline{I_{\xi_k}}$ ) transport equations are computed by the following two equations, where  $\overline{\omega_k}$  is computed by the turbulent combustion model:

$$\overline{I_T} = - \sum_{k=1}^N \Delta H_{f,k}^\circ \overline{\omega_k} \quad (17)$$

$$\overline{I_{\xi_k}} = M_k \overline{\omega_k} \quad (18)$$

kjer sta  $\Delta H_{f,k}^\circ$  standardna tvorben entalpija in  $M_k$  molska masa sestavine  $k$ . V enačbah (17) in (18) predstavlja  $\overline{\omega_k}$  stopnjo nastanka/porabe komponente  $k$  in je definiran z naslednjim izrazom:

where  $\Delta H_{f,k}^\circ$  is the standard formation heat and  $M_k$  the molecular mass of the component  $k$ . In equations (17) and (18) the  $\overline{\omega_k}$  stands for the formation/consumption rate of component  $k$  and is defined by the following expression:

$$\overline{\omega_k} = \frac{d[X_k]}{dt} = (v_k'' - v_k') \overline{R_k} \quad (19)$$



ki je zapisan za splošno obliko kemijske reakcije:



kjer  $\nu'_k$  in  $\nu''_k$  označujeta stehiometrične koeficiente komponente  $k$  za reaktante oziroma produkte. Hitrost kemijske reakcije  $\bar{R}_k$  v enačbi (19) računamo z ustreznimi modeli zgorevanja. Izpostaviti velja, da je dandanes v praktični uporabi veliko število turbulentnih modelov zgorevanja. Njihova uporabnost je odvisna od tipa zgorevanja (difuzijski, kinetični, mešani), vrste goriva (trdno, kapljevito, plinasto) in kurilne naprave (peči, kotli, motorji). Večina modelov vsebuje različne empirične stalnice in jih je treba določiti za vsak primer posebej. Pri tem pa je treba poudariti, da zaradi velike nelinearnosti povprečna vrednost hitrosti kemijske reakcije ni enaka vrednosti, katerih osnova so povprečne vrednosti temperature in koncentracije sestavin reaktivnega toka:

$$\bar{R}_k \neq R_k(\bar{T}, \bar{\xi}_k) \quad k = 1, \dots, N \quad (21),$$

ki jih dobimo z reševanjem RPNS. Uporaba povprečnih vrednosti lahko v posameznih primerih vodi do napačnih izračunov reakcijskih hitrosti [9]. V takih primerih je treba uporabiti primernejše statistične modele zgorevanja na podlagi porazdelitvenih verjetnostnih funkcij (PVF). V primerih modeliranja postopkov zgorevanja z nižjimi oscilacijami temperature v zgorevalnem prostoru, kar je značilno tudi za naš predstavljen primer, dajejo empirični modeli sprejemljive rezultate ([8] in [10]).

Izvorni sevalni člen  $\bar{I}_R$  modeliramo z različnimi sevalnimi modeli, ki pomenijo poenostavitev sevalne prenosne enačbe [4]. Izvirni člen je divergenca skupnega sevalnega toplotnega toka  $q^R$ , ki ga dobimo z integracijo spektralnega sevalnega toplotnega toka  $q_v$  po celotnem spektru:

$$\bar{I}_R = -\frac{\partial}{\partial x_j} (q_j^R) = \int_0^\infty q_v^R dv \quad (22),$$

kjer je spektralni sevalni toplotni tok  $q_v^R$  enak:

$$q_v^R(r_j, n_j) = \int s_j n_j I_v(r_j, s_j) d\Omega_s \quad (23).$$

V enačbi (23)  $r_j$  označuje vektor lokacije,  $n_j$  normalni vektor,  $s_j$  smerni vektor in  $I_v$  je spektralni sevalni prenos v določeni smeri, prostoru in spektru na temelju emisije, absorpcije in razpršitve po prenosnem sredstvu.

which is written for the general form of the chemical reaction:

where  $\nu'_k$  and  $\nu''_k$  designate the stoichiometric coefficients of component  $k$  for the reactants and products, respectively. The chemical reaction rate  $\bar{R}_k$  in equation (19) is calculated using appropriate combustion models. It has to be pointed out that nowadays many turbulent combustion models are in practical use. Their application depends on the type of combustion (diffusion, kinetic, mixed), fuel type (solid, liquid, gaseous) and combustion device (furnace, boiler, engine). Most of the models include various empirical constants that need to be individually determined case by case. It needs to be pointed out that, due to the high non-linearity of the problem, the average value of the chemical reaction rate is not equal to the reaction-rate value based on the average values of the temperature and mass species

that are achieved by solving the RANS equations. The use of the average values in certain instances can lead to false computation results of the reaction rate [9]. In such instances it is reasonable to apply more appropriate statistical combustion models based on probability density functions (PDFs). In the case of combustion modelling at lower temperature oscillations in the combustion chamber, as in the presented case, the empirical models provide acceptable results ([8] and [10]).

The radiation source term  $\bar{I}_R$  is modelled with different radiation models that represent a simplification of the Radiation Transport Equation [4]. The source term is a divergence of the total radiative heat flux  $q^R$ , obtained by integrating the spectral radiative heat flux  $q_v$  over the spectrum:

where the spectral radiative heat flux  $q_v^R$  is:

In Equation (23)  $r_j$  designates the vector location,  $n_j$  is the normal vector,  $s_j$  is the direction vector and  $I_v$  is the spectral radiative transfer in a fixed direction, location and spectrum based on emitting, absorbing and medium scattering.

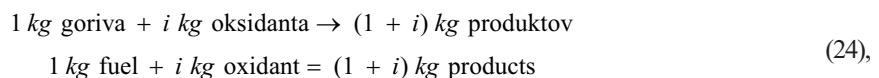
Obravnavali smo tudi sevalni model za bolj natančen popis fizikalnega dogajanja, ki se odvija v termoreaktorju. Kratka analiza različnih sevalnih modelov je pokazala le manjše razlike v numeričnih rezultatih ob uporabi privzetih nastavitev programskega paketa. Zato je sevalni model vpet v računsko analizo, vendar ne bo predmet podrobnejše razprave v tem prispevku.

V našem predstavljenem primeru gre za difuzijsko obliko zgorevanja plinov (zmes CO in CH<sub>4</sub>) v valjastem zgorevalnem prostoru (sl. 1) s protitočnim vplivom vzgona. Gre za specifičen primer, značilen za sežigalnice z ločeno sekundarno komoro, za katerega ni na voljo splošno uporabnega modela zgorevanja. V ta namen smo preizkusili in ovrednotili različne modele zgorevanja, ki so na voljo v programu CFX: mešalni (imenovan MIB), vrtinčni (im. EBU), vrtinčno-disipacijski model (im. EDC), model končne hitrosti kemijskih reakcij (im. FRC) in kombiniran model slednjih dveh (im. COMBINED). Nekateri modeli dodatno omogočajo tudi izračun večstopenjske kemijske kinetike, ki omogoča podrobnejšo analizo pogojev nastanka škodljivih snovi.

### 3 MODELI TURBULENTNEGA ZGOREVANJA

#### 3.1 Mešalni model (MIB)

Model zgorevanja MIB predpostavlja hitre kemijske reakcije zgorevanja. To pomeni, da pride do trenutne reakcije, če so na istem mestu navzoči reaktanti in ob tem nastanejo produkti zgorevanja. Predpostavimo, da se gorivo in oksidant vežeta pri stalnem razmerju  $i$ , ki ga imenujemo stehiometrično razmerje, tako da je:



potem lahko delež zmesi  $f$  (reakcijska koordinata) za reakcijo definiramo kot [4]:

$$f = \frac{\chi - \chi_O}{\chi_F - \chi_O} \quad (25)$$

kjer je:

$$\chi = \xi_F - \frac{\xi_O}{i} \quad (26)$$

in  $\xi$  je masni delež in indeksa  $F$  in  $O$  pomenita gorivo in oksidant. Tako sta  $\chi_O$  in  $\chi_F$  uporabljena v enačbi (25) enaka  $\chi_O = -1/i$  in  $\chi_F = 1$ .

The radiation model was also considered for describing more accurately the physical events presented in a thermoreactor. A brief analysis of different available radiation models showed only minor differences in terms of the achieved numerical results, using the program package's default settings. Thus the radiation model is included in computational analysis but will not be discussed in more detail in this paper.

In the presented case there is a diffusion type of gaseous combustion (CO and CH<sub>4</sub> mixture) in the cylindrical combustion chamber (Figure 1), with a cross flow buoyancy influence. It is a specific case problem, common for incinerators with a separated secondary chamber for which there is no available combustion model, in general. For this purpose different combustion models available in the CFX program: Mixed is burnt (MIB), Eddy break up (EBU), Eddy dissipation combustion (EDC), Finite rate chemistry (FRC) model and the combined (COMBINED) model of the last two, were tested and evaluated. Some models additionally enable the computation of multi-step chemical kinetics, providing more detailed numerical analyses of the pollutant formation conditions.

### 3 TURBULENT COMBUSTION MODELS

#### 3.1 Mixed IS Burnt Model (MIB)

The MIB combustion model presumes infinitely fast chemical reactions of combustion. Thus, if reactants are present at the same place and time, instantaneous reaction occurs and produces combustion products. Assuming that the fuel and oxidant react at a constant ratio  $i$ , also called the "stoichiometric ratio", such that:

then the mixture fraction  $f$  for the reaction can be defined as [4]:

and  $\xi$  is the mass fraction and the indices  $F$  and  $O$  stand for the fuel and the oxidant. The  $\chi_O$  and  $\chi_F$  applied in equation (25) are  $\chi_O = -1/i$  and  $\chi_F = 1$ .

Srednja vrednost deleža zmesi  $f$  je označena kot  $F$  in jo računamo z naslednjo obliko prenosne enačbe [4]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho F + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v F) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \eta + \frac{\eta_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial F}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (27),$$

kjer so  $\rho$  gostota tekočine,  $v$  srednja hitrost tekočine,  $\eta$  in  $\eta_t$  sta molekularna in turbulentna viskoznost tekočine in  $Pr_t$  je ekvivalentno turbulentno Prandtlovo število.

Stopnja nastanka/porabe  $\bar{\omega}_k$  komponente  $k$  v enačbi (19) se izračuna na podlagi deleža zmesi:

$$\begin{aligned} \text{če je/if } F > F_{ST}, \text{ potem/then: } \xi_F &= \frac{F - F_{ST}}{1 - F_{ST}}, \xi_O = 0, \xi_P = 1 - \xi_F \\ \text{če je/if } F < F_{ST}, \text{ potem/then: } \xi_O &= 1 - \frac{F}{F_{ST}}, \xi_F = 0, \xi_P = 1 - \xi_O \end{aligned} \quad (28),$$

kjer je  $F_{ST} = \frac{1}{1+i}$  ( $\chi=0$ ) in  $\xi_p$  označuje masni delež produktov zgorevanja.

Ta model je pogosto uporabljen za modeliranje čistega difuzijskega plamena, za kar sta potrebna dva ločena vhodna tokova reaktantov. Pomanjkljivost modela je v enostopenjski neskončno hitri kemijski reakciji, kar onemogoča napovedovanje ostankov nepopolnega zgorevanja in vmesnih radikalov.

### 3.2 Vrtinčni model (EBU)

Model zgorevanja EBU se uspešno uporablja za modeliranje odprtega plamena in modeliranja v industrijskih pečeh in zgorevalnih napravah [4] z različnimi gorivi.

Pri simulacijah z uporabo modela zgorevanja EBU se rešuje prenosna enačba za srednji delež zmesi in masni delež goriva. Masna deleža oksidanta in ostankov se izračunata z uporabo algebraičnih in ne diferencialnih enačb. Vsota vseh teh treh masnih deležev (gorivo, oksidant, ostanki) je v vsaki posamezni končni prostornini enaka ena. To omogoča sočasni obstoj goriva, oksidanta in produktov v zmesi, kar je blizu dejanskim razmeram zgorevanja v večjih kurilnih napravah s stalnim dovodom goriva.

Hitrost kemijske reakcije je sorazmerna:

$$\bar{R}_k \approx \frac{1}{t_i} \quad (29),$$

pri čemer je  $t_i$  odvisen od turbulentnega polja in pomeni dobo trajanja vrtinčka oziroma čas njegovega razpada:

The mean value of the mixture fraction  $f$  is designated with  $F$  and is computed with the following form of transport Equation [4]:

where  $\rho$  is the fluid density,  $v$  is the mean velocity of the fluid,  $\eta$  and  $\eta_t$  are the molecular and turbulent viscosities of the fluid and  $Pr_t$  is the equivalent turbulent Prandtl number.

The formation/consumption rate  $\bar{\omega}_k$  of the component  $k$  in Equation (19) is based on the mixture fraction:

where  $F_{ST} = \frac{1}{1+i}$  ( $\chi=0$ ) and  $\xi_p$  designates the combustion products' mass fraction.

This model is frequently used for modelling a pure diffusion flame requiring two separate intakes of reactants. The deficiency of the model is in its one-step infinitely fast chemical reaction that prevents products of incomplete combustion and intermediate radical predictions.

### 3.2 Eddy Break-up Model (EBU)

The EBU combustion model is successfully applied for open-fire modelling and industrial-furnace and combustion-device modelling [4] for various fuels.

The transport equation for mean-mixture fraction and fuel-mass fraction is solved by applying the EBU combustion model. The mass fractions of the oxidant and the products are computed using algebraic equations instead of differential equations. The sum of all three mass fractions (fuel, oxidant and products) equals one in every single finite volume. This enables the simultaneous existence of fuel, oxidant and products in a mixture that is close to combustion conditions, in larger combustion devices with a continuous fuel supply.

The chemical reaction rate is proportional to:

where  $t_i$  depends on the turbulent field and represents the eddy lifetime or its decay time:

$$\frac{1}{t_i} = \frac{\varepsilon}{k} \tag{30}$$

kjer sta  $k$  turbulentna kinetična energija in  $\varepsilon$  njeno razsipanje. Hitrost kemijske reakcije je skladno s hipotezo tega modela tudi sorazmerna oscilacijam masnega deleža sestavin:

where  $k$  is the turbulent kinetic energy and  $\varepsilon$  its dissipation. According to the hypothesis of this model the chemical reaction rate is also proportional to the oscillations of the component mass fraction:

$$\bar{R}_k \approx \overline{\xi_k'^2} \tag{31}$$

Nazadnje lahko zapišemo tudi formulacijo hitrosti kemijske reakcije [4]:

Finally, the formulation of the chemical reaction rate can be written as [4]:

$$\bar{R}_k = -C_{EBU} \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{\xi_k'^2} \tag{32}$$

Stalnico  $C_{EBU}$  je treba skladno s priporočili in izkušnjami prilagoditi specifični simulaciji zgorevanja. V okviru naše raziskave je imela stalnica vrednost  $C_{EBU}=4$ .

The constant  $C_{EBU}$  needs to be adjusted for a specific combustion simulation, in accordance with recommendations and experience. In our investigation the constant value was  $C_{EBU}=4$ .

Model je primeren le za simulacije, kjer ima mešanje oziroma tokovno dogajanje odločilno vlogo pri zgorevanju. Ne vključuje pa tudi členov, ki v tokovnem smislu pomenijo omejitve zgorevanja (npr. ugasnitev plamena, hladne cone, slabo mešanje). Model tudi ne omogoča napovedi koncentracij produktov nepopolnega zgorevanja.

The model is convenient for simulations where mixing or flow conditions are crucial for combustion. It does not include terms limiting combustion in the case of flow disturbances (i.e., flame extinguishing, cold zones, improper mixing). Product concentrations of incomplete combustion cannot be predicted using this model.

### 3.3 Vrtinčno disipacijski model (EDC)

### 3.3. Eddy-Dissipation Model (EDC)

Model EDC temelji na predpostavki, da so kemijske reakcije hitrejše od difuzijskih pojavov v reaktivnem tokovnem polju. Ko se reaktanti premešajo na molekularnem nivoju, dobimo produkte zgorevanja. Pri turbulentnih tokovih je čas mešanja v glavnem odvisen od karakteristik vrtincev. Zato je hitrost reakcije sorazmerna času mešanja:

The EDC model is based on an assumption that chemical reactions are faster than diffusion processes in a reacting flow field. The products of combustion are produced when reactants are mixed at the molecular level. In turbulent flows the mixing time basically depends on the eddy's properties. The reaction velocity is, therefore, proportional to the mixing time:

$$\text{hitrost reakcije / reaction rate} \propto \frac{\varepsilon}{k} \tag{33}$$

V modelu EDC je hitrost kemijske reakcije določena z manjšo vrednostjo naslednjih izrazov z upoštevanjem [4]:

The chemical reaction rate in the EDC model is determined by the lower value of the following expressions by considering [4]:

- reaktantov:

- reactants:

$$\bar{R}_k = A \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \frac{[X_k]}{\nu'_k} \right) \tag{34}$$

kjer je  $[X_k]$  molska koncentracija komponente  $k$  in vključuje samo reaktante,  $A$  pa je stalnica modela, katere vrednost se razlikuje od primera do primera; v našem primeru je bila  $A=4$ ;

where  $[X_k]$  is the molar concentration of component  $k$ , including only the components of the reactants,  $A$  is a constant and its value varies from case to case, and in this case it was  $A=4$ ;

- produktov:

- products:

$$\bar{R}_k = AB \frac{\varepsilon}{k} \left( \frac{\sum_{k=1}^P [X_k] M_k}{\sum_{k=1}^P \nu''_k M_k} \right) \quad (35),$$

kjer  $P$  obsega vse sestavine produktov v elementarni reakciji (enačba 20),  $B$  pa je dodatna stalnica modela (v našem primeru  $B=-1$ ). Pri večstopenjskih reakcijah (2 ali 5 reakcijskih stopenj) je v uporabi samo izraz (34).

Podobno kakor drugi modeli tudi ta vsebuje stalnice, ki jih je treba določiti na podlagi preizkusov in priporočil. Hitrost kemijske reakcije je odvisna od jakosti tokovnega polja ( $f(k)$ ). Uporaba večstopenjske kinetike omogoča napoved koncentracij pomembnejših vmesnih produktov zgorevanja (radikalov) in koncentracij produktov nepopolnega zgorevanja.

### 3.4 Model končne hitrosti kemijskih reakcij (FRC)

Model FRC predstavlja kinetični model zgorevanja, ki se večinoma uporablja za simulacijo laminarnega zgorevanja. Splošno je uporaben tudi za turbulentno zgorevanje v primeru reševanja NSE z neposrednim simuliranjem. V nekaterih primerih, ko nihanja temperatur niso prevelika, pa je uporaben tudi v primeru reševanja RPNS. Še posebno je uporaben v primeru sestavljenih modelov z reševanjem področij šibke turbulence reaktivnih tokov. Hitrost kemijske reakcije lahko zapišemo za nasprotujočo kemijsko reakcijo (20) na podlagi zakona o delovanju mas v naslednji obliki [4]:

$$\bar{R}_k = k_f \prod_{k=1}^N [X_k]^{v_k} - k_b \prod_{k=1}^N [X_k]^{v_k} \quad (36),$$

kjer je  $[X_k]$  molska koncentracija komponente  $k$ ,  $k_f$  in  $k_b$  pa stalnici hitrosti kemijskih reakcij (naprej in nazaj), ki jih izračunamo z Arrheniusovo enačbo:

$$k_{f,b} = A_k T^{\beta_k} \exp\left(-\frac{E_k}{R_m T}\right) \quad (37),$$

kjer so:

- $A_k$  ..... predeksponencialni faktor,
- $\beta_k$  ..... temperaturni eksponent (brezrazsežni),
- $E_k$  ..... energija aktiviranja,
- $T$  ..... temperatura,
- $R_m$  ..... splošna plinska stalnica.

Vrednosti koeficientov  $A_k$ ,  $\beta_k$  in  $E_k$  so podane v preglednicah [2], [3] in [11] za različne tipe kemijske reakcije v smeri naprej in nazaj.

where  $P$  includes all the components of the products in the elementary reaction (Equation 20) and  $B$  is an additional model constant ( $B=-1$  for our application). Applying multi-step reactions (2 or 5 reaction steps) only expression (34) is in use.

Like others, this model includes constants that have to be determined based on experiments and recommendations. The chemical kinetic rate depends on the flow-field intensity ( $f(k)$ ). The use of multi-step kinetics enables the prediction of important intermediate combustion products (radicals) and the concentrations of incomplete combustion products.

### 3.4 Finite-Rate Chemistry Model (FRC)

The FRC model represents a kinetic combustion model applied mostly for a laminar combustion simulation. In the general case of turbulent combustion it is applicable for solving NSE by a direct simulation method. In specific circumstances when the temperature oscillations are not too high it can also be used in the case of RANS equations. It is especially applicable for the case of combined models solving low turbulence issues regarding reacting flows. The chemical reaction rate can be written for the opposite chemical reaction (20) based on the law of mass interaction in the following form [4]:

where  $[X_k]$  is the molar concentration of component  $k$ ,  $k_f$  and  $k_b$  are chemical reaction rate constants (forward and backward) computed by the Arrhenius equation:

where:

- $A_k$  ..... pre-exponential factor,
- $\beta_k$  ..... temperature exponent (dimensionless),
- $E_k$  ..... activation energy,
- $T$  ..... temperature,
- $R_m$  ..... general gas constant.

The values of the coefficients  $A_k$ ,  $\beta_k$  and  $E_k$  are listed in Tables [2], [3] and [11], for different types of chemical reactions for forward and backward rates, separately.



Model FRC je uporaben predvsem za področja reaktivnega toka, kjer ima kemijska kinetika zgorevanja prevladujoč vpliv v primerjavi s turbulentnim mešanjem. S tega vidika za celotno področje reaktivnega toka model samostojno ni uporaben, ampak skupaj z nekaterimi drugimi modeli, običajno EDC.

### 3.5 Sestavljeni model (COMBINED)

V okviru programa CFX prestavlja model COMBINED sestavo modelov EDC in FRC. V primeru uporabe tega modela se ločeno računajo reakcijske hitrosti po obeh modelih. V modelu EDC je hitrost kemijske reakcije povezana s turbulenco in v primeru šibke turbulence bo vrednost reakcijske hitrosti velika zaradi majhne vrednosti turbulentne kinetične energije (enačbi (34) in (35)), medtem ko bo vrednost reakcijske hitrosti po modelu FRC manjša. V primeru močne turbulence so razmere nasprotno, zato za nadaljnji izračun uporabimo manjšo vrednost reakcijske hitrosti, izračunane z obema modeloma, kar bolje opisuje dejanske razmere. Enak postopek se odvija v vsakem računskem koraku. Tako je lahko v prvem koraku zgorevanje omejeno s kemijsko kinetiko, v drugem pa s turbulentnim mešanjem na istem kraju.

Model je uporaben za različne tipe turbulentnega reaktivnega toka s širokim območjem Damköhlerjevih števil, ki podaja razmerje med hitrostjo kemijske kinetike in jakostjo turbulence. Pomanjkljivost modela je daljši čas računanja, ki je potreben zaradi dvojnega računanja izvornih členov z različnima modeloma zgorevanja.

#### 4 ROBNI POGOJI IN NUMERIČNI MODEL

Robne pogoje termoreaktorja (sl. 2) smo določili na podlagi dejanskih obratovalnih razmer v pilotni sežigalni napravi:

- hitrost plinov iz primarne komore: 0,25 m/s ( $\approx 30 \text{ m}^3/\text{h}$ ),
- temperatura plinov iz primarne komore: 700 °C,
- hitrost zraka skozi sekundarne dovode: 6 m/s pri 60 % skupne dovedene količine zraka,
- hitrost zraka skozi terciarne dovode: 4 m/s pri 40 % skupne dovedene količine zraka,
- temperatura dovedenega zraka: temperatura okolice sežigalnice ( $\approx 25 \text{ °C}$ ),
- smer dovedenega zraka za vsak dovod posebej po načrtu sežigalnice

The FRC model is primarily applicable for reacting flow where combustible chemical kinetics holds a dominant role compared to turbulent mixing. The model is inapplicable itself for a complete range of turbulent reacting flows so it is usually in combination with other models, mostly with the EDC model.

### 3.5 Combined Model (COMBINED)

The COMBINED model in CFX is composed of the EDC and FRC models. In the application of this model the reaction rates are calculated separately with both models. In the EDC model the reaction rate is linked to turbulence and, in the case of low turbulence, the reaction rate is high due to the low turbulent kinetic energy (Equations (34) and (35)), while the value of the FRC model is lower. In the case of higher turbulence intensity, the conditions are inversed and for further calculation the lower value of both models is used, reflecting the real physical circumstances better. The same procedure is considered at every calculation step. Therefore, the first step can be limited by chemical kinetics and the second step by turbulent mixing at the same place.

This model seems to be applicable for various types of turbulent reacting flows with a wide range of Damköhler numbers that define the relationship between the chemical reaction rate and the turbulence intensity. The model's weakness is a longer computational time because of the double computation of source terms with different combustion models.

#### 4 BOUNDARY CONDITIONS AND NUMERICAL MODEL

The real operating parameters of the pilot-scale incinerator were considered for prescribing the corresponding boundary conditions of the thermoreactor (Figure 2):

- velocity of volatile gases from the primary chamber: 0.25 m/s ( $\approx 30 \text{ m}^3/\text{h}$ ),
- temperature of volatile gases from the primary chamber: 700°C,
- velocity of air through the secondary air inlets: 6 m/s at 60 % of total air inflow,
- velocity of air through the tertiary air inlets: 4 m/s at 40% of total air inflow,
- temperature of added air: incinerator surrounding temperature ( $\approx 25 \text{ °C}$ ),
- air directions for every single inlet, based on the blueprint;



Preglednica 1: Prostorninska sestava plinov na vstopu v termoreaktor

Table 1: Volume gas composition at the thermoreactor inlet

Komponenta / Component	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
Pros. vrednost [%] / [%] by vol.	14	50	4	3	29

in jih ohranili nespremenjene ves čas izbire modela zgorevanja.

Preizkus smo izvedli z industrijskim gorivom, proizvedenim iz komunalnih odpadkov (GTO-SRF). Sestava plinov na vstopu v termoreaktor je podana v preglednici 1.

Da bi ugotovili relativni vpliv posameznega obratovalnega parametra na doseganje pogojev popolnega zgorevanja, smo za izračune z izbranim modelom zgorevanja kasneje spremenili mnogo robnih pogojev (npr. količino plina in njegovo sestavo, kurilno vrednost, vstopne hitrosti in količine zraka).

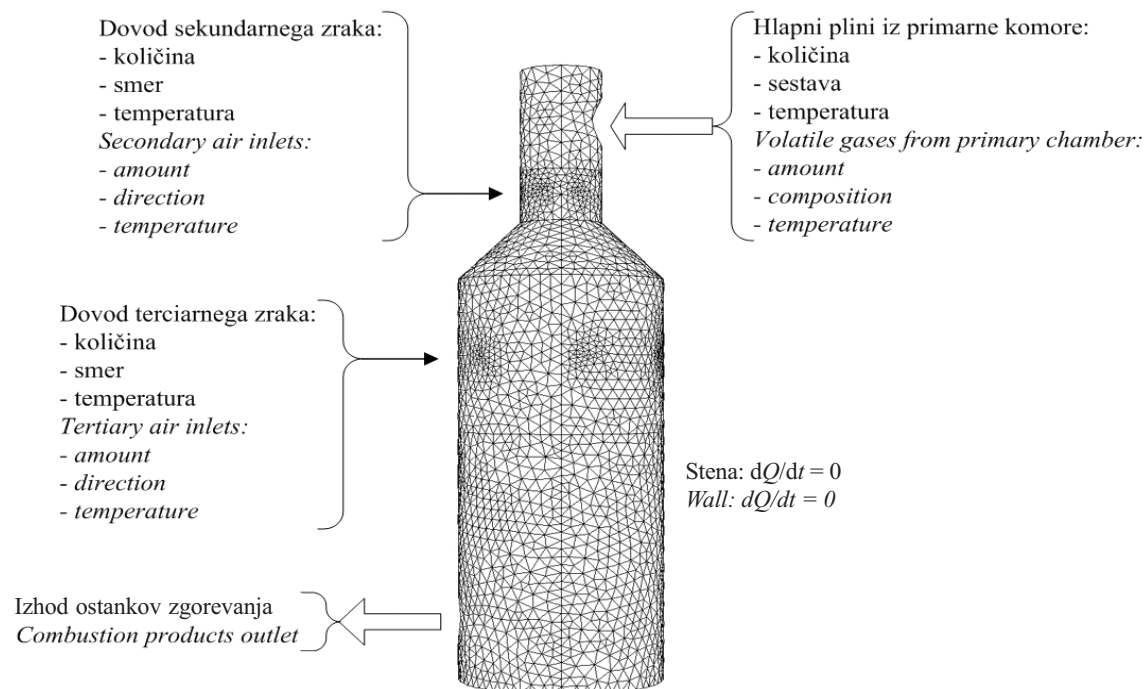
Za izdelavo diskretnega modela in zamrežitve geometrijske oblike termoreaktorja smo uporabili dva programska paketa. Programski paket CFX 4.4, ki vsebuje modela zgorevanja MIB in EBU, omogoča izdelavo le strukturirane zamrežitve. Programski paket CFX 5.7, ki vsebuje preostale modele zgorevanja (EDC, FRC in COMBINED), pa

keeping them unchanged during the combustion model selection.

The experiment was conducted on industrial fuel produced from municipal solid-waste (SRF-solid-recovered fuel). The composition of the gas entering the thermoreactor is shown in Table 1.

In order to find the relative influence of the operating parameters on achieving complete combustion conditions (i.e., amount and composition of the gas, calorific value, air inlet velocities and quantities) changed for the calculations to be done later by the selected combustion model.

The geometry modelling and its meshing were performed using two program packages. The CFX 4.4 program package, involving the MIB and EBU combustion models, enables structured meshing only. The CFX 5.7 program package, which includes other combustion models (EDC, FRC and COMBINED), also enables unstructured meshing of



Sl. 2. Robni pogoji in zamrežitev termoreaktorja  
 Fig. 2. Thermoreactor boundary conditions and meshing

omogoča tudi nestrukturirano zamreževanje geometrijske oblike. Test gostote strukturirane mreže je pokazal, da mreže, ki so bolj grobe od 275.674 končnih prostornin, izračunajo rezultate, ki niso dovolj natančni v primerjavi z izmerjenimi vrednostmi (temperatura in sestava dimnih plinov). Bolj gosta zamrežitev pa omogoča praktično enako natančen rezultat kakor z 275.674 končnimi prostorninami, pri čemer se je za izračun porabilo veliko več računskega časa. To število končnih prostornin je omogočilo dobro natančnost in veliko hitrost izračuna in je bilo osnova za nadaljnje delo. Enak test gostote zamrežitve geometrijske oblike je bil ponovljen za nestrukturirano zamrežitev in zamrežitev s 123.273 končnimi prostorninami (sl. 2) je bila izbrana za nadaljnje delo. Za izbiro primernega modela zgorevanja smo uporabili oba programska paketa CFX.

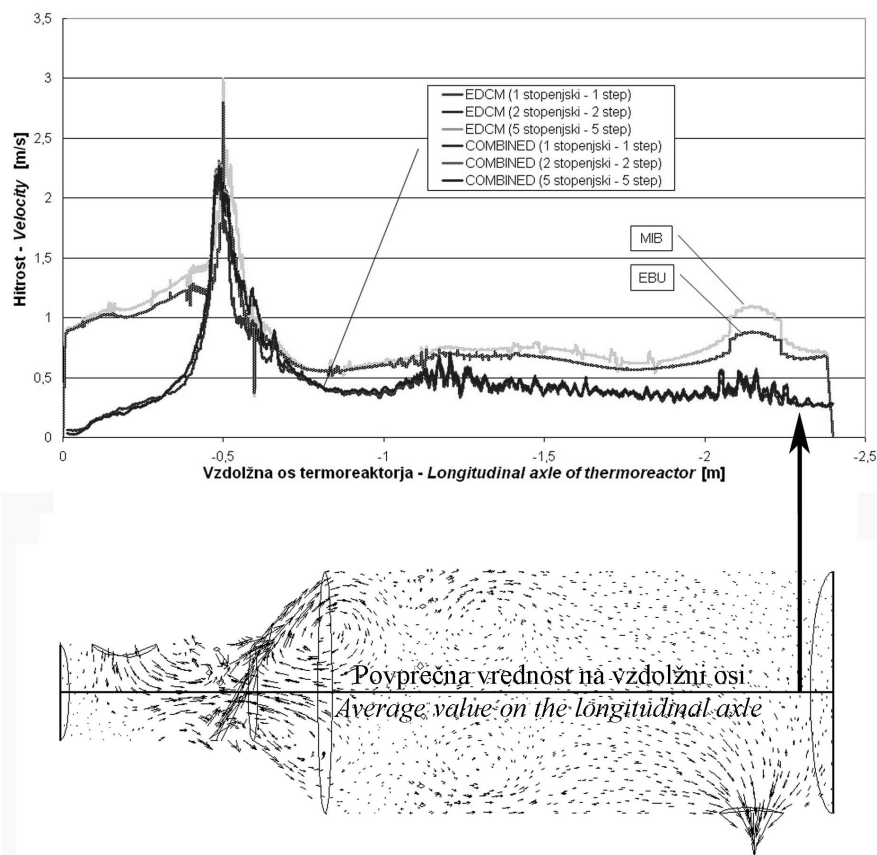
the geometry. The mesh dependency testing of the structured geometry meshing showed that meshes coarser than 275,674 finite volumes did not produce results that were accurate enough, compared with the measured ones (i.e., temperature and flue-gas composition). Denser meshes produced results practically the same compared to the 275,674 finite volumes but took up much more computational time. This number of structured finite volumes offered good accuracy and high computational speed, and it was the basis for further work. The same mesh-dependency testing was repeated for unstructured mesh, and the meshing with 123,273 finite volumes (Figure 2) was chosen for further work. Both CFX program packages have been used to select the appropriate combustion model.

### 5 IZBIRA MODELA ZGOREVANJA

### 5 COMBUSTION MODEL SELECTION

Opravili smo kakovostno analizo in primerjavo rezultatov, dobljenih z različnimi modeli zgorevanja. Model FRC je bil preizkušen v kombinaciji

Qualitative analyses and a results comparison obtained using different combustion models were performed. The FRC model was tested in combination



Sl. 3. Primerjava rezultatov povprečnih hitrosti  
Fig. 3. Average velocity results comparison

z modelom EDC (model COMBINED). Zgorevalna modela EBU in MIB sta bila preizkušena z uporabo programskega paketa CFX 4.4. Zaradi velikega števila izračunanih rezultatov, ki so posledica izbranih mrež, smo se pri analizi omejili na vzdolžno sredinsko ravnino termoreaktorja. Vse izračunane vrednosti reaktivnega tokovnega polja v tej ravnini smo povprečili na določeni višini termoreaktorja, da bi lahko nato primerjali vse rezultate ne glede na gostoto in obliko zamrežitve (strukturirana, nestrukturirana) v enem grafu.

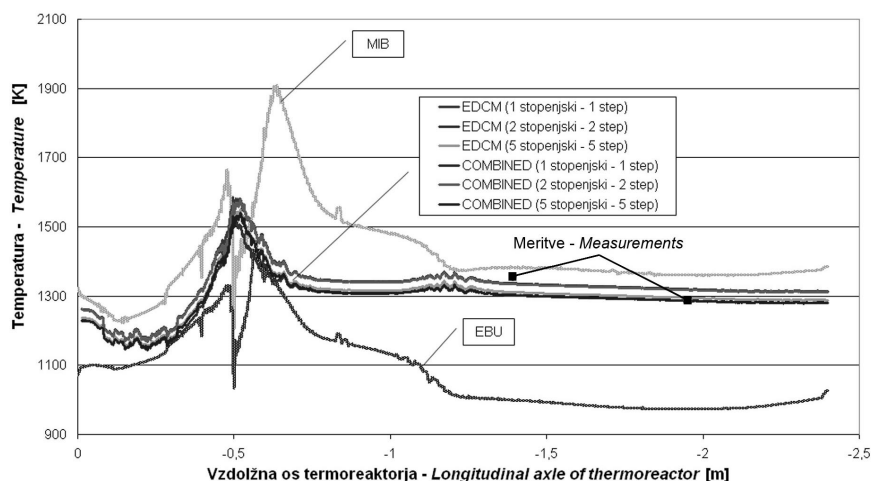
Slika 3 prikazuje primerjavo povprečnih hitrosti vzdolž termoreaktorja, kjer so razvidne očitne razlike med rezultati različnih modelov zgorevanja. Razlik med rezultati modelov EDC in COMBINED praktično ni. Prav tako ni razlik rezultatov pri uporabi enostopenjskih in večstopenjskih modelov. Na sliki 3 je dobro viden vpliv dovoda sekundarnega in terciarnega zraka.

Na sliki 4 je podana primerjava temperatur, izračunanih z različnimi modeli zgorevanja. Z modeloma zgorevanja EDC in COMBINED smo izračunali temperature, katerih vrednosti so v območju med vrednostmi, dobljenimi z modeloma zgorevanja MIB in EBU. Modela EDC in COMBINED izračunata povprečne temperature v termoreaktorju okrog 1300 K. To se ujema s povprečno obratovalno temperaturo v termoreaktorju ob pogojih obratovanja, ki so enaki robnim pogojem pri numeričnem izračunu in po naših meritvah znašajo okrog 1273 K (sl. 5). Ugotovili smo, da različno število stopenj kemijskih reakcij posameznega modela izračuna praktično enake temperature, kar pomeni,

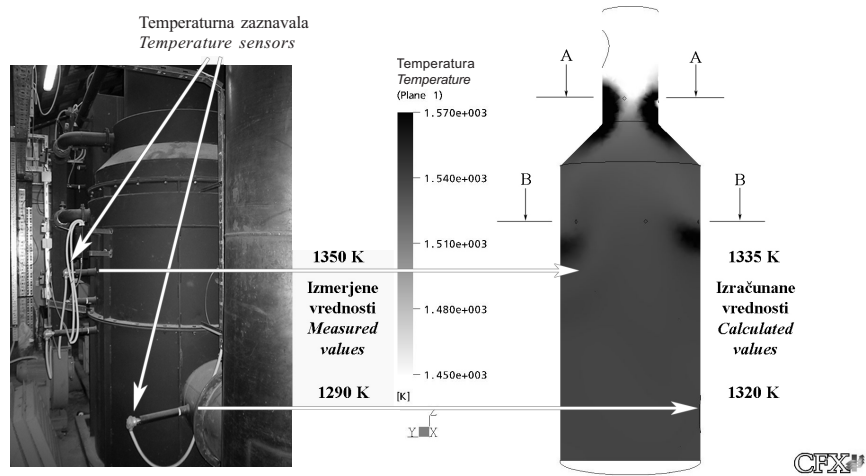
with the EDC model (COMBINED model). The EBU and MIB combustion models were compared applying the CFX 4.4 program package. The analyses were reduced to the longitudinal middle plane of the thermoreactor because of the large number of results produced by the selected meshes. All the computed results of the reacting flow field at this plane were averaged on the single height of the thermoreactor, in order to compare all the results in one graph, regardless of mesh thickness and type (structured, unstructured).

Figure 3 presents a comparison of the average velocities alongside the thermoreactor, showing great differences in the results obtained by different combustion models. However, there are almost no differences between the EDC model and the COMBINED combustion model. There are also no differences between the various single or multi-step reaction models. The secondary and tertiary air inlets and their influences are clearly seen in Figure 3.

Figure 4 shows the temperature values, computed using various combustion models. The temperature results obtained by the EDC and COMBINED combustion models are in a range between the values of the MIB and EBU combustion models. The average temperature values computed by the EDC and the COMBINED combustion models in the thermoreactor are around 1300 K. This is consistent with the measured average values of temperature in the thermoreactor (Figure 5) under operating conditions equivalent to the prescribed boundary conditions applied in the numerical calculations. It was found that single and multi-step chemical reaction models produced practically the same temperature



Sl. 4. Primerjava rezultatov povprečnih temperatur  
Fig. 4. Average temperature results comparison



Sl. 5. Temperaturna tipala na pilotni sežigalnici in rezultati simulacije

Fig. 5. The positions of temperature sensors in the thermoreactor, and the comparison of temperature values

da dodajanje reakcijskih stopenj ne vpliva bistveno na kakovost rezultatov temperaturnega in tokovnega polja. To pomeni, da je za izračun temperaturnega polja popolnoma zadovoljivo uporabiti enostopenjski model, s čimer prihranimo nekaj računskega časa.

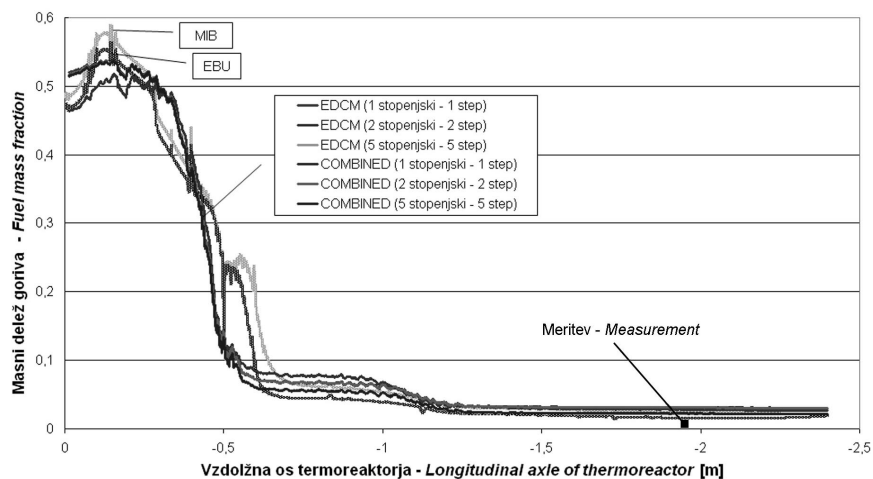
Slika 6 prikazuje vrednosti masnega deleža goriva vzdolž termoreaktorja. Vidimo lahko, da so si rezultati vseh modelov precej podobni. Menimo, da je to posledica majhnih koncentracij produktov nepopolnega zgorevanja, ki tako samo neznatno vplivajo na izračunani masni delež goriva v postopku zgorevanja.

Glavna prednost večstopenjskih modelov se izkaže v primeru izračuna nekaterih produktov nepopolnega zgorevanja, kar je prikazano na sliki 7,

results, meaning that the additional reaction steps do not significantly influence the qualities of the temperature and flow-field results. It means that for the temperature-field calculation, it is sufficient to use single-step models, thus also saving computational time.

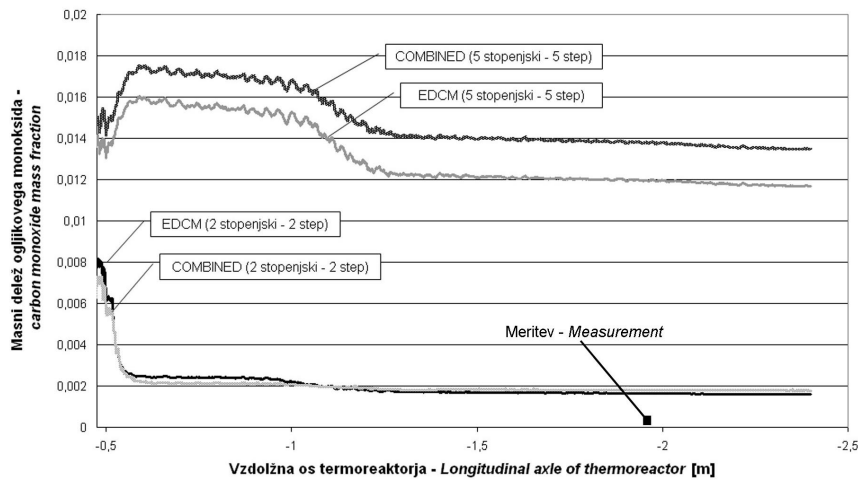
Figure 6 shows the values for the fuel mass fraction along the thermoreactor. It can be seen that the results are quite similar for all the models. It seems to be the consequence of low concentrations of incomplete combustion products insignificantly influencing the computed fuel mass-flow fraction during the combustion process.

The computation ability of the incomplete combustion products' concentrations presents the key advantage of multi-step models, which can be



Sl. 6. Primerjava rezultatov povprečnega masnega deleža goriva

Fig. 6. Average fuel mass-fraction results comparison



Sl. 7. Primerjava rezultatov masnega deleža ogljikovega monoksida  
 Fig. 7. Carbon monoxide mass fraction results comparison

kjer so predstavljene izračunane koncentracije ogljikovega monoksida.

Rezultati kažejo razliko med dvo- in petstopenjskima modeloma, ne kažejo pa razlike med obema modeloma zgorevanja. Petstopenjski model naj bi izračunal vrednosti bližje izmerjenim povprečnim vrednostim (slika 7) vendar so le-te razmeroma večje od rezultatov, dobljenih z dvostopenjskim modelom. Razlika je verjetno posledica nepravilnega kemijskega mehanizma večstopenjskih modelov glede na specifično sestavo plina na vhodu v termoreaktor z velikim deležem ogljikovega monoksida.

Modele zgorevanja smo ocenili na podlagi primerjave izračunanih in izmerjenih vrednosti temperature in sestave glavnih komponent plina v termoreaktorju. Meritve temperature je bilo mogoče izvesti le v dveh točkah zaradi omejenih možnosti merilnih mest (sl. 5), medtem ko smo sestavo plina merili samo na izhodu iz termoreaktorja. Dodaten kriterij za izbiro modela zgorevanja je bila numerična stabilnost modelov zgorevanja oziroma hitrost konvergence. V teh razmerah se je model EDC izkazal kot najprimernejši za izbrano uporabo. Večstopenjski modeli, vključeni v nekatere modele, omogočajo izračun produktov nepopolnega zgorevanja, na primer ogljikovega monoksida. Zaradi majhnih koncentracij ogljikovega monoksida pa nima pomembnega vpliva na makroparametre zgorevanja. V nadaljnji numerični analizi smo obravnavali in analizirali samo pogoje popolnega zgorevanja (temperatura, turbulenca, čas – 3T parametri) pri različnih obratovalnih pogojih pilotne sežigalnice.

clearly seen in Figure 7 where the calculated carbon monoxide concentrations are presented.

The results demonstrate differences between the two- and five-step models but there is almost no difference between both combustion models. The five-step models should produce results closer to the measured average value (Figure 7), but they are relatively higher than those results obtained by two-step models. The difference seems to be due to the improper kinetic mechanism of the higher-step models regarding the specific gas composition at the thermoreactor inlet, with a high carbon-monoxide fraction.

The combustion models were assessed based on a comparison of the computed and measured values of the temperatures, and the main gas composition in the thermoreactor. However, measurement of the temperature was possible at two points only, because of the limited possibilities regarding measurement locations (Figure 5), while the gas composition was tested at the outlet of the thermoreactor only. An additional criterion regarding the selection of the combustion model was the numerical stability of the combustion models when mainly considering the convergence speed. In these criteria, the EDC model was found to be the most useful for the presented application. The multi-step models included in some models enabled the computation of incomplete combustion products' concentrations, such as carbon monoxide. However, due to its low concentration, it does not significantly influence the combustion macro parameters. In further numerical simulations, just the complete combustion conditions (temperature, turbulence, time – 3T parameters), were considered, and analyzed under different operating conditions for the pilot-scale incinerator.



## 6 ANALIZA OBRATOVALNIH POGOJEV SEŽIGALNICE

Pri dejanskih pogojih obratovanja sežigalnice se količina, sestava in vzročno kurilna vrednost plinov na vstopu v termoreaktor spreminjajo, kar je posledica spremenljive strukture odpadkov v primarni komori. Različno količino plinov smo, če upoštevamo kontinuitetno enačbo, simulirali s spreminjanjem vstopne hitrosti plinov. Kurilno vrednost plinov smo simulirali s spreminjanjem sestave mešanice metana in dušika. Preverili smo tudi, kako količina, mesto in smer dovajanja sekundarnega in terciarnega zraka vplivajo na dosego 3T parametrov. Vsi nadaljnji izračuni so bili opravljeni z izbranim modelom EDC.

## 6.1 Spreminjanje kurilne vrednosti plina iz primarne komore

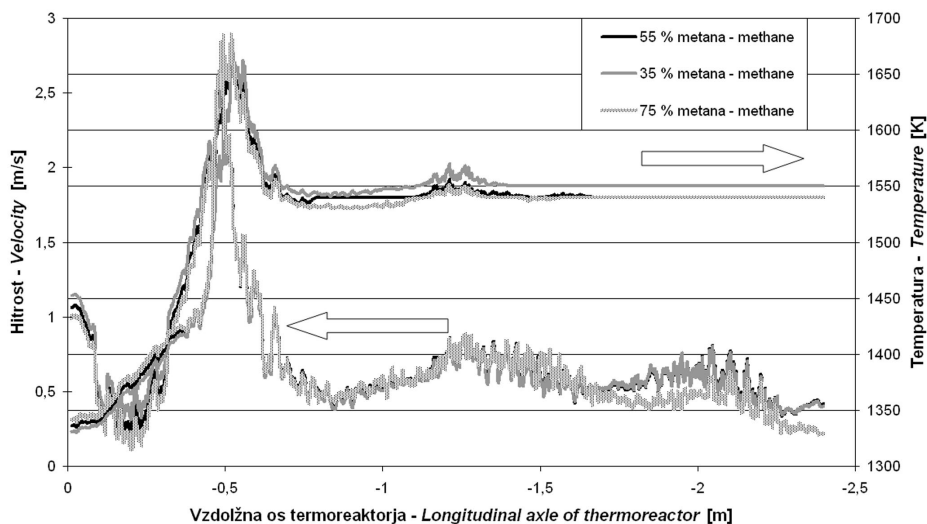
Splošno gledano kurilna vrednost hlapnih plinov močno vpliva na temperaturo v sekundarni komori. Spremembo kurilne vrednosti plinov iz primarne komore smo simulirali z različno količino metana (35%, 55% in 75%), medtem ko so vrednosti preostalih robnih pogojev ostale nespremenjene. Opazili smo samo manj pomembne spremembe. To pomeni, da sprememba kurilne vrednosti ne vpliva pomembno na tokovno polje, če ostane količina zraka stalna. To je razlog, da povečan delež metana ni povzročil

## 6 ANALYSIS OF THE INCINERATOR'S OPERATING CONDITIONS

Under real operating conditions of the incinerator the amount, composition and, consequently, heating value of the gas entering the thermoreactor always varies because of the waste structure differences in the primary chamber. The gas amount differences were simulated by changing the intake gas velocity, by considering the equation of continuity. The heating value of the gas with a different composition was simulated with the corresponding methane/nitrogen mixture. Additionally, the secondary and tertiary air amounts, their intake positions and the directions into thermoreactor were examined in terms of how they influenced the achievement of the 3T parameters. All further calculations were performed by the selected EDC model.

## 6.1 Variation in the Primary-Chamber Gas Heating Value

In general, the volatile gases' heating value strongly influences the temperature in the secondary chamber. The primary-chamber gas heating value variation was simulated with various amount of methane (35%, 55% and 75%), while other boundary-condition values remained unchanged. The velocity field structure for all three tested cases (Figure 8) is almost the same. Only differences of minor importance were noticed. In turn, this means that the heating value variation does not essentially influence the flow field, if the amount of combustion air stays constant. For this rea-



Sl. 8. Vpliv spreminjanja kurilne vrednosti na tokovno in temperaturno polje  
Fig. 8. Influence of calorific value on the velocity and temperature



pričakovanege zvišanja temperature v termoreaktorju. Da bi se izognili temu problemu v praksi, je treba izvesti krmiljenje zraka za zgorevanje glede na kurilno vrednost kot podporo običajnem krmiljenju sežigalnic, ki temelji na količini kisika v dimnih plinih, da se zagotovi stalno razmerje zrak/gorivo.

Količino nastalega ogljikovega dioksida za posamezen primer zmesi prikazuje slika 9. Imamo praktično enake vrednosti koncentracije ogljikovega dioksida, dobljene z zgorevanjem hlapnih plinov z različno kurilno vrednostjo. To se ujema z ugotovitvami na temelju rezultatov hitrosti in temperature. V takšnih primerih se zveča koncentracija nezgorelega metana na izstopu iz termoreaktorja (sl. 9). Slednje kaže na nepopolno zgorevanje v termoreaktorju zaradi primanjkljaja zraka za zgorevanje.

## 6.2 Spreminjanje količine plinov iz primarne komore

Spremenljiva količina plinov iz primarne komore ima poleg drugega vpliv tudi na čas zadrževanja plinov v zgovalnem prostoru. Razmere smo simulirali s spremenljivo hitrostjo dotoka plinov v termoreaktor, kar ima neposredni vpliv na stopnjo masnega pretoka prek kontinuitetne enačbe: 0,25 m/s (30 m<sup>3</sup>/h), 0,38 m/s (45 m<sup>3</sup>/h) in 0,5 m/s (60 m<sup>3</sup>/h).

S povečanim dovodom plinov pri stalnem masnem deležu metana (55%) iz primarne komore vstopi v termoreaktor tudi večja količina metana.

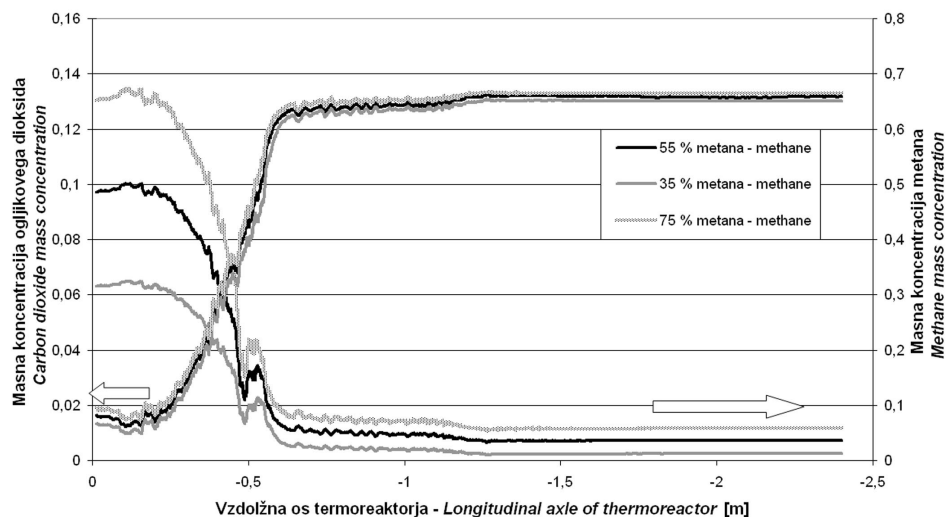
son, a higher methane fraction does not produce the expected temperature rise in the thermoreactor. In order to avoid this problem in practice the combustion air control regarding the gas heating value must be performed to ensure a constant air/fuel ratio as a support to the conventional control of the incinerator based on the oxygen concentration in the flue gases.

The amount of carbon dioxide produced for particular mixtures is shown in Figure 9. There are practically the same values of carbon dioxide concentration produced by the combustion of volatile gases with different calorific values. This is consistent with conclusions made from the velocity and temperature computation results. In such a case the concentrations of unburned methane rise at the thermoreactor exit (Fig. 9). This indicates that undesired, incomplete combustion is present in the thermoreactor because of a shortage of combustion air.

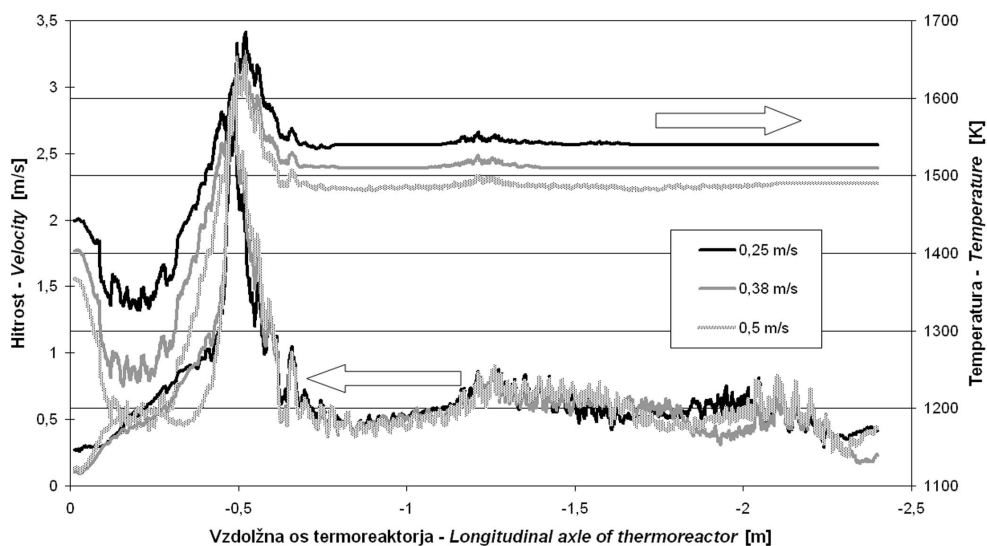
## 6.2 Primary-Chamber Gas Amount Variation

The gas quantity, in addition to other factors, strongly influences the residence time of the gases in the combustion chamber. The conditions were simulated by changing the intake-gas velocity into the thermoreactor influencing directly on the gas mass-flow rate via the equation of continuity: 0.25 m/s (30 m<sup>3</sup>/h), 0.38 m/s (45 m<sup>3</sup>/h) and 0.5 m/s (60 m<sup>3</sup>/h).

More methane enters into the thermoreactor by increasing the gas amount to a constant methane mass fraction (55%) from the primary chamber. It does



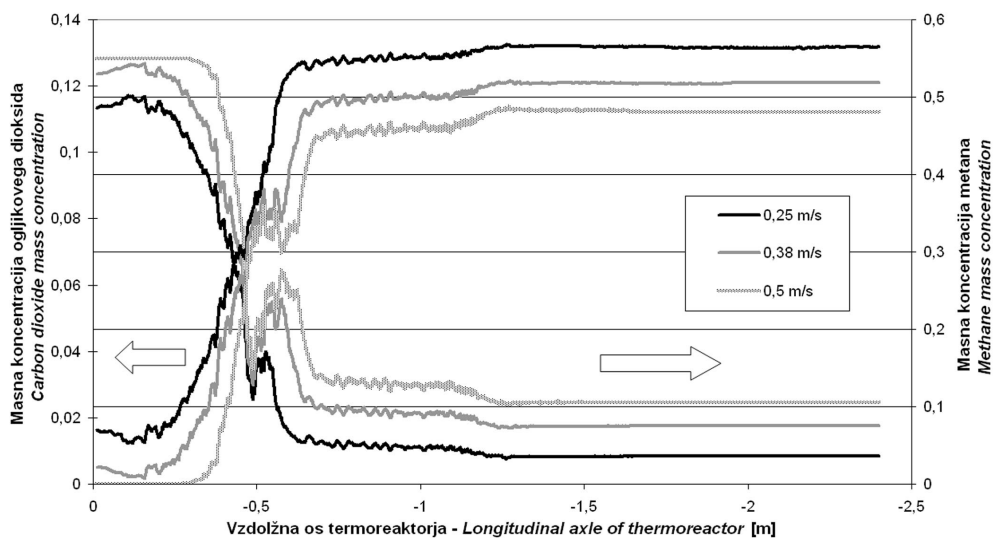
Sl. 9. Vpliv spreminjanja kurilne vrednosti na porabo metana in nastanek CO<sub>2</sub>  
Fig. 9. Calorific-value influencing methane consumption and CO<sub>2</sub> formation



Sl. 10. Vpliv količine plinov iz primarne komore na temperaturo in hitrostno polje  
 Fig. 10. Primary-chamber gas amounts influencing temperature and flow field

To pa ne povzroči povečanja največje ali povprečne temperature, temveč jo celo zniža (sl. 10). Povečanje količine hlapnih plinov je povečalo nekatere lokalne hitrosti v termoreaktorju, medtem ko so se povprečne hitrosti vzdolž termoreaktorja le malo spremenile, kar lahko vidimo na sliki 10. To je posledica zmanjšanja zadrževalnega časa zaradi povečane količine plinov in zato nepopolnega zgorevanja v termoreaktorju. Tako se zvečuje delež metana v dimnih plinih in manjša količina ogljikovega dioksida, kakor je prikazano na sliki 11. V praksi moramo s tega zornega kota za

not produce any rise in maximum temperature, or in the average temperature, and even lowers it (Figure 10). The increase of volatile gas amount increased some local velocities in the thermoreactor, while the average velocities along the thermoreactor were only slightly changed, as can be seen from Figure 10. This is a result of a shorter residence time caused by the amount of gas increase and, consequently, incomplete combustion in the thermoreactor. In turn, this increases the amount of methane in the flue gases and the amount of carbon dioxide falls, as demonstrated in Figure 11. This explains the practical experience of maintaining a con-



Sl. 11. Vpliv količine plinov iz primarne komore na porabo metana in nastanek CO<sub>2</sub>  
 Fig. 11. Primary chamber gas amount influencing fuel consumption and CO<sub>2</sub> production

doseganje pogojev popolnega zgorevanja ohranjati stalno količino hlapnih plinov iz primarne komore. Sicer je treba meriti količino plinov na vstopu v termoreaktor in jih povezati s krmiljenjem zraka za zgorevanje.

### 6.3 Sprememba smeri in hitrosti dovajanja zraka

Z načinom dovoda in razmerjem sekundarnega in terciarnega zraka lahko pomembno vplivamo na kakovost zgorevanja. S spremembo lege dovodov zraka glede na projektirano stanje smo spreminjali smer in hitrost dovoda zraka. Slika 12 prikazuje mesto dovodov sekundarnega in terciarnega zraka s tlorisa termoreaktorja (prerez A-A in prerez B-B glede na sliko 5). Namen analize je bil ugotoviti učinkovitost projektne rešitve pilotne sežigalnice. Spremenjene hitrosti in smeri dovoda sekundarnega in terciarnega zraka so podane v preglednici 2.

Analizirali smo vpliv spremenjenih smeri in hitrosti dovajanja sekundarnega in terciarnega zraka na temperaturo in kakovost zgorevanja. S slike 13 je razvidno, da se dosežejo najvišje temperature vzdolž celotnega termoreaktorja s projektiranimi vrednostmi dovoda zraka, kar potrjuje projektno rešitev.

Enake ugotovitve lahko vidimo tudi na sliki 14, ki prikazuje vrednost koncentracij ogljikovega dioksida. Skoraj enake rezultate, kakor so projektirani, smo dobili s spremembo razmerja med sekundarnim in terciarnim zrakom, pri čemer je ostala skupna količina zraka stalna.

Po predstavljenih analizah obratovalnih pogojev pilotne sežigalnice lahko ugotovimo, da ima na popolnost zgorevanja največji vpliv predvsem primerna smer dovajanja sekundarnega in terciarnega zraka v termoreaktor, medtem ko njuno razmerje ni tako pomembno. Vendar pa lahko razmerje med sekundarnim in terciarnim zrakom vpliva na

stant volatile gas amount from the primary chamber to establish complete combustion conditions from this point of view. Otherwise, the measurement of gas quantity at the thermoreactor intake should be performed and linked with the combustion air control.

### 6.3 Air Inlet Directions and Velocity Variation

The intake path and ratio of secondary and tertiary air can significantly influence the combustion quality. The air direction and velocity values were altered by changing the air-inlet position with respect to the projected state. Figure 12 represents the positions of the secondary and tertiary air intakes from the top side of the thermoreactor (cut A-A and cut B-B in Figure 5). The aim of this analysis was to find the efficiency of the pilot-scale incinerator air-intake projecting solution. The variation of velocity and direction of the secondary and tertiary air is listed in Table 2.

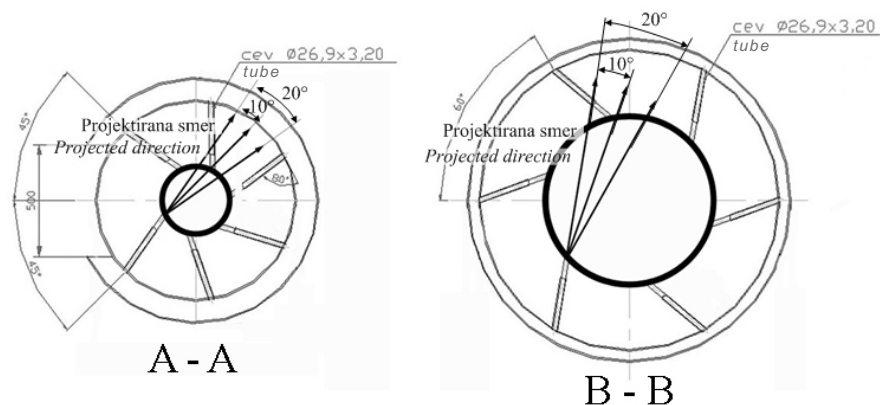
The influence of various directions and velocities of secondary and tertiary air inlets on the temperature and combustion quality was analyzed. Figure 13 shows that the highest temperatures along the whole thermoreactor were produced with the projected values of air intakes confirming the projected solution as correct.

The same findings can be seen in Figure 14, showing carbon dioxide concentration values. Similar results to the projected solution were obtained by varying the ratio of secondary and tertiary air, keeping the total amount of air constant.

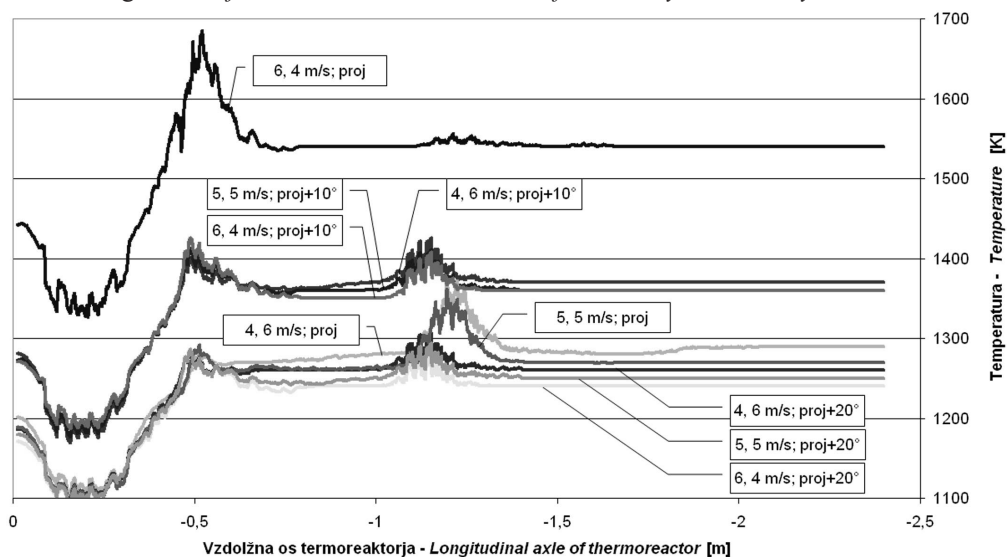
Based on the presented analysis of the pilot-scale incinerator's operating conditions, it can be concluded that the most significant influence on the complete combustion conditions is the appropriate direction of the secondary and tertiary air into the thermoreactor, while their ratio is not as important. However, the secondary/tertiary air ratio can

Preglednica 2. Projektirane in spremenjene hitrosti in smeri zraka  
Table 2. Projected and changed air-inlet velocities and directions

Veličina Quantity	Dovod sekundarnega zraka Secondary air inlets	Dovod terciarnega zraka Tertiary air inlets
hitrost velocity	projektirana = 6 m/s projected = 6 m/s	projektirana = 4 m/s projected = 4 m/s
	4 m/s	6 m/s
	5 m/s	5 m/s
smer direction	projektirana (proj) projected (proj)	projektirana (proj) projected (proj)
	proj + 10°	proj + 10°
	proj + 20°	proj + 20°



Sl. 12. Projektirane in spremenjene smeri dovoda sekundarnega in terciarnega zraka  
 Fig. 12. Projected and altered directions of secondary and tertiary air inlets



Sl. 13. Vpliv smeri in hitrosti dovajanja zraka na povprečno temperaturo  
 Fig. 13. Air-intake direction and velocity influence on average temperature

pogoje nastanka določenih onesnaževal, kakor so na primer dušikovi oksidi, kar pa nismo raziskovali v okviru našega dela.

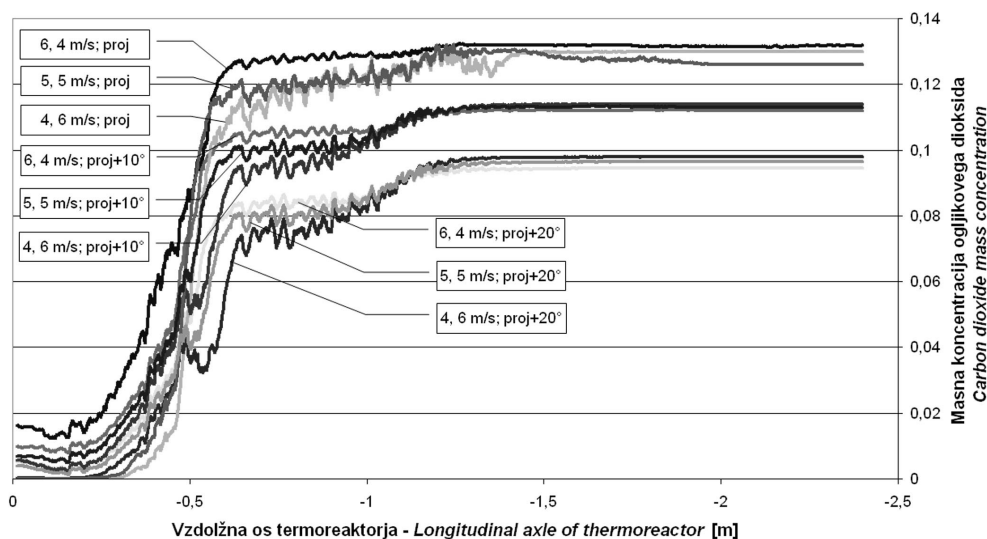
influence the conditions of some specific pollutant formations such as nitric oxides, but this was not investigated during the presented work.

### 7 SKLEP

### 7 CONCLUSION

Na podlagi dejanskih pogojev obratovanja pilotne dvokomorne pilotne sežigalnice smo preverili in analizirali uporabnost različnih modelov zgorevanja. Primerjava rezultatov je pokazala, da je model EDC izredno zanesljiv in dokaj natančen pri modeliranju specifičnega zgorevanja v termoreaktorju pilotne sežigalnice. Večstopenjski modeli so v takšnih primerih uporabni le za izračun koncentracij produktov nepopolnega zgorevanja, denimo ogljikovega monoksida ali drugih. Omogočajo pa tudi iskanje področij nepopolnega zgorevanja v

The applicability of various combustion models was examined and analyzed, based on the real operating conditions of a two-stage pilot-scale incinerator. The comparison of results demonstrates that the EDC model is very reliable and quite accurate for modelling the specific combustion processes present in the thermoreactor of the pilot-scale incinerator. Multi-step combustion models are applicable in such cases for the computation of incomplete combustion products' concentrations, such as carbon monoxide, etc. They offer the possibility of locating the regions



Sl. 14. Vpliv smeri in hitrosti dovajanja zraka na povprečen nastanek  $CO_2$   
 Fig. 14. Air-intake direction and velocity influence on average  $CO_2$  formation

zgorovalnem prostoru. Vendar pa morajo kinetični mehanizmi večstopenjskih modelov zgorevanja natančno odsevati lastnosti in sestavo goriva, saj sicer lahko povzročijo slabši izračun rezultatov kakor enostopenjski modeli.

V okviru predstavljene raziskave smo ugotovili, da je enostopenjski model EDC najbolj uporaben, še posebej za hitro numerično analizo pogojev obratovanja industrijske zgorovalne naprave, kakor je sežigalnica. Numerična analiza pogojev popolnega zgorevanja ima velik pomen v fazi načrtovanja oblike nove sežigalnice, kakor tudi za nadzor obratovanja že zgrajenih naprav. V našem primeru smo z numerično raziskavo ugotovili, da na pogoje popolnega zgorevanja v največji meri vpliva smer dovoda sekundarnega in terciarnega zraka. Smer dovoda sekundarnega in terciarnega zraka ima neposredni vpliv na jakost mešanja v reaktivni coni plamena.

Povečanje nastale količine plinov v primarni komori, kakor tudi njihove kurilne vrednosti skupaj z nespremenjenim dovodom količine zraka, vodi v nepopolno zgorevanje in nastanek večje količine produktov nepopolnega zgorevanja. V izogib temu, v praksi pogostemu problemu, bi morale sežigalnice imeti poleg običajnega kisikovega krmiljenja še krmiljenje količine zraka za zgorevanje, ki bi temeljila na količini in kurilni vrednosti plinov.

of incomplete combustion in the combustion chamber. However, the kinetic mechanisms of multi-step combustion models should strongly reflect the fuel properties and composition, otherwise they can produce worse results than single-step models.

During the presented investigation it was found that a single-step EDC model seems to be the most useful, especially for a quick numerical analysis of the operating conditions of industrial burning devices, such as incinerators. A numerical analysis of the complete combustion conditions is of great importance for the planning stage of a new incinerator's design, as well as for the operating control of existing devices. In the presented case, using a numerical investigation, it was found that the directions of the secondary and tertiary air inlets present the most important influence on the complete combustion conditions. Secondary and tertiary air-inlet directions have a direct impact on the intensity of the reactant mixing in the flame reaction zone.

The greater amount of gases generated in the primary chamber, as well as their higher calorific value, together with the same amount of air led to incomplete combustion producing a greater amount of incomplete combustion products. To avoid this, which in practise is very often a problem, incinerators should be, besides the standard oxygen control, additionally equipped with combustion-air amount control, depending on the gas amount and its calorific value.



8 LITERATURA

8 LITERATURE

- [1] Brunner Calvin R. (1991) Handbook of incineration systems. *McGraw – Hill, Inc.*, New York.
- [2] Baulch, D.L., D.D. Drzsdale, O.G.Horne, A.C. Lloyd (1992) Evaluated kinetic data for high temperature reactions, Vol. 1, London.
- [3] Brown, N.J. (1991) Rate coefficient calculations for combustion modelling, Numerical approaches to combustion modelling. pp. 37-56, *AIAA Washington*.
- [4] CFX 4.4 and 5.7., Users manual (2000, 2004) *AEA Technology*.
- [5] Changkook R., S. Donghoon, C. Sangmin (2001) Simulation of bed combustion and gas flow in a grate type waste incinerator. *The 3<sup>rd</sup> International Symposium on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, Institution of Chemical Engineers*, 2-4 July, 2001, Brussels.
- [6] Chen K. S., C. H. Tong (1997) Modelling of turbulent burning flow and performance evaluation of municipal solid incinerator. *Journal of Environmental Engineering*, November 1997, pp. 1150-1157;
- [7] Ficarella A., D. Laforgia (2000) Numerical simulation of flow field and dioxins chemistry for incineration plants and experimental investigation, *Waste Management* 20 (2000), pp. 27-49;
- [8] Heist D. K., M. Ravichanran, F.C. Gouldin (1994) Experiment and numerical study of an incinerator- and furnace-related flow, *Combustion and Flame*, 99, pp. 339-346, *Elsevier Science Inc.*
- [9] Jones W.P., J. H. Whitelaw (1982) Calculation methods for reacting turbulent flows: A Review, *Combustion and Flame* 48: 1-26 (1982).
- [10] Kori Y., R. Takeya (2001) Cross jet mixing design and its effect on combustion performance in MSW incinerators with natural gas reburning, *The 3<sup>rd</sup> International Symposium on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, Institution of Chemical Engineers*, 2-4 July, 2001, Brussels.
- [11] Kuo, K.K. (1986) Principles of combustion. *John Wiley & Sons*, New York.
- [12] Nasserzadeh V., J. Swithenbank, C. Schofield, D. W. Scott, A. Loader, A. Leonard (1994) Design optimisation of coventry municipal solid waste incinerator. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 120, No. 6, November/December 1994, pp. 1615-1629.
- [13] Niessen Walter R. (1995) Combustion and incineration processes: Applications in environmental engineering, Second Edition, Revised and Expanded. *Marcel Dekker, Inc.*, New York.
- [14] Peters N., (2004) Turbulent combustion. *Cambridge University Press*, Cambridge.
- [15] Škerget L. (1994) Mehanika tekočin. *Univerza v Mariboru, Tehniška fakulteta in Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo*, Ljubljana.
- [16] Soongkee K., S. Donghoon, C. Sangmin (1996) Comparative evaluation of municipal solid waste incinerator designs by flow simulation. *Combustion and Flame* 106: 241-251 (1996).
- [17] Warnatz J., U. Maas, R. W. Dibble (1996) Combustion: physical and chemical fundamentals, modelling and simulation, experiments, pollutant formation. *Springer Verlag*, Berlin Heidelberg.

Naslov avtorjev: mag. Filip Kokalj  
 prof.dr. Niko Samec  
 prof.dr. Leopold Škerget  
 Univerza v Mariboru  
 Fakulteta za strojništvo  
 Smetanova 17  
 2000 Maribor  
 filip.kokalj@uni-mb.si  
 niko.samec@uni-mb.si  
 leo@uni-mb.si

Authors' Address: Mag. Filip Kokalj  
 Prof.Dr. Niko Samec  
 Prof.Dr. Leopold Škerget  
 University of Maribor  
 Faculty of Mechanical Eng.  
 Smetanova 17  
 SI-2000 Maribor, Slovenia  
 filip.kokalj@uni-mb.si  
 niko.samec@uni-mb.si  
 leo@uni-mb.si

Prejeto: 29.7.2004  
 Received:

Sprejeto: 25.5.2005  
 Accepted:

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



## Ugotavljanje in izkoriščanje skritih logističnih zmožnosti podjetja

### Finding and Exploiting the Hidden Logistic Potentials in a Company

Janez Kušar - Tomaž Berlec - Jože Duhovnik - Janez Grum - Marko Starbek

*Podjetja se dandanes soočajo z novimi izzivi. Hkrati imajo opravka z globalizacijo poslovanja in lokalizacijo delovanja, standardizacijo in individualizacijo izdelkov "razvajenim" kupcem in povečano konkurenco.*

*V tem položaju se izkažejo za uspešna le tista podjetja, ki so v stanju čim hitreje se odzvati na spremembe trga oziroma izkazujejo najkrajši reakcijski čas izpolnjevanja zahtev kupcev (cena in kakovost izdelka ter kratek čas in zanesljivost dobave).*

*Dosledna redukcija srednjega stanja, založenosti in pretočnega časa delovnih sistemov podjetja je vedno bolj razširjena strategija, ki zagotavlja zadovoljstvo kupca ter povečanje rasti in dobička podjetja.*

*V prispevku je prikazano, kako je mogoče z orodji za modeliranje pretoka naročil preko delovnih sistemov ugotoviti in izkoristiti skrite logistične zmožnosti delovnih sistemov podjetja.*

*Prikazani so rezultati ugotavljanja in izkoriščanja skritih logističnih zmožnosti delovnih sistemov podjetja ETI d.d. Izlake – enota ORODJARNA.*

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: sistemi delovni, časi pretočni, stanja, učinki, zmožnosti logistične)**

*Companies are nowadays confronted with new challenges: simultaneously they are dealing with the globalization of business and acting on local markets, the standardization and customization of products for fastidious customers and increased competition.*

*In these circumstances the only successful companies are those which can respond quickly to market changes, i.e., they have a short response time for the fulfilment of customer requirements (a short delivery time and reliable delivery in addition to a competitive price and high quality).*

*Consequently, a reduction of the mean inventory, the range and the lead time of the working systems in the company is an ever increasing strategy that ensures the customer's satisfaction and an increase in growth and profit for the company.*

*The article shows how the tools for modelling the flow of orders through working systems can be used to find and exploit the hidden logistic potentials of working systems in a company.*

*Here we present the results of finding and exploiting the hidden logistic potentials of working systems in the tool-production department of the "ETI Ltd." company from Izlake, Slovenia.*

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

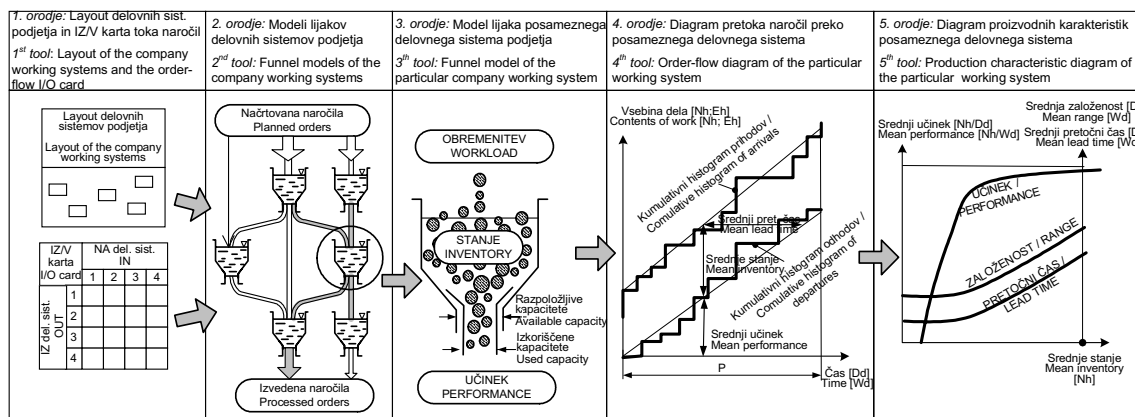
**(Keywords: working systems, lead times, inventory systems, performance, logistic potentials)**

#### 0 UVOD

Da bi lahko ugotovili in izkoristili skrite logistične zmožnosti delovnih sistemov podjetja, kamor štejemo skrite logistične zmožnosti srednjega stanja naročil, srednje založenosti z naročili in srednjega pretočnega časa delovnih sistemov, moramo predhodno zajeti pretok naročil prek delovnih sistemov podjetja v izbranem časovnem obdobju.

#### 0 INTRODUCTION

In order to find and exploit hidden logistic potentials (hidden logistic potentials of mean inventory of orders, mean range and mean lead time of working systems) of working systems in a company, we have to obtain the data on the order-flow through working systems in the selected time interval.



Sl. 1. Orodja za modeliranje pretoka naročil prek delovnih sistemov  
Fig. 1. Tools for modelling the flow of orders through working systems

Analiza rezultatov predhodnih raziskav stanja naročil, učinka, založenosti in pretočnih časov delovnih sistemov ([1] do [5]) je pokazala, da so za zbiranje pretoka naročil prek delovnih sistemov podjetja potrebna orodja, prikazana na sliki 1.

Načrt delovnih sistemov podjetja da informacijo o lokaciji delovnih sistemov v podjetju, izstopno/vstopna (IZ/V) karta pa o jakosti toka naročil med delovnimi sistemi.

Na podlagi znanega načrta delovnih sistemov in IZ/V karte toka naročil med delovnimi sistemi je mogoče načrtati modele lijakov delovnih sistemov in vrisati jakost toka naročil med delovnimi sistemi podjetja.

Na vsakem delovnem sistemu oziroma modelu lijaka je mogoče v opazovanem časovnem obdobju  $P$  zbrati podatke o rokih prihoda oziroma odhoda naročil na/z delovnega sistema in vsebinah dela naročil.

Zbrani podatki o pretoku naročil prek posameznega delovnega sistema omogočajo konstruiranje diagrama pretoka naročil, ki pokaže, kakšni so, v dejanski točki obratovanja delovnega sistema, dejansko srednje stanje naročil, dejanski srednji učinek, dejanska srednja založenost in dejanski srednji pretočni čas delovnega sistema. Diagram pretoka opisuje dinamično obnašanje delovnega sistema, kar kažeta kumulativna histograma prihoda in odhoda naročil na delovni sistem in iz njega.

Nazadnje se za vsak delovni sistem podjetja nariše diagram proizvodnih karakteristik, katerega cilj je pokazati, kako sprememba srednjega stanja naročil na delovnem sistemu vpliva na spremembo srednjega učinka, založenosti in pretočnega časa

An analysis of research results regarding the inventory of orders, performance, range and lead time of working systems ([1] to [5]) has shown that the tools presented in Figure 1 should be used to model the flow of orders through the company working systems.

The layout of company working systems provides information on the company working system locations, while the I/O card provides information on the order-flow intensity between the working systems.

On the basis of the known layout of the working systems and the order-flow I/O card between working systems it is possible to design funnel models of the working systems and to graphically present the order-flow intensity between the working systems in the company.

In every working system (funnel model) it is possible to obtain dates of order arrivals to a working system (and dates of order departures from a working system) and the data on the contents of the work in each reference period,  $P$ .

The data obtained on the flow of orders through a particular working system make it possible to design a diagram of order flow that shows the actual mean inventory of orders, the actual mean performance, the actual mean range and the actual mean lead time of a working system at a particular operating point of a working system. The flow diagram describes the dynamic response of a working system (shown by the cumulative histograms of arrival at and departure from the working system).

Finally, for each working system in the company a diagram of production characteristics is drawn. The purpose of drawing a diagram is to reveal how a change in the mean inventory of orders in a working system influences the change of the mean performance,

delovnega sistema in kakšne so skrite logistične zmožnosti delovnega sistema.

## 1 PREGLEDOBJAV

Srednje stanje naročil in srednji pretočni časi ter srednja založenost in srednji učinek delovnih sistemov so osnovni podatki (logistične zmožnosti) za ocenjevanje zmožnosti podjetij za pojavljanje na svetovnem trgu. Skrite zmožnosti je treba odkriti, jih analizirati in z ustreznimi ukrepi izkoristiti.

Raziskave na področju ugotavljanja pretočnih časov naročil [1] so pokazale, da pretočnih časov ni mogoče računati, temveč le meriti. Kasnejše raziskave ([2] do [4]) so pokazale, da je s stalnim beleženjem pretoka naročil prek delovnih sistemov mogoče natančno ugotavljati vrednosti pretočnih časov in stanja naročil v izbranem časovnem obdobju, ki se spreminjajo v odvisnosti od spremembe vrste naročil in uporabljenih tehnoloških postopkov. Rezultati raziskav so pokazali, da je pri delovanju delovnih sistemov še veliko neodkritih in neizkoriščenih logističnih zmožnosti. Nyhuis in Wiendahl [5] sta proizvodne karakteristike delovnega sistema opisala z matematičnimi enačbami, ki smo jih tudi mi uporabili pri določanju dejanske in ciljne točke obratovanja delovnih sistemov.

Problem srednjega stanja in srednjega pretočnega časa naročil je močno povezan z optimizacijo toka materiala prek delovnih sistemov [6] še posebno so dejanski pretočni časi pomembni pri razporejanju naročil oziroma opravil na delovne sisteme ([7] do [9]).

## 2 UGOTAVLJANJE SKRITIH LOGISTIČNIH ZMOŽNOSTI DELOVNIH SISTEMOV

Z meritvami pretoka naročil prek poljubnega  $j$ -tega delovnega sistema  $WC_j$  ( $1 \leq j \leq m$ ) v opazovanem časovnem obdobju  $P$  in risanjem diagrama pretoka ugotovimo "dejansko točko obratovanja  $j$ -tega delovnega sistema" ([1] in [5]), ki pove, kakšno je dejansko srednje stanje naročil ter dejanski srednji učinek, srednja založenost in srednji pretočni čas delovnega sistema.

Na  $j$ -tem delovnem sistemu pa lahko pride do:

- podobremenitve delovnega sistema (majhno srednje stanje naročil),
- običajne obremenitve delovnega sistema (srednje veliko srednje stanje naročil) ali
- nadobremenitve delovnega sistema (veliko srednje stanje naročil), kar ponazarjajo diagrami pretoka, prikazani na sliki 2.

range and lead time of a working system and what are the hidden logistic potentials of the working system.

## 1 LITERATURE REVIEW

The mean inventory of orders, the mean lead time, the mean range and the mean performance of working systems are the basic data (logistic potentials) for an assessment of a company's ability to be competitive on the global market. Hidden potentials need to be found, analysed and exploited with appropriate measures.

Research on the lead time of orders [1] has established that lead times can not be calculated - they can only be measured. Further investigations ([2] to [4]) established the possibility of finding the exact values of lead times and the inventory of the orders in a selected time interval by continuous monitoring of order-flow through working systems. The data changes with the order type and the used technology. Research results have shown a lot of hidden and unexploited logistic potentials. Nyhuis and Wiendahl [5] have circumscribed the production characteristics with mathematical equations, which we used for finding the actual and target operating points of working systems.

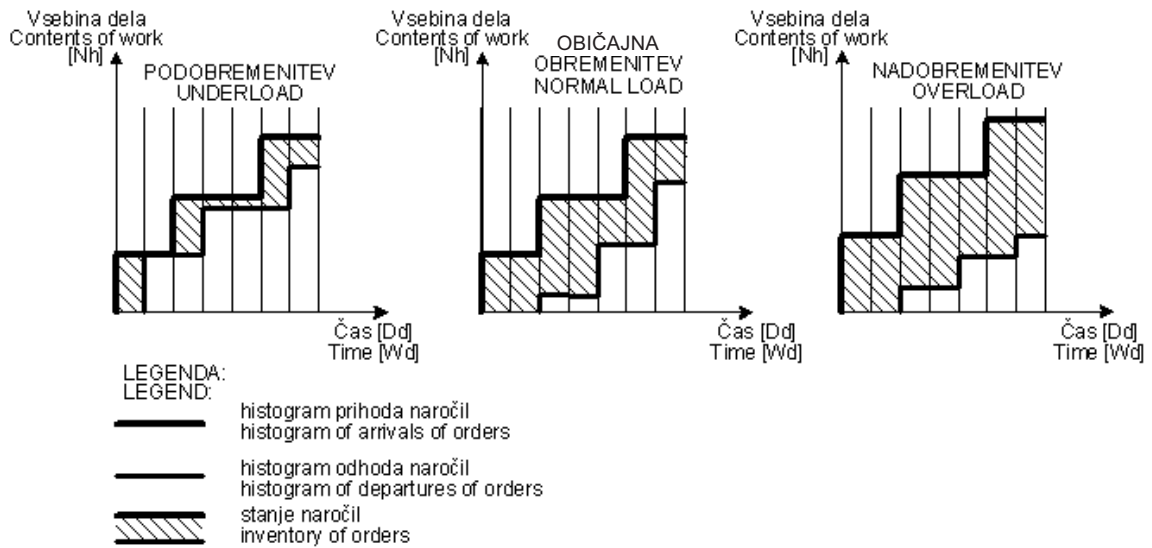
The issue of the mean inventory and the mean lead time of orders is closely linked with material flow optimization [6]. The data of real lead times is important for the feasible scheduling of orders (operations) in working systems ([7] to [9]).

## 2 FINDING THE HIDDEN LOGISTIC POTENTIALS OF WORKING SYSTEMS

By measuring the flow of orders through the  $j$ -th working system  $WC_j$  ( $1 \leq j \leq m$ ) in the interval  $P$  and by drawing a flow diagram, the "actual operating point of the  $j$ -th working system" is found ([1] and [5]); it shows the actual mean inventory of orders, the actual mean performance, the mean range and the mean lead time of a working system.

The following events are possible in the  $j$ -th working system:

- underload of a working system (small mean inventory of orders),
- normal load of a working system (average mean inventory of orders) or
- overload of a working system (high mean inventory of orders), as shown in the flow diagrams in Figure 2.



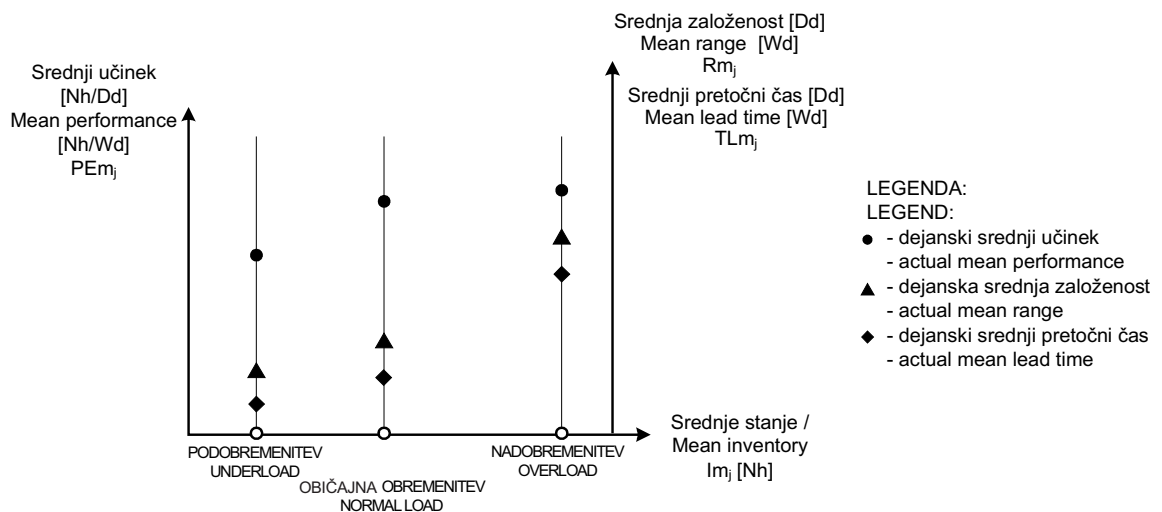
Sl. 2. Diagrami pretoka treh tipičnih stanj naročil  
 Fig. 2. Flow diagrams of three typical inventories of orders

Diagrami pretoka treh tipičnih stanj naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu omogočajo določitev treh mogočih dejanskih točk obratovanja  $j$ -tega delovnega sistema oziroma dejanskim točkam obratovanja pripadajočih vrednosti srednjega učinka, srednje založenosti in srednjega pretočnega časa delovnega sistema, kar prikazuje slika 3.

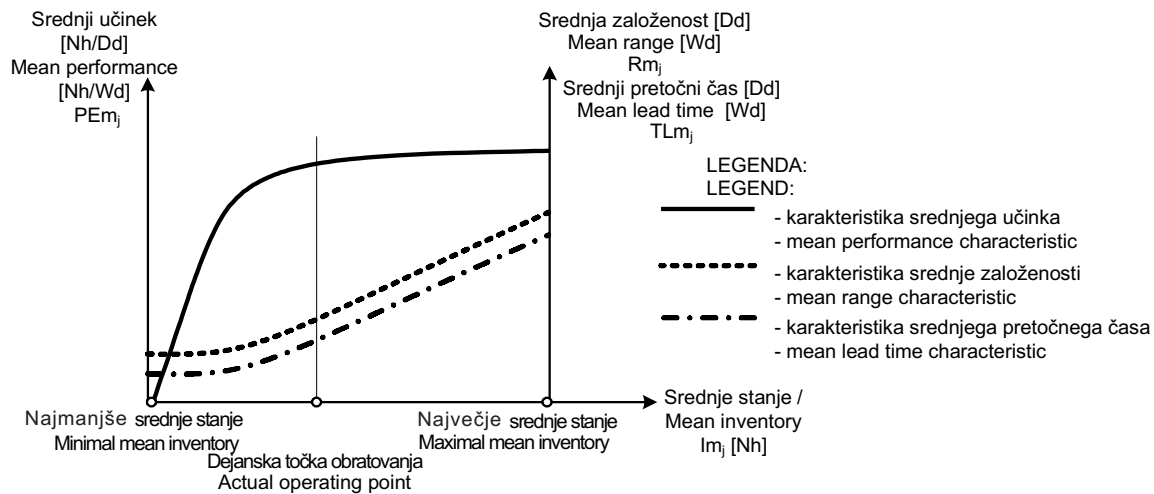
Če bi narisali diagrame pretoka naročil prek  $j$ -tega delovnega sistema za vsa možna stanja naročil, bi prišli do vseh možnih točk dejanskega obratovanja  $j$ -tega delovnega sistema oziroma točkam

Flow diagrams of three typical inventories of the  $j$ -th working system enable the definition of three possible operating points of the  $j$ -th working system; i.e., the actual values of mean performance, the mean range and the mean lead time of a working system in these particular operating points can be found, as shown in Figure 3.

By drawing order-flow diagrams of the  $j$ -th working system for all possible inventories of orders one can obtain all possible actual operating points of the  $j$ -th working system, i.e., the actual



Sl. 3. Tri značilne točke obratovanja  $j$ -tega delovnega sistema  
 Fig. 3. Three typical operating points of the  $j$ -th working system



Sl. 4. Diagram proizvodnih karakteristik *j*-tega delovnega sistema  
 Fig. 4. Production characteristic diagram of the *j*-th working system

pripadajočih vrednosti srednjega učinka, srednje založenosti in srednjega pretočnega časa delovnega sistema, ki sestavljajo diagram proizvodnih karakteristik, kar prikazuje slika 4.

Dejanska točka obratovanja *j*-tega delovnega sistema leži nekje med najmanjšim in največjim srednjim stanjem.

Iz razumljivih vzrokov (preveliki stroški) se v praksi proizvodnih karakteristik delovnih sistemov ne določa s preizkusi, temveč po enačbah [5]:

- srednje stanje naročil kot funkcijo tekoče spremenljivke *t* določimo po enačbi

$$Im(t) = I_{min} \left[ -(1 - \sqrt[4]{t})^4 + 1 \right] + \alpha_1 \cdot I_{min} \cdot t \quad (1)$$

- Im(t)* srednje stanje naročil kot funkcija tekoče spremenljivke *t* [Nh]
- I<sub>min</sub>* idealno najmanjše stanje naročil [Nh]
- α<sub>1</sub>* faktor raztezanja [-]
- t* tekoča spremenljivka ( $0 \leq t \leq 1$ )
- relativno srednje stanje naročil kot funkcijo tekoče spremenljivke *t* določimo po enačbi:

$$Im_r(t) = \frac{Im(t)}{I_{min}} \cdot 100 \quad (2)$$

- Im<sub>r</sub>(t)* relativno srednje stanje naročil kot funkcija tekoče spremenljivke *t* [%]
- srednji učinek kot funkcijo tekoče spremenljivke *t* določimo po enačbi:

$$PEm(t) = PE_{max} \left[ -(1 - \sqrt[4]{t})^4 + 1 \right] \quad (3)$$

mean performance, the mean range and the mean lead time of a working system at particular points that form the production characteristic diagram, as shown in Figure 4.

The actual operating point of the *j*-th working system is somewhere between the minimum and the maximum mean inventory.

In practice (due to too high costs) the production characteristics of working systems are not defined experimentally, they are calculated using Equations [5]:

- mean inventory of orders as a function of the variable *t*

- Im(t)* mean inventory of orders as a function of the variable *t* [Nh]
- I<sub>min</sub>* ideal minimum inventory of orders [Nh]
- α<sub>1</sub>* extension factor [-]
- t* variable ( $0 \leq t \leq 1$ )
- relative mean inventory of orders as a function of the variable *t*

- Im<sub>r</sub>(t)* relative mean inventory of orders as a function of the variable *t* [%]
- mean performance as a function of the variable *t*



$PEm(t)$ srednji učinek kot funkcija tekoče spremenljivke $t$ [Nh/Dd]	$PEm(t)$ mean performance as a function of the variable $t$ [Nh/Wd]
$PE_{max}$ največji mogoči učinek delavnega sistema [Nh/Dd]	$PE_{max}$ maximum possible performance of a working system [Nh/Wd]
- srednjo izkoriščenost delovnega sistema kot funkcijo tekoče spremenljivke $t$ določimo po enačbi	- mean utilization of a working system as a function of the variable $t$

$$Um(t) = \frac{PEm(t)}{PE_{max}} \cdot 100 \quad (4)$$

$Um(t)$ srednja izkoriščenost delovnega sistema kot funkcija tekoče spremenljivke $t$ [%]	$Um(t)$ mean utilization of a working system as a function of the variable $t$ [%]
- srednjo založenost kot funkcijo tekoče spremenljivke $t$ določimo po enačbi:	- mean range as a function of the variable $t$

$$Rm(t) = \frac{Im(t)}{PEm(t)} \quad (5)$$

$Rm(t)$ srednja založenost kot funkcija tekoče spremenljivke $t$ [Dd]	$Rm(t)$ mean range as a function of the variable $t$ [Wd]
- srednji pretočni čas kot funkcijo tekoče spremenljivke $t$ določimo po enačbi	- mean lead time as a function of the variable $t$

$$Tlm(t) = Rm(t) - TOPm \cdot \mu_{TOP}^2 \quad (6)$$

$Tlm(t)$ srednji pretočni čas delovnega sistema kot funkcija tekoče spremenljivke $t$ [Dd]	$Tlm(t)$ mean lead time of a working system as a function of the variable $t$ [Wd]
$TOPm$ srednji čas izvedbe naročil na delovnem sistemu [Dd]	$TOPm$ mean order-processing time of a working system [Wd]
$\mu_{TOP}$ variacijski koeficient časov izvedbe naročil [-]	$\mu_{TOP}$ coefficient of variation of order-processing times [-]

Enačbe (1) do (6) povedo, da so za izračun proizvodnih karakteristik  $j$ -tega delovnega sistema potrebne informacije o:

- idealnem najmanjšem stanju naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu
- ideal minimum inventory of orders in the  $j$ -th working system

$$(I_j)_{min} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (TO_{i,j})^2}{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j}} \quad (7)$$

$TO_{ij}$ čas za $i$ -to naročilo na $j$ -tem delovnem sistemu, ki je v opazovanem časovnem obdobju odšlo z delovnega sistema [Nh]	$TO_{ij}$ time of the $i$ -th order that departed from the $j$ -th working system during the interval P [Nh]
$n_j$ število naročil, ki so v opazovanem časovnem obdobju odšla z $j$ -tega delovnega sistema [-]	$n_j$ number of orders which have departed from the $j$ -th working system during that interval [-]
- največjem možnem učinku na $j$ -tem delovnem sistemu	- maximum possible performance of the $j$ -th working system

$$(PE_{max})_j = CDAY_j \quad (8)$$

$(PE_{max})_j$ največji mogoči učinek $j$ -tega delovnega sistema [Nh/Dd]	$(PE_{max})_j$ maximum possible performance of the $j$ -th working system [Nh/Wd]
$CDAY_j$ razpoložljive kapacitete $j$ -tega delovnega sistema [Nh/Dd]	$CDAY_j$ available capacities of the $j$ -th working system [Nh/Wd]



- faktorju raztezanja – običajno:  $\alpha_1 = 10$ ;
- srednjem času izvedbe naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu:

$$TOPm_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} TOP_{i,j}}{n_j} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j}}{n_j \cdot CDAY_j} = \frac{TOm_j}{CDAY_j} \quad (9),$$

- $TOPm_j$  srednji čas izvedbe naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu [Wd]
- $TOP_{i,j}$  čas izvedbe  $i$ -tega naročila na  $j$ -tem delovnem sistemu [Dd]
- $TOm_j$  srednji čas za naročilo na  $j$ -tem delovnem sistemu [Wd]
- variacijskem koeficientu časov izvedbe naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu

- extension factor – usually:  $\alpha_1 = 10$
- mean order-processing time in the  $j$ -th working system

- $TOPm_j$  mean processing time in the  $j$ -th working system [Wd]
- $TOP_{i,j}$  processing time of the  $i$ -th order in the  $j$ -th working system [Wd]
- $TOm_j$  mean time of order in the  $j$ -th working system [Wd]
- coefficient of variation of order-processing times in the  $j$ -th working system

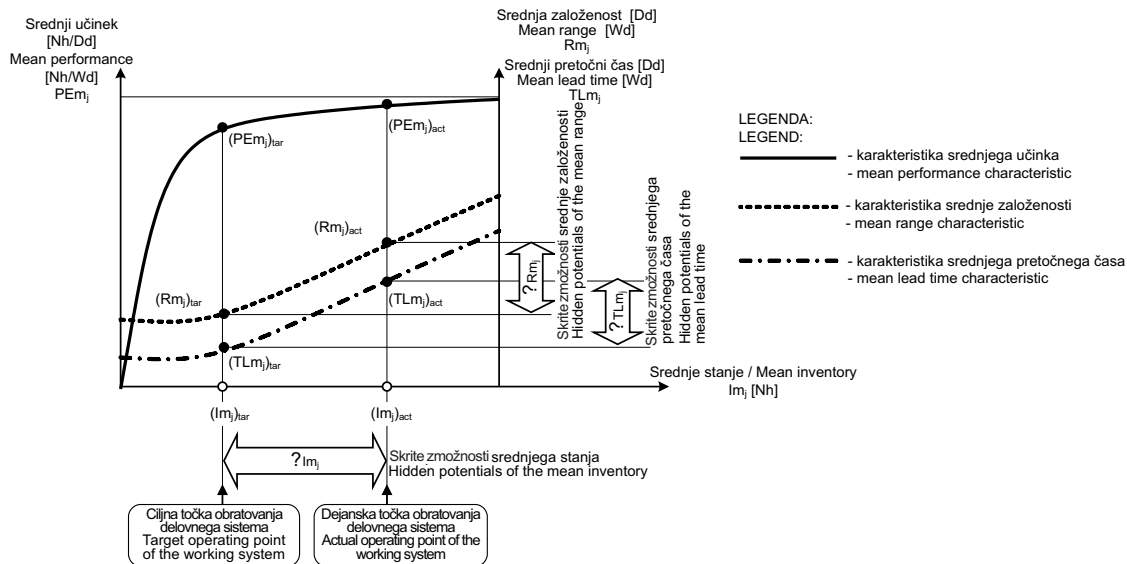
$$(\mu_{TOP})_j = \frac{(\sigma_{TOP})_j}{TOPm_j} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (TOPm_j - TOP_{i,j})^2}{n_j}}}{TOPm_j} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} \left[ \frac{TOm_j}{CDAY_j} - \frac{TO_{i,j}}{CDAY_j} \right]^2}{n_j}}}{\frac{TOm_j}{CDAY_j}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j}}{n_j} - TO_{i,j} \right)^2}{n_j}}}{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j}} \quad (10),$$

- $(\mu_{TOP})_j$  variacijski koeficient časov izvedbe naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu [-]
- $(\sigma_{TOP})_j$  standardno odstopanje časov izvedbe naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu

- $(\mu_{TOP})_j$  coefficient of variation of order-processing times in the  $j$ -th working system [-]
- $(\sigma_{TOP})_j$  standard deviation of order-processing times in the  $j$ -th working system

Da bi prišli do podatkov o skritih logističnih zmožnostih delovnih sistemov podjetja, bo treba, na podlagi rezultatov izvedenih meritev pretoka naročil prek delovnih sistemov v opazovanem časovnem

In order to obtain the data on the hidden logistic potentials of working systems in a company it will be necessary (on the basis of the measured results on the order-flow through working systems in the interval  $P$ ) to



Sl. 5. Skrite logistične zmožnosti  $j$ -tega delovnega sistema  
 Fig. 5. Hidden logistic potentials of the  $j$ -th working system

obdobju  $P$ , za vsak delovni sistem podjetja določiti:

- dejansko točko obratovanja delovnega sistema, ki pomeni dejansko srednje stanje naročil in stanju pripadajočih dejanskih vrednosti srednjega učinka, srednje založenosti in srednjega pretočnega časa delovnega sistema,
- ciljno točko obratovanja delovnega sistema, ki pomeni ciljno srednje stanje naročil in stanju pripadajočih ciljnih vrednosti srednjega učinka, srednje založenosti in srednjega pretočnega časa delovnega sistema (slika 5).

Dejansko srednje stanje naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu pa je lahko večje, manjše ali enako ciljnemu srednjemu stanju:

$$(Im)_j^{act} \leq \geq (Im)_j^{tar} \quad (11)$$

$(Im)_j^{act}$  dejansko srednje stanje naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu [Nh]

$(Im)_j^{tar}$  ciljno srednje stanje naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu [Nh]

define for each working system of the company:

- the actual operating point of a working system that represents the actual mean inventory of orders and the corresponding actual values of mean performance, mean range and mean lead time of the working system,
- the target operating point of a working system that represents the target mean inventory of orders and the corresponding target values of mean performance, mean range and mean lead time of the working system (Figure 5).

Actual mean inventory of orders in the  $j$ -th working system can be larger or smaller than, or equal to, the target mean inventory:

$(Im)_j^{act}$  actual mean inventory of orders in the  $j$ -th working system [Nh]

$(Im)_j^{tar}$  target mean inventory of orders in the  $j$ -th working system [Nh]

## 2.1 Določanje dejanske točke obratovanja delovnega sistema

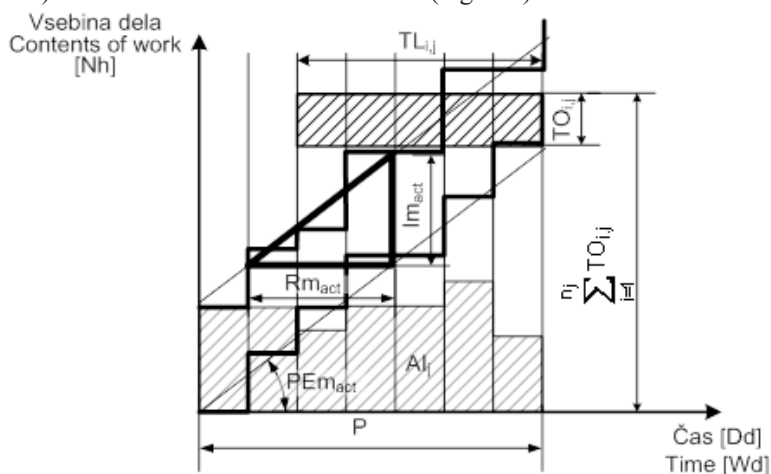
Da bi določili dejansko točko obratovanja  $j$ -tega delovnega sistema ([1] in [5]), je treba izvesti beleženje časov prihoda/odhoda naročil na delovni sistem in z njega ter ugotoviti naročilom pripadajoče vsebine dela.

Zbrani podatki o pretoku naročil prek  $j$ -tega delovnega sistema v opazovanem časovnem obdobju  $P$  omogočajo konstruiranje diagrama pretoka naročil (sl. 6).

## 2.1 Finding the actual operating point of the working system

In order to find the actual operating point of the  $j$ -th working system ([1] and [5]) it is necessary to obtain arrival times of orders at a working system (and the departure times of orders from a working system) and the data on the respective contents of the orders.

Using the data obtained on the flow of orders through a particular working system in the interval  $P$  it is possible to draw an order-flow diagram (Figure 6).



Sl. 6. Diagram pretoka naročil prek  $j$ -tega delovnega sistema  
Fig. 6. Order-flow diagram of the  $j$ -th working system

Podatki, zbrani v diagramu pretoka, omogočajo določitev dejanske točke obratovanja  $j$ -tega delovnega sistema oziroma točki obratovanja pripadajočih vrednosti:

- dejanskega srednjega stanja naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu

The data in the flow diagram enable the definition of the actual operating point of the  $j$ -th working system and its corresponding values:

- actual mean inventory of orders in the  $j$ -th working system

$$(Im_j)_{act} = \frac{AI_j}{P} \quad (12),$$

$(Im_j)_{act}$  dejansko srednje stanje naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu [Nh]

$AI_j$  ploskev stanja naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu [Nh Dd]

$P$  opazovano časovno obdobje [Dd]

- relativnega dejanskega srednjega stanja naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu

$(Im_j)_{act}$  actual mean inventory of orders in the  $j$ -th working system [Nh]

$AI_j$  area of the inventory of orders in the  $j$ -th working system [Nh/Wd]

$P$  interval [Wd]

- relative actual mean inventory of orders in the  $j$ -th working system

$$(Im,r_j)_{act} = \frac{(Im_j)_{act}}{(I_j)_{min}} \cdot 100 \quad (13),$$

$(Im,r_j)_{act}$  relativno dejansko srednje stanje naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu [%]

$(I_j)_{min}$  idealno najmanjše stanje naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu [Nh]

- dejanskega srednjega učinka  $j$ -tega delovnega sistema

$(Im,r_j)_{act}$  relative actual mean inventory of orders in the  $j$ -th working system [%]

$(I_j)_{min}$  ideal minimum inventory of orders in the  $j$ -th working system [Nh]

- actual mean performance of the  $j$ -th working system

$$(PEm_j)_{act} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j}}{P} \quad (14),$$

$(PEm_j)_{act}$  dejanski srednji učinek  $j$ -tega delovnega sistema [Nh/Dd]

$TO_{i,j}$  čas na  $i$ -to naročilo [Nh]

$n_j$  število naročil, ki so v opazovanem časovnem obdobju odšla z  $j$ -tega delovnega sistema

- dejanske srednje izkoriščenosti  $j$ -tega delovnega sistema

$(PEm_j)_{act}$  actual mean performance of the  $j$ -th working system [Nh/Wd]

$TO_{i,j}$  time of the  $i$ -th order in the  $j$ -th working system [Nh]

$n_j$  number of orders that have departed from the  $j$ -th working system during that interval

- actual mean utilization of the  $j$ -th working system

$$(Um_j)_{act} = \frac{(PEm_j)_{act}}{CDAY_j} \cdot 100 \quad (15),$$

$(Um_j)_{act}$  dejanska srednja izkoriščenost  $j$ -tega delovnega sistema [%]

$CDAY_j$  razpoložljive kapacitete  $j$ -tega delovnega sistema [Nh/Dd]

- dejanske srednje založenosti  $j$ -tega delovnega sistema

$(Um_j)_{act}$  actual mean utilization of the  $j$ -th working system [%]

$CDAY_j$  available capacities of the  $j$ -th working system [Nh/Wd]

- actual mean range of the  $j$ -th working system

$$(Rm_j)_{act} = \frac{(Im_j)_{act}}{(PEm_j)_{act}} = \frac{AI_j}{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j}} \quad (16),$$

$(Rm_j)_{act}$  dejanska srednja založenost  $j$ -tega delovnega sistema [Dd]

- dejanskega srednjega pretočnega časa  $j$ -tega delovnega sistema

$(Rm_j)_{act}$  actual mean range of the  $j$ -th working system [Wd]

- actual mean lead time of the  $j$ -th working system

$$(Tlm_j)_{act} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (TL_{i,j} \cdot TO_{i,j})}{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j}} \quad (17),$$

$(TLM_j)_{act}$  dejanski srednji pretočni čas  $j$ -tega delovnega sistema [Dd]  
 $TL_{ij}$  pretočni čas  $i$ -tega naročila na  $j$ -tem delovnem sistemu [Dd]

$(TLM_j)_{act}$  actual mean lead time of the  $j$ -th working system [Wd]  
 $TL_{ij}$  lead time of the  $i$ -th order [Wd]

**2.2 Določanje ciljne točke obratovanja delovnega sistema**

**2.2 Defining the target operating point of the working system**

Ciljna točka obratovanja  $j$ -tega delovnega sistema pomeni tisto ciljno srednje stanje naročil na delovnem sistemu, pri katerem se dosežejo ciljne vrednosti srednjega učinka, srednje založenosti in srednjega pretočnega časa.

The target operating point of the  $j$ -th working system represents the target mean inventory of orders in the working system where the target values of mean performance, mean range and mean lead time are achieved.

Osnovo za določitev ciljnega srednjega stanja naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu pomeni enačba (2). Če v enačbi (2) nadomestimo  $Im_r(t)$  z  $(Im,r')_{tar}$  in  $Im(t)$  z  $(Im)_jtar$  dobimo, da je:

The definition of the target mean inventory of orders in the  $j$ -th working system is based on Equation (2). If  $Im_r(t)$  is substituted by  $(Im,r')_{tar}$  and  $Im(t)$  by  $(Im)_jtar$  in Equation (2), the following relation is established:

$$(Im,r')_{tar} = \frac{(Im)_jtar}{(I_j)_{min}} \cdot 100 \tag{18}$$

and:

oziroma, da je:

$$(Im)_jtar = \frac{(Im,r')_{tar} \cdot (I_j)_{min}}{100} \tag{19}$$

Ob predpostavki, da se odločimo za 95-odstotno ciljno srednjo izkoriščenost delovnega sistema, lahko iz diagrama normiranih proizvodnih karakteristik [5] beremo, da je zahtevano srednjo izkoriščenost mogoče doseči pri relativnem ciljnem srednjem stanju  $(Im,r')_{tar} = 180$  odstotkov.

If 95 % target mean utilization of the working system is chosen, it can be found from the standard production characteristic diagram [5] that it is possible to achieve the required mean utilization if the relative target mean inventory is  $(Im,r')_{tar} = 180$  %.

Z vstavitvijo dobljene vrednosti  $(Im,r')_{tar}$  in enačbe (7), ki definira najmanjše srednje stanje naročil, v enačbo (19), dobimo končno obliko enačbe za določitev ciljnega srednjega stanja naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu:

By inserting the obtained value of  $(Im,r')_{tar}$ , and by using equation (7), which defines the minimum mean inventory of orders, into Equation (19), the final form of the equation for the definition of the target mean inventory of orders in the  $j$ -th working system is derived:

$$(Im)_jtar = 1,8 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (TO_{i,j})^2}{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j}} = 1,8 \cdot (I_j)_{min} \tag{20}$$

Osnovo za določitev ciljnega srednjega učinka  $j$ -tega delovnega sistema pomeni enačba (4). Če v enačbi (4) nadomestimo  $Um(t)$  z  $(Um)_jtar$  in  $PEm(t)$  s  $(PEm)_jtar$ , dobimo, da je:

The definition of the target mean performance of the  $j$ -th working system is based on Equation (4). If  $Um(t)$  is substituted by  $(Um)_jtar$  and  $PEm(t)$  by  $(PEm)_jtar$  in Equation (4), the following relation is established:

$$(Um)_jtar = \frac{(PEm)_jtar}{(PE_j)_{max}} \cdot 100 \tag{21}$$

oziroma, da je:

and:

$$(PEm)_jtar = \frac{(Um)_jtar \cdot (PE_j)_{max}}{100} \tag{22}$$

$(PEm)_jtar$  ciljni srednji učinek  $j$ -tega delovnega

$(PEm)_jtar$  target mean performance of the  $j$ -th work-

sistema [Nh/Dd]  
 $(Um_j)_{tar}$  ciljna srednja izkoriščenost  $j$ -tega delovnega sistema [%]  
 $(PE_j)_{max}$  največji mogoči učinek  $j$ -tega delovnega sistema [Nh/Dd].

Ker smo se že poprej odločili za  $(Um_j)_{tar} = 95\%$  in ker je največji mogoči učinek delovnega sistema enak razpoložljivim kapacitetam delovnega sistema, je končno ciljni srednji učinek  $j$ -tega delovnega sistema:

$$(PEm_j)_{tar} = 0,95 \cdot CDAY_j \quad (23).$$

Osnovo za določitev ciljne srednje založenosti  $j$ -tega delovnega sistema pomeni enačba (5). Če v enačbi (5) nadomestimo  $Im(t)$  s  $(Im_j)_{tar}$  in  $PEm(t)$  s  $(PEm_j)_{tar}$  dobimo, da je:

$$(Rm_j)_{tar} = \frac{(Im_j)_{tar}}{(PEm_j)_{tar}} \quad (24)$$

$(Rm_j)_{tar}$  ciljna srednja založenost  $j$ -tega delovnega sistema [Dd]

Če nadalje v enačbi (24) nadomestimo  $(Im_j)_{tar}$  z izrazom enačbe (20) in  $(PEm_j)_{tar}$  z izrazom enačbe (23), dobimo končno enačbo za določitev ciljne srednje založenosti  $j$ -tega delovnega sistema.

$$(Rm_j)_{tar} = 1,9 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (TO_{i,j})^2}{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j} \cdot CDAY_j} \quad (25).$$

Osnovo za določitev ciljnega srednjega pretočnega časa  $j$ -tega delovnega sistema pomeni enačba (6). Če v enačbi (6) nadomestimo  $TLm(t)$  s  $(TLm_j)_{tar}$  in  $Rm(t)$  z  $(Rm_j)_{tar}$ , dobimo, da je:

$$(TLm_j)_{tar} = (Rm_j)_{tar} - TOPm_j \cdot [(\mu_{TOP})_j]^2 \quad (26)$$

$(TLm_j)_{tar}$  ciljni srednji pretočni čas  $j$ -tega delovnega sistema [Dd].

Ker pa vemo, da pomenijo osnovne podatke o naročilih časi za naročila  $TO_{i,j}$  in ne časi izvedbe naročil  $TOP_{i,j}$ , moramo v enačbi (26) izraziti  $TOP_{i,j}$  s  $TO_{i,j}$  (zveza med  $TOP_{i,j}$  in  $TO_{i,j}$  je podana z enačbo (9)). V primeru, ko ima  $j$ -ti delovni sistem stalen največji mogoči učinek, lahko vzamemo, da je:

$$(\mu_{TOP})_j = (\mu_{TO})_j \quad (27),$$

ki ga določimo po enačbi (10).

Če v enačbi (26) nadomestimo  $(Rm_j)_{tar}$  z izrazom, podanim z enačbo (25),  $TOPm_j$  z izrazom

ing system [Nh/Wd]

$(Um_j)_{tar}$  target mean utilization of the  $j$ -th working system [%]

$(PE_j)_{max}$  maximum possible performance of the  $j$ -th working system [Nh/Wd]

As  $(Um_j)_{tar} = 95\%$  was previously selected and as the maximum possible performance of the working system is equal to the available capacities of the working system, the target mean performance of the  $j$ -th working system is defined as:

The definition of the target mean range of the  $j$ -th working system is based on Equation (5). If  $Im(t)$  is substituted by  $(Im_j)_{tar}$  and  $PEm(t)$  by  $(PEm_j)_{tar}$  in Equation (5), the following relation is established:

$(Rm_j)_{tar}$  target mean range of the  $j$ -th working system [Wd]

By substituting  $(Im_j)_{tar}$  from Equation (24) with the expression from Equation (20) and  $(PEm_j)_{tar}$  with the expression from Equation (23), the final form of the equation for the definition of the target mean range of the  $j$ -th working system is derived.

The definition of the target mean lead time of the  $j$ -th working system is based on Equation (6). If  $TLm(t)$  is substituted by  $(TLm_j)_{tar}$  and  $Rm(t)$  by  $(Rm_j)_{tar}$  in Equation (6), the following relation is established:

$(TLm_j)_{tar}$  target mean lead time of the  $j$ -th working system [Wd]

As the basic data on orders are the order times  $TO_{i,j}$  and not the order-processing times  $TOP_{i,j}$ , it is necessary to express  $TOP_{i,j}$  by  $TO_{i,j}$  in Equation (26). The relation between  $TOP_{i,j}$  and  $TO_{i,j}$  is defined by Equation (9). If the  $j$ -th working system has constant maximum possible performance, the following assumption can be made:

It is defined in Equation (10).

By substituting  $(Rm_j)_{tar}$  in Equation (26) with the expression defined by Equation (25), and  $TOPm_j$



enačbe (9) in  $(\mu_{TOP})_j$  z izrazom enačbe (10), dobimo končno enačbo za določitev ciljnega srednjega pretočnega časa  $j$ -tega delovnega sistema:

$$(Tlm_j)_{tar} = 1,9 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (TO_{i,j})^2}{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j} \cdot CDAY_j} - \frac{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j}}{n_j \cdot CDAY_j} \cdot \left[ \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^{n_j} \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j}}{n_j} - TO_{i,j} \right)^2}{n_j} \right)^2}{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} TO_{i,j}}{n_j}} \right] \quad (28).$$

with the expression from Equation (9) and  $(\mu_{TOP})_j$  with expression from Equation (10), the final form of the equation for the definition of the target mean lead time of the  $j$ -th working system is derived:

### 2.3 Postopek ugotavljanja skritih logističnih zmognosti delovnih sistemov

Skrite logistične zmognosti delovnih sistemov podjetja ugotavljamo le na delovnih sistemih, na katerih je relativno dejansko srednje stanje naročil  $(Im,r)_j^{act} > 180\%$ , saj vemo, da pri tem stanju dosežemo željeno 95-odstotno izkoriščenost delovnih sistemov.

Postopek ugotavljanja skritih logističnih zmognosti delovnih sistemov lahko opišemo z naslednjimi koraki [5]:

#### 1. korak: Izvedba meritev pretoka naročil prek delovnih sistemov

Na poljubnem  $j$ -tem delovnem sistemu je treba v opazovanem časovnem obdobju  $P$  zapisovati:

- številke naročil, ki so prišla/odšla na delovni sistem in z njega,
- rok prihoda/odhoda naročil na delovni sistem in z njega,
- vsebino dela naročil, ki so prišla/odšla na delovni sistem in z njega,
- število naročil, ki so odšla z delovnega sistema.

#### 2. korak: Konstruiranje diagramov pretoka naročil prek delovnih sistemov ter določitev dejanskih točk obratovanja delovnih sistemov

Za poljubni  $j$ -ti delovni sistem je treba konstruirati diagram pretoka naročil in določiti:

- dejansko srednje stanje naročil  $(Im)_j^{act} \rightarrow$  enačba (12),
- relativno dejansko srednje stanje naročil  $(Im,r)_j^{act} \rightarrow$  enačba (13),
- dejanski srednji učinek delovnega sistema  $(PEm)_j^{act} \rightarrow$  enačba (14),
- dejansko srednjo založenost delovnega sistema

### 2.3 Procedure for finding the hidden logistic potentials of working systems

The hidden logistic potentials of working systems in a company are only calculated for working systems whose relative actual mean inventory of orders is  $(Im,r)_j^{act} > 180\%$ , as in this case a working system is used 95 %.

The procedure for finding the hidden logistic potentials of working systems can be described by the following steps [5]:

#### Step 1: Order-flow measurements through working systems

In any  $j$ -th working system it is necessary to record in the interval  $P$ :

- order numbers that arrived at the working system or departed from it,
- the time of order arrival at and departure from the working system,
- contents of the orders that arrived at the working system or departed from it,
- number of orders that departed from the working system.

#### Step 2: Design of order-flow diagrams for working systems and the definition of actual operating points of working systems

In any  $j$ -th working system it is necessary to design the order flow diagram and to define:

- actual mean inventory of orders  $(Im)_j^{act} \rightarrow$  Equation (12),
- relative actual mean inventory of orders  $(Im,r)_j^{act} \rightarrow$  Equation (13),
- actual mean performance of the working system  $(PEm)_j^{act} \rightarrow$  Equation (14),
- actual mean range of the working system  $(Rm)_j^{act}$

$(Rm_j)_{act}$  → enačba (16),  
 - dejanski srednji pretočni čas delovnega sistema  
 $(Tlm_j)_{act}$  → enačba (17).

→ Equation (16),  
 - actual mean lead time of the working system  
 $(Tlm_j)_{act}$  → Equation (17).

3. korak: Določitev dejanske srednje založenosti in srednjega pretočnega časa izvedbe vseh naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu

Step 3: Calculation of the actual mean range and the mean lead time for processing all orders in the  $j$ -th working system

- dejanska srednja založenost izvedbe vseh naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu:

- actual mean range for processing all orders in the  $j$ -th working system

$$(Rm_j)_{act}^* = (Rm_j)_{act} \cdot n_j \quad (29)$$

$(Rm_j)_{act}^*$  dejanska srednja založenost izvedbe vseh naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu [Dd]

$(Rm_j)_{act}^*$  actual mean range for processing all orders in the  $j$ -th working system [Wd]

$n_j$  število naročil, ki so v opazovanem časovnem obdobju  $P$  odšla z  $j$ -tega delovnega sistema [-]

$n_j$  number of orders that have departed from the  $j$ -th working system during the interval  $P$  [-]

- dejanski srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu:

- actual mean lead time for processing all orders in the  $j$ -th working system

$$(Tlm_j)_{act}^* = (Tlm_j)_{act} \cdot n_j \quad (30)$$

$(Tlm_j)_{act}^*$  dejanski srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu [Dd]

$(Tlm_j)_{act}^*$  actual mean lead time for processing all orders in the  $j$ -th working system [Wd]

4. korak: Določitev dejanskega srednjega stanja, srednje založenosti in srednjega pretočnega časa izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih

Step 4: Calculation of the actual mean inventory, the mean range and the mean lead time for processing all orders in all working systems

- dejansko srednje stanje na vseh delovnih sistemih:

- actual mean inventory in all working systems:

$$(Im)_{act} = \sum_{j=1}^m (Im_j)_{act} \quad (31),$$

$(Im)_{act}$  dejansko srednje stanje na vseh delovnih sistemih [Nh]

$(Im)_{act}$  actual mean inventory in all working systems [Nh]

$m$  število delovnih sistemov [-]

$m$  number of working systems [-]

- dejanska srednja založenost izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih:

- actual mean range for processing all orders in all working systems

$$(Rm)_{act} = \sum_{j=1}^m (Rm_j)_{act}^* \quad (32),$$

$(Rm)_{act}$  dejanska srednja založenost izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih [Dd]

$(Rm)_{act}$  actual mean range for processing all orders in all working systems [Wd]

- dejanski srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih

- actual mean lead time for processing all orders in all working systems

$$(Tlm)_{act} = \sum_{j=1}^m (Tlm_j)_{act}^* \quad (33),$$

$(Tlm)_{act}$  dejanski srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih [Dd].

$(Tlm)_{act}$  actual mean lead time for processing all orders in all working systems [Wd]

5. korak: Konstruiranje diagramov proizvodnih karakteristik delovnih sistemov ter določitev relativnega ciljnega srednjega stanja in ciljnega srednjega stanja naročil.

Za poljubni  $j$ -ti delovni sistem je treba z uporabo enačb (1), (3), (5) in (6) določiti proizvodne karakteristike in narisati diagram proizvodnih karakteristik ter določiti:

- relativno ciljno srednje stanje naročil  $(Im, r_j)_{tar} \rightarrow$  enačba (18)
- ciljno srednje stanje naročil  $(Im)_j_{tar} \rightarrow$  enačba (19).

6. korak: Določitev ciljne srednje založenosti in ciljnega srednjega pretočnega časa delovnih sistemov

Za delovne sisteme, na katerih je bilo v 2. koraku ugotovljeno relativno dejansko srednje stanje naročil  $(Im, r_j)_{act} > 180\%$ , določiti:

- ciljno srednjo založenost  $(Rm_j)_{tar} \rightarrow$  enačba (25),
- ciljni srednji pretočni čas  $(Tlm_j)_{tar} \rightarrow$  enačba (28).

Za delovne sisteme, na katerih je bilo v 2. koraku ugotovljeno relativno dejansko srednje stanje naročil  $(Im, r_j)_{act} > 180\%$  vzeti, da je:

- ciljna srednja založenost enaka dejanski srednji založenosti  $(Rm_j)_{tar} = (Rm_j)_{act}$ ,
- ciljni srednji pretočni čas enak dejanskemu srednjemu pretočnemu času  $(Tlm_j)_{tar} = (Tlm_j)_{act}$ .

7. korak: Določitev ciljne srednje založenosti in ciljnega srednjega pretočnega časa izvedbe vseh naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu

- ciljna srednja založenost izvedbe vseh naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu

$$(Rm_j)_{tar}^* = (Rm_j)_{tar} \cdot n_j \quad (34),$$

$(Rm_j)_{tar}^*$  ciljna srednja založenost izvedbe vseh naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu [Dd]

- ciljni srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu

$$(Tlm_j)_{tar}^* = (Tlm_j)_{tar} \cdot n_j \quad (35).$$

$(Tlm_j)_{tar}^*$  ciljni srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu [Dd].

8. korak: Določitev ciljnega srednjega stanja, srednje založenosti in srednjega pretočnega časa izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih

- ciljno srednje stanje na vseh delovnih sistemih

$$(Im)_{tar} = \sum_{j=1}^m (Im_j)_{tar} \quad (36),$$

Step 5: Designing production-characteristic diagrams of working systems and the definition of the relative target mean inventory and the target mean inventory of orders

In any  $j$ -th working system it is necessary to define the production characteristics using Equations (1), (3), (5) and (6), draw a diagram of the production characteristics and define:

- the relative target mean inventory of orders  $(Im, r_j)_{tar} \rightarrow$  Equation (18)
- the target mean inventory of orders  $(Im)_j_{tar} \rightarrow$  Equation (19)

Step 6: Calculation of the target mean range and the target mean lead time of working systems

For working systems whose relative actual mean inventory of orders of  $(Im, r_j)_{act} > 180\%$  was established in step 2, it is necessary to calculate:

- the target mean range  $(Rm_j)_{tar} \rightarrow$  Equation (25)
- the target mean lead time  $(Tlm_j)_{tar} \rightarrow$  Equation (28)

For working systems whose relative actual mean inventory of orders of  $(Im, r_j)_{act} > 180\%$  was established in step 2, it is supposed that:

- the target mean range is equal to the actual mean range  $(Rm_j)_{tar} = (Rm_j)_{act}$ ,
- the target mean lead time is equal to the actual mean lead time  $(Tlm_j)_{tar} = (Tlm_j)_{act}$ .

Step 7: Calculation of the target mean range and the target mean lead time for processing all orders in the  $j$ -th working system

- target mean range for processing all orders in the  $j$ -th working system

$(Rm_j)_{tar}^*$  target mean range for processing all orders in the  $j$ -th working system [Wd]

- target mean lead time for processing all orders in the  $j$ -th working system

$(Tlm_j)_{tar}^*$  target mean lead time for processing all orders in the  $j$ -th working system [Wd]

Step 8: Calculation of the target mean inventory, the mean range and the mean lead time for processing all orders in all working systems

- target mean inventory in all working systems

- |   |  |
|---|--|
| <p><math>(Im)_{tar}</math> ciljno srednje stanje na vseh delovnih sistemih [Nh]<br/>         - ciljna srednja založenost izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih</p> | <p><math>(Im)_{tar}</math> target mean inventory in all working systems [Nh]<br/>         - target mean range for processing all orders in all working systems</p> |
|---|--|

$$(Rm)_{tar} = \sum_{j=1}^m (Rm_j)_{tar}^* \quad (37),$$

- |  |  |
|--|--|
| <p><math>(Rm)_{tar}</math> ciljna srednja založenost izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih [Dd]<br/>         - ciljni srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih</p> | <p><math>(Rm)_{tar}</math> target mean range for processing all orders in all working systems [Wd]<br/>         - target mean lead time for processing all orders in all working systems</p> |
|--|--|

$$(TLM)_{tar} = \sum_{j=1}^m (TLM_j)_{tar}^* \quad (38),$$

- |   |   |
|---|---|
| <p><math>(TLM)_{tar}</math> ciljni srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih [Dd]</p> | <p><math>(TLM)_{tar}</math> target mean lead time for processing all orders in all working systems [Wd]</p> |
|---|---|

9. korak: Določitev skritih logističnih zmožnosti  $j$ -tega delovnega sistema

Step 9: Calculation of the hidden logistic potentials in the  $j$ -th working system

- |   |  |
|---|--|
| <p>- skrite logistične zmožnosti srednjega stanja</p> | <p>- hidden logistic potential of the mean inventory</p> |
|---|--|

$$\Delta Im_j = \frac{(Im_j)_{act} - (Im_j)_{tar}}{(Im_j)_{act}} \cdot 100 \quad (39),$$

- |  |  |
|--|--|
| <p><math>\Delta Im_j</math> skrite logistične zmožnosti srednjega stanja na <math>j</math>-tem delovnem sistemu [%]<br/>         - skrite logistične zmožnosti srednje založenosti</p> | <p><math>\Delta Im_j</math> hidden logistic potential of the mean inventory in the <math>j</math>-th working system [%]<br/>         - hidden logistic potential of the mean range</p> |
|--|--|

$$\Delta Rm_j = \frac{(Rm_j)_{act} - (Rm_j)_{tar}}{(Rm_j)_{act}} \cdot 100 \quad (40),$$

- |  |   |
|--|---|
| <p><math>\Delta Rm_j</math> skrite logistične zmožnosti srednje založenosti izvedbe vseh naročil na <math>j</math>-tem delovnem sistemu [%]<br/>         - skrite logistične zmožnosti srednjega pretočnega časa</p> | <p><math>\Delta Rm_j</math> hidden logistic potential of the mean range when processing all orders in the <math>j</math>-th working system [%]<br/>         - hidden logistic potential of the mean lead time</p> |
|--|---|

$$\Delta TLM_j = \frac{(TLM_j)_{act} - (TLM_j)_{tar}}{(TLM_j)_{act}} \cdot 100 \quad (41),$$

- |  |  |
|--|--|
| <p><math>\Delta TLM_j</math> skrite logistične zmožnosti srednjega pretočnega časa izvedbe vseh naročil na <math>j</math>-tem delovnem sistemu [%]</p> | <p><math>\Delta TLM_j</math> hidden logistic potential of the mean lead time for processing all orders in the <math>j</math>-th working system [%]</p> |
|--|--|

10. korak: Določitev skritih logističnih zmožnosti vseh delovnih sistemov

Step 10: Calculation of the hidden logistic potentials of all working systems

- |   |   |
|---|---|
| <p>- skrite logistične zmožnosti srednjega stanja</p> | <p>- hidden logistic potentials of the mean inventory</p> |
|---|---|

$$\Delta Im = \frac{(Im)_{act} - (Im)_{tar}}{(Im)_{act}} \cdot 100 \quad (42),$$

- |   |   |
|---|---|
| <p><math>\Delta Im</math> skrite logistične zmožnosti srednjega stanja na vseh delovnih sistemih [%]<br/>         - skrite logistične zmožnosti srednje založenosti</p> | <p><math>\Delta Im</math> hidden logistic potentials of the mean inventory in all working systems [%]<br/>         - hidden logistic potentials of the mean range</p> |
|---|---|

$$\Delta Rm = \frac{(Rm)_{act} - (Rm)_{tar}}{(Rm)_{act}} \cdot 100 \quad (43),$$

$\Delta Rm$  skrite logistične zmožnosti srednje založenosti izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih [%];

- skrite logistične zmožnosti srednjega pretočnega časa

$\Delta Rm$  hidden logistic potentials of the mean range for processing all orders in all working systems [%]

- hidden logistic potentials of the mean lead time

$$\Delta TLM = \frac{(TLM)_{act} - (TLM)_{tar}}{(TLM)_{act}} \cdot 100 \quad (44)$$

$\Delta TLM$  - skrite logistične zmožnosti srednjega pretočnega časa izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih [%].

$\Delta TLM$  – hidden logistic potentials of the mean lead time when processing all orders in all working systems [%]

Skrite logistične zmožnosti delovnih sistemov podjetja povedo, za koliko odstotkov je mogoče znižati srednje stanje naročil ter skrajšati srednjo založenost in srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih, če bi prešli iz dejanskih na ciljne točke obratovanja delovnih sistemov.

The hidden logistic potentials of working systems in a company reveal how much it is possible to reduce the mean inventory of orders, the mean range and the mean lead time for processing all orders in all working systems if a transition from actual to target operating points of working systems is done.

#### 11. korak: Izbira ukrepov za izkoriščanje logističnih zmožnosti delovnih sistemov

#### Step 11: Selection of the measures for exploiting logistic potentials of working systems

Bistveni indikator za izbiro ukrepov, s katerimi bi izkoristili logistične zmožnosti delovnega sistema oziroma delovnih sistemov podjetja, pomeni razmerje med relativnim dejanskim srednjim stanjem naročil na delovnem sistemu  $(Im, r_j)_{act}$  in relativnim ciljnim srednjim stanjem naročil  $(Im, r_j)_{tar}$ .

The main indicator for the selection of measures for the efficient use of logistic potentials of working systems in a company is a relation between the relative actual mean inventory of orders in the working system  $(Im, r_j)_{act}$  and the relative target mean inventory of orders  $(Im, r_j)_{tar}$ .

Če je na delovnem sistemu ugotovljeno, da je  $(Im, r_j)_{act} > (Im, r_j)_{tar}$ , potem obstajajo razpoložljive skrite logistične zmožnosti delovnega sistema, ki jih je mogoče izkoristiti z enim od naslednjih ukrepov:

If it is found in a working system that  $(Im, r_j)_{act} > (Im, r_j)_{tar}$ , then available hidden logistic potentials exist in a working system, and they can be exploited by implementing one of the following measures:

- časovno omejeno povečanje kapacitet delovnega sistema ali
- časovno zadrževanje prihoda naročil na delovni sistem ali
- časovna ali krajevna premaknitev dela obremenitve delovnega sistema na tehnološko podoben delovni sistem.

- increasing the working system capacities for a limited time frame,
- stopping the arrival of orders to a working system for a limited time frame,
- transferring (in time or space) a part of the working system's load to another working system of similar technology.

Ukrep časovno omejenega povečanja zmogljivosti delovnega sistema se izvede v primeru, ko stanje naročil sestavljajo naročila, ki že zamujajo.

An increase of the working system capacities for a limited time frame is used when the inventory of orders consists of late orders.

V primeru, ko na delovnem sistemu ni omembe vrednega zamujanja naročil, ni primeren ukrep povečanja zmogljivosti, temveč ukrep časovnega zadrževanja prihoda naročil (naročila se zadržujejo toliko časa, dokler je to terminsko dopustno).

When there are no late orders in the working system the arrival of orders can be stopped for a limited time frame; its duration depends on the deadline.

Če časovno omejeno povečanje zmogljivosti delovnega mesta ni potrebno ali ni mogoče (dosežena mejna vrednost), se izvede ukrep časovne ali krajevne premaknitve dela obremenitve delovnega sistema na tehnološko podoben sistem, ki v časovni točki premaknitve izkazuje proste zmogljivosti.

If there is no need or it is not possible to increase the capacity of a working system for a limited time frame (i.e., the upper limit has already been reached), part of the load of a working system is transferred (in time or space) to a system of similar technology that has free capacities in that particular time frame.



Če je na delovnem sistemu ugotovljeno, da je  $(Im, r)_j^{act} \leq (Im, r)_j^{tar}$ , potem na delovnem sistemu ni skritih logističnih zmožnosti in je treba pred redukcijo stanja naročil odkriti nove logistične zmožnosti, in to z enim od naslednjih ukrepov:

- harmonizacija časov za naročila TO ali,
- skrčenje časov za naročila TO ali
- skrčenje časov prehoda TIO.

Ukrep harmonizacije časov za naročila se izvede na delovnem sistemu, na katerem je bil ugotovljen velik variacijski koeficient časov za naročila  $\mu_{TO} > 1$ .

Na delovnem sistemu, na katerem je bil ugotovljen majhen variacijski koeficient časov za naročila  $\mu_{TO} < 1$ , pa je mogoče priti do novih logističnih zmožnosti z ukrepom skrčenja časov za naročila, kar pa je mogoče doseči z uvedbo novih tehnologij ali z metodo SMED – krajšanja pripravljajno sklepnih časov.

Na delovnem sistemu, na katerem je bilo ugotovljeno, da je srednji čas prehoda  $TIOm$  daljši od srednjega časa za naročilo  $TOm$ :  $TIOm > TOm$ , je mogoče priti do novih logističnih zmožnosti z ukrepom skrčenja časa prehoda. Če čas prehoda sestavljajo pretežno časi prenosa, je mogoče čas prehoda skrčiti z ukrepom uvedbe novega prenosnega sistema ali ukrepom optimizacije LAY-OUT delovnih sistemov podjetja. Če pa čas prehoda sestavljajo pretežno časi čakanja pred izvedbo in po izvedbi naročil, je mogoče čas prehoda skrčiti z ukrepom uvedbe novega sistema PPC.

## 2.4 Računalniško podprto ugotavljanje logističnih zmožnosti delovnih sistemov podjetja

Ker je ročno računanje in konstruiranje diagramov pretoka in proizvodnih karakteristik ter ugotavljanje logističnih zmožnosti delovnih sistemov podjetja zamudno, je bil napisan računalniški program DIAGRAM za računalniško podprto računanje in konstruiranje diagramov pretoka in proizvodnih karakteristik delovnih sistemov ter izračun logističnih zmožnosti delovnih sistemov.

Program je napisan v programskem jeziku Java in deluje na osebнем računalniku ter ga je mogoče dograditi v poljubnem sistemu ERP.

S programom DIAGRAM je mogoče za poljubni delovni sistem podjetja, na osnovi zbranih podatkov o pretoku naročil v opazovanem časovnem obdobju  $P$ , narisati oziroma izračunati:

- diagram pretoka naročil prek poljubnega  $j$ -tega delovnega sistema,
- dejansko srednje stanje naročil na  $j$ -tem delovnem

If it is found in a working system that  $(Im, r)_j^{act} \leq (Im, r)_j^{tar}$ , then there are no hidden logistic potentials for that particular working system; before reducing the inventory of orders it is necessary to find new logistic potentials by using one of the following measures:

- harmonization of order times  $TO$ ,
- reduction of order times  $TO$ ,
- reduction of the interoperation times  $TIO$ .

Harmonization of the order times is carried out in a working system where a high coefficient of the variation of order times  $\mu_{TO} > 1$  was found.

For a working system where a low coefficient of variation of the order times  $\mu_{TO} < 1$  was found, new logistic potentials can be found by reducing the order times, which can be achieved by implementing new technologies or by the SMED method (reduction of the setup time).

For working systems where it was established that the mean interoperation time  $TIOm$  is longer than the mean order time  $TOm$ :  $TIOm > TOm$ , it is possible to find new logistic potentials by reducing the interoperation time. If the interoperation time consists mainly of transport time, it can be reduced by implementing a new transport system or by optimizing the layout of the working systems in a company. If the interoperation time consists mainly of queue time (before and after processing the orders) it is possible to reduce the interoperation time by implementing of a new PPC system.

## 2.4 Computer-aided finding of the hidden logistic potentials of working systems in the company

The manual calculation and drawing of flow diagrams and production characteristics and determining the hidden logistic potentials of working systems is rather time consuming, so the "Diagram" computer software was developed for this purpose.

The software was written in the Java programming language, it runs on a PC and it can be added to any ERP system.

Using the Diagram software (on the basis of the data obtained on the flow of orders in the interval  $P$ ) it is possible to draw or calculate for any working system of the company:

- order-flow diagram of any  $j$ -th working system,
- actual mean inventory of orders in the  $j$ -th working system  $(Im)_j^{act}$ ,
- actual mean performance of the  $j$ -th working system  $(PEm)_j^{act}$ ,

- sistemu  $(Im)_j^{act}$ ,
  - dejanski srednji učinek  $j$ -tega delovnega sistema  $(PEm)_j^{act}$ ,
  - dejansko srednjo izkoriščenost  $j$ -tega delovnega sistema  $(Um)_j^{act}$ ,
  - dejansko srednjo založenost  $j$ -tega delovnega sistema  $(Rm)_j^{act}$  in
  - dejanski srednji pretočni čas  $j$ -tega delovnega sistema  $(Tlm)_j^{act}$ ,
  - diagram karakteristik  $j$ -tega delovnega sistema,
  - ciljno srednje stanje naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu  $(Im)_j^{tar}$ ,
  - ciljni srednji učinek  $j$ -tega delovnega sistema  $(PEm)_j^{tar}$ ,
  - ciljno srednjo založenost  $j$ -tega delovnega sistema  $(Rm)_j^{tar}$ ,
  - ciljni srednji pretočni čas  $j$ -tega delovnega sistema  $(Tlm)_j^{tar}$ ,
  - logistične zmožnosti  $j$ -tega delovnega sistema  $\Delta Im_j, \Delta Rm_j, \Delta Tlm_j$ .
- Za vse delovne sisteme podjetja pa:
- logistične zmožnosti vseh delovnih sistemov podjetja  $\Delta Im, \Delta Rm, \Delta Tlm$ .

- actual mean utilization of the  $j$ -th working system  $(Um)_j^{act}$ ,
  - actual mean range of the  $j$ -th working system  $(Rm)_j^{act}$ ,
  - actual mean lead time of the  $j$ -th working system  $(Tlm)_j^{act}$ ,
  - production characteristic diagram of the  $j$ -th working system,
  - target mean inventory of orders in the  $j$ -th working system  $(Im)_j^{tar}$ ,
  - target mean performance of the  $j$ -th working system  $(PEm)_j^{tar}$ ,
  - target mean range of the  $j$ -th working system  $(Rm)_j^{tar}$ ,
  - target mean lead time of the  $j$ -th working system  $(Tlm)_j^{tar}$ ,
  - logistic potentials of the  $j$ -th working system  $\Delta Im_j, \Delta Rm_j, \Delta Tlm_j$ .
- For all working systems of the company:
- logistic potentials of all working systems in a company  $\Delta Im, \Delta Rm, \Delta Tlm$ .

### 3 PRIMER

Postopek določanja skritih logističnih zmožnosti delovnih sistemov je bil testiran v enoti ORODJARNA družbe ETI d.d. Izlake.

Poslovna enota orodjarne zaposluje 120 delavcev. Proizvodni program orodjarne obsega izdelavo orodij za preoblikovanje in prebijanje, brizganje termoplastov, brizganje in stiskanje duroplastov ter izdelavo avtomatiziranih naprav za montažo izdelkov.

Orodjarne dosega najkrajši čas izvedbe naročil en mesec, povprečni čas izvedbe naročil pa je dva do tri mesece.

Na naročilih je treba izvesti eno do 20 opravil, v povprečju pa tri opravila na naročilo.

Orodjarne ima trenutno 38 delovnih sistemov.

Vodstvo orodjarne se je odločilo za ugotavljanje skritih logističnih zmožnosti delovnih sistemov orodjarne, in to v opazovanem časovnem obdobju od 15.10.2003 do 17.12.2003 oziroma od 291 Dd do 350 Dd.

Koraki ugotavljanja skritih logističnih zmožnosti delovnih sistemov orodjarne:

*1. korak: Izvedba meritev pretoka naročil prek delovnih sistemov orodjarne*

### 3 CASE STUDY

The procedure for determining the hidden logistic potentials of working systems was tested in a tool-production department of the ETI Ltd. company from Izlake, Slovenia.

There are 120 employees in the tool-production department. It produces tools for transforming and cutting, jet machines for thermoplastic materials, jet and press machines for duroplastic materials, and automated assembly appliances.

The minimum time for processing an order in this department is 1 month, and the average time is 2 to 3 months.

Orders consist of 1 to 20 operations; on average there are 3 operations per order.

There are 38 working systems in the tool-production department.

The management decided that the hidden logistic potentials of the working systems in this department should be found out in the interval from October 15, 2003 to December 17, 2003, i.e., from WD 291 to WD 350.

The steps for finding the hidden logistic potentials of working systems in the tool-production department:

*Step 1: Measurement of the flow of orders through the working systems in the tool-production department*

Na vsakem delovnem sistemu so sodelavci orodjarne zapisovali:

- številke naročil, ki so prišla/odšla na delovne sisteme in z njih,
- čase prihoda/odhoda naročil na delovne sisteme in z njih,
- vsebine dela prihoda/odhoda naročil na delovne sisteme in z njih in
- število naročil, ki so odšla z delovnih sistemov.

Zajetih in izvedenih je bilo 2011 naročil s 3883 opravili.

Preglednica 1 prikazuje del rezultatov merjenja pretoka naročil prek delovnega sistema št.17 "rezkalni stroj ALG200" v opazovanem časovnem obdobju od 291 Dd do 350 Dd.

Preglednica 1. Rezultati merjenja pretoka naročil "Rezkalni stroj ALG200"

Table 1. Results of the order flow measurement through the "Milling machine ALG200"

Delovni sistem / Working system WC <sub>j</sub>	Številka naročila / Order number	Čas prihoda Dd Arrival time Wd	Čas odhoda Dd Departure time Wd	Vsebina dela – prihodi / Contents of orders – arrival Nh	Vsebina dela – odhodi / Contents of orders – departure Eh
17	2242 00 41	291	291	1,33	1,33
17	2242 00 34	291	291	0,75	0,75
17	2242 00 20	291	291	3,25	3,25
17	2242 00 39	291	291	1,75	1,75
17	2321 00 02	349	350	8,00	8,00
VSOTA / SUM				479,75	479,75

2. korak: Konstruiranje diagrama pretoka naročil preko delovnih sistemov orodjarne ter določitev dejanskih točk obratovanja delovnih sistemov

Za vsak delovni sistem orodjarne smo s programom DIAGRAM narisali diagram pretoka in izračunali  $(Im)_j_{act}$ ,  $(Im,r)_j_{act}$ ,  $(PEm)_j_{act}$ ,  $(Rm)_j_{act}$  in  $(Tlm)_j_{act}$ .

Slika 7 prikazuje rezultate konstruiranja diagrama pretoka naročil prek "rezkalnega stroja ALG200" in izračuna dejanske točke obratovanja.

3. in 4. korak: Določitev dejanske srednje založenosti in srednjega pretočnega časa izvedbe vseh naročil na posameznem j-tem delovnem sistemu orodjarne ter dejanskega srednjega stanja, srednje založenosti in srednjega pretočnega časa izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih orodjarne

Za izračun smo uporabili enačbe (29), (30) ter (31), (32) in (33). Rezultati izračuna so prikazani v preglednici 2.

In each working system the company employees recorded:

- the order numbers that arrived at the working systems and departed from them,
- the dates of order arrival at and departure from the working systems,
- the contents of orders arriving at and departing from the working systems,
- the number of orders that departed from the working systems.

There were 2011 orders with 3883 working operations processed.

Table 1 presents some results of the order flow measurement through the "Milling machine ALG200" (working system No. 17) in the interval from Wd 291 to Wd 350.

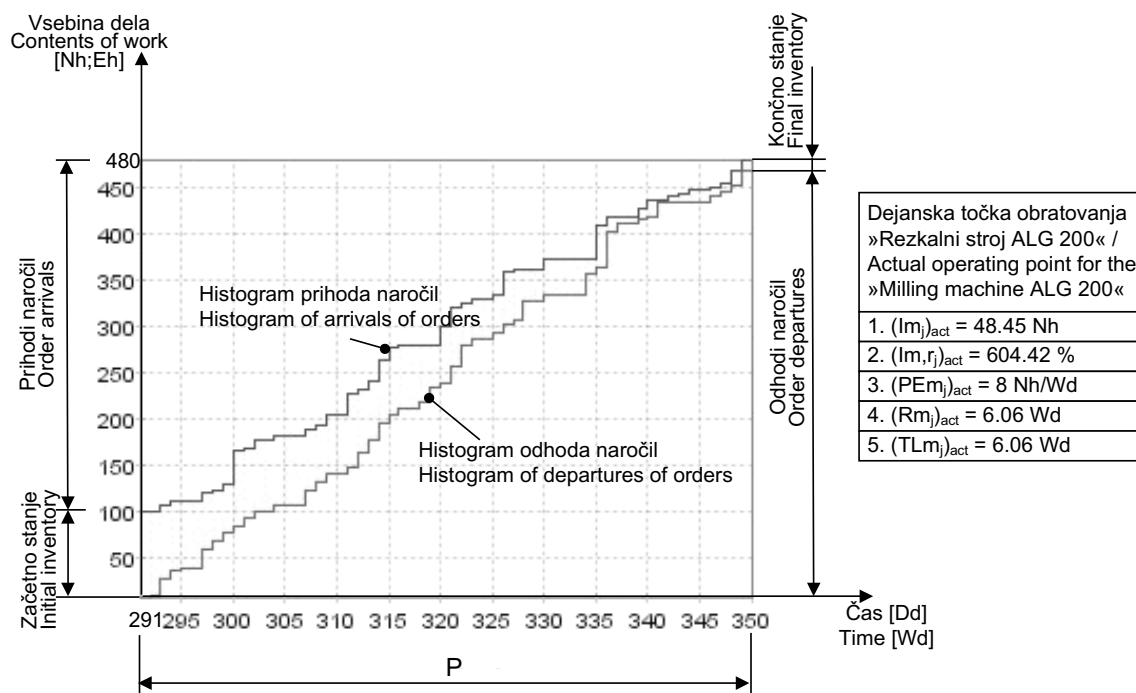
Step 2: Design of the order-flow diagram for working systems in the tool-production department and the definition of the actual operating points of working systems

The Diagram software was used to draw the flow diagram and to calculate  $(Im)_j_{act}$ ,  $(Im,r)_j_{act}$ ,  $(PEm)_j_{act}$ ,  $(Rm)_j_{act}$  and  $(Tlm)_j_{act}$  for each working system of the tool-production department.

Figure 7 presents the results of designing the order-flow diagram for the "Milling machine ALG200" and the calculation of the actual operating point.

Steps 3 and 4: Calculation of the actual mean range and the mean lead time for processing all orders in a particular j-th working system of the tool-production department, and the definition of the actual mean inventory, the mean range and the mean lead time for processing all orders in all working systems.

Equations (29), (30), (31), (32) and (33) were used in the calculation. The results of the calculation are shown in Table 2.



Sl. 7. Rezultati konstruiranja diagrama pretoka "rezkalni stroj ALG200" in izračuna dejanske točke obratovanja

Fig. 7. Results of designing the order-flow diagram for the "Milling machine ALG200" and the calculation of the actual operating point

5. korak: Določitev relativnega ciljnega srednjega stanja in ciljnega srednjega stanja naročil ter konstruiranje diagramov proizvodnih karakteristik delovnih sistemov orodjarne

Za vsak delovni sistem orodjarne smo s programom DIAGRAM določili relativno ciljno srednje stanje  $(Im,r_j)_{tar}$  in ciljno srednje stanje  $(Im_j)_{tar}$  ter narisali diagram proizvodnih karakteristik.

Slika 8 prikazuje rezultate izračuna  $(Im,r_j)_{tar}$  in  $(Im_j)_{tar}$  ter diagram proizvodnih karakteristik "rezkalni stroj ALG200".

6., 7. in 8. korak: Določitev ciljne srednje založenosti in ciljnega srednjega pretočnega časa delovnih sistemov, ciljne srednje založenosti in ciljnega srednjega pretočnega časa izvedbe vseh naročil na posameznem delovnem sistemu ter ciljnega srednjega stanja, ciljne srednje založenosti in ciljnega srednjega pretočnega časa izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih orodjarne.

Za delovne sisteme, na katerih je bilo ugotovljeno relativno dejansko srednje stanje naročil  $(Im,r_j)_{act} > 180\%$ , smo izračunali ciljno srednjo

Step 5: Definition of the relative target mean inventory and the target mean inventory of the orders and drawing the production-characteristic diagrams of the working systems in the tool-production department

The Diagram software was used to define the relative target mean inventory  $(Im,r_j)_{tar}$  and the target mean inventory  $(Im_j)_{tar}$  and to draw the production characteristics diagram for each working system.

Figure 8 presents the results of calculating  $(Im,r_j)_{tar}$  and  $(Im_j)_{tar}$  and drawing the production characteristic diagram for the "Milling machine ALG 200".

Steps 6, 7 and 8: Calculation of the target mean range and the target mean lead time of working systems, the target mean range and the target mean lead time for processing all orders in a particular working system; as well as the target mean range and the target mean lead time for processing all orders in all working systems of the tool-production department.

For working systems where the relative actual mean inventory of orders of  $(Im,r_j)_{act} > 180\%$  was established the target mean range  $(Rm_j)_{tar}$  was

Preglednica 2. Rezultati izračuna  $(Im)_{act}$ ,  $(Rm)_{act}$  in  $(Tlm)_{act}$   
 Table 2. Results of calculating  $(Im)_{act}$ ,  $(Rm)_{act}$  and  $(Tlm)_{act}$

Delovni sistem / Working system WC <sub>j</sub>	Število naročil / Number of orders n <sub>j</sub>	Dejansko srednje stanje naročil / Actual mean inventory (Im <sub>j</sub> ) <sub>act</sub> Nh	Dejanska srednja založenost Dd Actual mean range Wd (Rm <sub>j</sub> ) <sub>act</sub>	Dejanski srednji pretočni čas Dd Actual mean lead time Wd (Tlm <sub>j</sub> ) <sub>act</sub>	Dejanska srednja založenost izvedbe vseh naročil Dd Actual mean inventory of all orders Wd $(Rm_j)_{act}^* = (Rm_j)_{act} \cdot n_j$	Dejanska srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil Dd Actual mean lead time of all orders Wd $(Tlm_j)_{act}^* = (Tlm_j)_{act} \cdot n_j$
1	21	12,87	9,53	9,53	200,15	200,15
2	128	144,84	9,99	9,99	1278,46	1278,46
⋮						
17	159	48,45	6,06	6,06	963,37	963,37
⋮						
38	48	3,27	5,80	5,80	278,31	278,31
$Im_{act} = \sum_{j=1}^{38} (Im_j)_{act} =$		1335,19				
Dejanska srednja založenost izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih Actual mean range for processing all orders in all working systems			$Rm_{act} = \sum_{j=1}^{38} (Rm_j)_{act}^* =$		21253,66	
Dejanski srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih Actual mean lead time for processing all orders in all working systems			$Tlm_{act} = \sum_{j=1}^{38} (Tlm_j)_{act}^* =$		21253,66	

založenost  $(Rm_j)_{tar}$  po enačbi (25) ter ciljni srednji pretočni čas  $(Tlm_j)_{tar}$  po enačbi (28).

Za delovne sisteme, na katerih je bilo ugotovljeno, da je  $(Im,r)_{act} \leq 180\%$ , smo vzeli, da je:

$$\begin{aligned} (Rm_j)_{tar} &= (Rm_j)_{act} \\ (Tlm_j)_{tar} &= (Tlm_j)_{act} \end{aligned}$$

Ciljno srednjo založenost izvedbe vseh naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu smo izračunali po enačbi (34), ciljni srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na  $j$ -tem delovnem sistemu pa po enačbi (35).

Ciljno srednje stanje na vseh delovnih sistemih smo določili po enačbi (36), ciljno srednjo založenost izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih po enačbi (37) in ciljni srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih po enačbi (38).

Rezultati računanja so vidni v preglednici 3.

calculated using Equation (25), and the target mean lead time  $(Tlm_j)_{tar}$  using Equation (28).

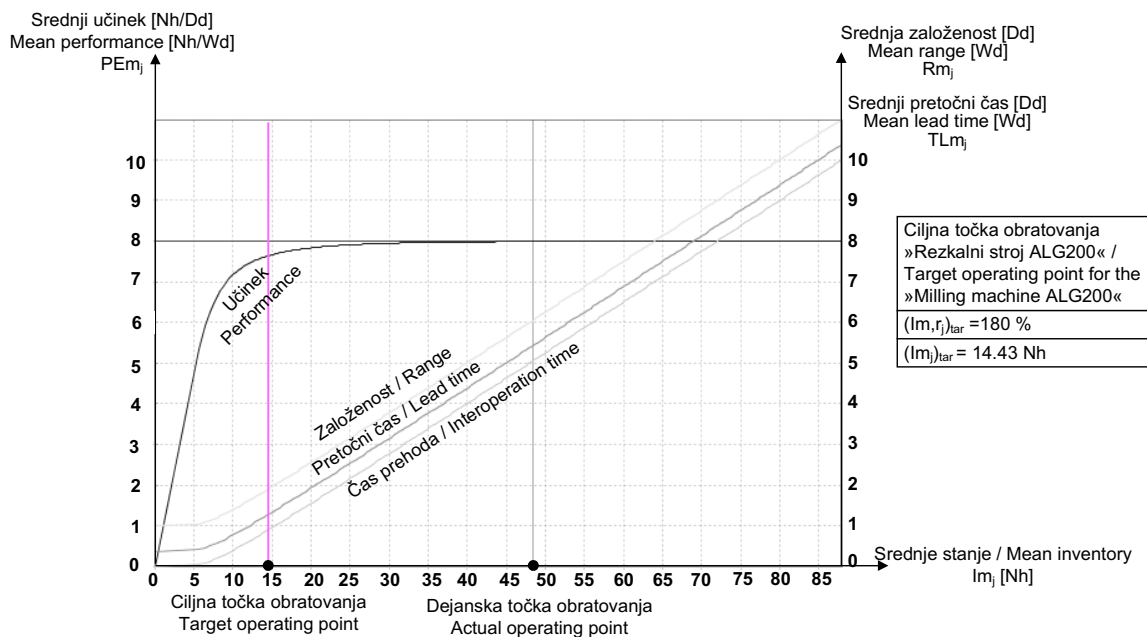
For the working systems where it was established that  $(Im,r)_{act} \leq 180\%$  it was supposed that:

The target mean range for processing all orders in the  $j$ -th working system was calculated using Equation (34), while the target mean lead time for processing all orders in the  $j$ -th working system was calculated using Equation (35).

The target mean inventory in all working systems was calculated using Equation (36), the target mean range for processing all orders in all working systems was calculated using Equation (37), and the target mean lead time for processing all orders in all working systems was calculated using Equation (38).

The results of the calculation are presented in Table 3.





Sl. 8. Rezultati izračuna ciljne točke obratovanja “rezkalni stroj ALG200” in konstruiranja diagrama proizvodnih karakteristik

Fig. 8. Results of calculating the target operating point and drawing the production characteristic diagram for the “Milling machine ALG200”

9. korak: Določitev skritih logističnih zmožnosti *j*-tega delovnega sistema orodjarne

Na podlagi rezultatov določanja dejanskega in ciljnega srednjega stanja, srednje založenosti in srednjega pretočnega časa izvedbe vseh naročil na *j*-tem delovnem sistemu lahko določimo skrite logistične zmožnosti *j*-tega delovnega sistema  $\Delta Im_j, \Delta Rm_j, \Delta TLM_j$  in to z uporabo enačb (39), (40) in (41).

Skrite logistične zmožnosti “rezkalnega stroja ALG200” (delovni sistem št. 17) so:

- skrite logistične zmožnosti srednjega stanja

$$\Delta Im_{17} = \frac{(Im_{17})_{act} - (Im_{17})_{tar}}{(Im_{17})_{act}} \cdot 100 = \frac{48,45 - 14,43}{48,45} \cdot 100 = 70,22\%$$

- skrite logistične zmožnosti srednje založenosti

$$\Delta Rm_{17} = \frac{(Rm_{17})_{act} - (Rm_{17})_{tar}}{(Rm_{17})_{act}} \cdot 100 = \frac{6,06 - 1,90}{6,06} \cdot 100 = 68,65\%$$

- skrite logistične zmožnosti srednjega pretočnega časa

$$\Delta TLM_{17} = \frac{(TLM_{17})_{act} - (TLM_{17})_{tar}}{(TLM_{17})_{act}} \cdot 100 = \frac{6,06 - 1,27}{6,06} \cdot 100 = 79,04\%$$

10. korak: Določitev skritih logističnih zmožnosti vseh delovnih sistemov orodjarne

Step 9: Calculation of the hidden logistic potentials of the *j*-th working system in the tool-production department

On the basis of the results defining the actual and target mean inventory, the mean range and the mean lead time for processing all orders in the *j*-th working system, the hidden logistic potentials of the *j*-th working system  $\Delta Im_j, \Delta Rm_j, \Delta TLM_j$  can be defined using Equations (39), (40) and (41).

The hidden logistic potentials of the “Milling machine ALG 200” (working system No. 17) are:

- hidden logistic potential of the mean inventory

- hidden logistic potential of the mean range

- hidden logistic potential of the mean lead time

Step 10: Calculation of the hidden logistic potentials of all working systems in the tool-production department

Preglednica 3. Rezultati izračuna  $(Im)_{tar}$ ,  $(Rm)_{tar}$  in  $(Tlm)_{tar}$   
 Table 3. Results of calculating  $(Im)_{tar}$ ,  $(Rm)_{tar}$  and  $(Tlm)_{tar}$

Delovni sistem / Working system WC <sub>j</sub>	Število naročil / Number of orders n <sub>j</sub>	Relativno dejansko stanje naročil / Relative actual mean inventory $(Im,r_j)_{act}$ %	Ciljno srednje stanje naročil / Target mean inventory $(Im_j)_{tar}$ Nh	Ciljna srednja založenost Dd / Target mean range Wd $(Rm_j)_{tar}$	Ciljni srednji pretočni čas Dd / Target mean lead time Wd $(Tlm_j)_{tar}$	Ciljna srednja založenost izvedbe vseh naročil, Dd / Target mean range of all orders Wd $(Rm_j)_{tar}^* = (Rm_j)_{tar} \cdot n_j$	Ciljni srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil, Dd / Target mean lead time of all orders Wd $(Tlm_j)_{tar}^* = (Tlm_j)_{tar} \cdot n_j$
1	21	270,35	8,57	1,13	1,01	23,67	21,30
2	128	1177,89	22,13	2,91	2,22	372,78	284,79
·							
·							
17	159	604,42	14,43	1,90	1,27	301,84	202,50
·							
·							
38	48	208,14	2,83	0,37	0,26	17,88	12,67
$Im_{tar} = \sum_{j=1}^{38} (Im_j)_{tar} =$			404,73				
Ciljna srednja založenost izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih / Target mean range for processing all orders in all working systems				$Rm_{tar} = \sum_{j=1}^{38} (Rm_j)_{tar}^* =$		6684,35	
Ciljni srednji pretočni čas izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih / Target mean lead time for processing all orders in all working systems					$Tlm_{tar} = \sum_{j=1}^{38} (Tlm_j)_{tar}^* =$		5237,34

Na podlagi rezultatov določanja dejanskega in ciljnega srednjega stanja, srednje založenosti in srednjega pretočnega časa izvedbe vseh naročil na vseh delovnih sistemih lahko določimo skrite logistične zmožnosti vseh delovnih sistemov orodjarne  $\Delta Im$ ,  $\Delta Rm$ ,  $\Delta Tlm$  in to z uporabo enačb (42), (43) in (44).

Skrite logistične zmožnosti vseh delovnih sistemov orodjarne so:

- skrite logistične zmožnosti srednjega stanja

$$\Delta Im = \frac{(Im)_{act} - (Im)_{tar}}{(Im)_{act}} \cdot 100 = \frac{1335,19 - 404,73}{1335,19} \cdot 100 = 69,69\%$$

- skrite logistične zmožnosti srednje založenosti

$$\Delta Rm = \frac{(Rm)_{act} - (Rm)_{tar}}{(Rm)_{act}} \cdot 100 = \frac{21253,66 - 6684,35}{21253,66} \cdot 100 = 68,55\%$$

- skrite logistične zmožnosti srednjega pretočnega časa

$$\Delta Tlm = \frac{(Tlm)_{act} - (Tlm)_{tar}}{(Tlm)_{act}} \cdot 100 = \frac{21253,66 - 5237,34}{21253,66} \cdot 100 = 75,36\%$$

Skrite logistične zmožnosti delovnih sistemov orodjarne povedo, da bi bilo mogoče v orodjarni s

On the basis of the results defining the actual and target mean inventory, the mean range and the mean lead time for processing all orders in all working systems, the hidden logistic potentials of all working systems in a tool-production department  $\Delta Im$ ,  $\Delta Rm$ ,  $\Delta Tlm$  can be defined using Equations (42), (43) and (44).

The hidden logistic potentials of all working systems in a tool-production department are:

- hidden logistic potentials of the mean inventory

- hidden logistic potentials of the mean range

- hidden logistic potentials of the mean lead time

The hidden logistic potentials of working systems in the tool-production department reveal that by a

prehodom iz dejanskih na ciljne točke obratovanja delovnih sistemov doseči 69,69% znižanje srednjega stanja naročil, 68,55% zmanjšanje srednje založenosti delovnih sistemov in 75,36% skrajšanje srednjega pretočnega časa delovnih sistemov.

*11. korak: Izbira ukrepov za izkoriščanje skritih logističnih zmožnosti delovnih sistemov orodjarne*

Če je na delovnem mestu ugotovljeno relativno dejansko srednje stanje naročil večje od relativnega ciljnega srednjega stanja  $(Im, r_j)_{act} > (Im, r_j)_{tar}$ ,

potem je mogoče izkoristiti skrite logistične zmožnosti delovnega sistema z ukrepom časovno omejenega povečanja zmogljivosti ali časovnega zadrževanja prihoda naročil ali časovno oziroma krajevno premaknitvijo dela obremenitve delovnega sistema na tehnološko podoben sistem.

Če pa je na delovnem sistemu ugotovljeno, da je relativno dejansko srednje stanje naročil manjše ali enako relativnemu ciljnemu srednjemu stanju  $(Im, r_j)_{act} \leq (Im, r_j)_{tar}$ ,

potem je treba z ukrepom harmonizacije časov za naročila ali skrčenje časov za naročila ali skrčenje časov prehoda, odkriti nove logistične zmožnosti delovnega sistema.

Rezultati skupinskega izbire ukrepov za izkoriščanje skritih logističnih zmožnosti delovnih sistemov orodjarne oziroma ukrepov za odkritje novih logističnih zmožnosti delovnih sistemov so vidni v preglednici 4.

#### 4 SKLEP

Vse večje domače in mednarodno tekmovanje podjetij ter prehod od trga prodajalcev k trgu kupcev zahteva od podjetij neprekinjeno povečevanje gospodarnosti, ki pa je v veliki meri odvisna od stanja naročil, založenosti in pretočnih časov delovnih sistemov podjetja [6].

V prispevku predlagamo postopek ugotavljanja in izkoriščanja skritih logističnih zmožnosti delovnih sistemov podjetja, do katerih je mogoče priti edino le z izvedbo nenehnega nadzora stanja naročil ter založenosti in pretočnih časov delovnih sistemov. Izvedba nadzora omogoča nepretrgano spremljanje dejanskih in ciljnih vrednosti stanja, založenosti in pretočnih časov delovnih sistemov in na temelju ugotovljenih odstopanj uvedbo primernih ukrepov za približevanje ciljnim vrednostim. Šele takrat, ko so skrite

transition from the actual to the target operating points of working systems it would be possible to reduce the mean inventory of orders by 69.69 %, to reduce mean range of the working systems by 68.55 %, and to reduce the mean lead time of the working systems by 75.36 %.

*Step 11: Selection of the measures for exploiting the hidden logistic potentials of working systems in the tool-production department*

If it was found in a particular working system that the relative actual mean inventory of orders is larger than the target mean inventory  $(Im, r_j)_{act} > (Im, r_j)_{tar}$ ,

then it is possible to exploit the hidden logistic potentials of the working system either by temporarily increasing the capacities of the working system, or by temporarily stopping the arrival of orders, or by a time- or space transfer of a part of a working-system load to a system of similar technology.

If it was found in a particular working system that the relative actual mean inventory of orders is less than or equal to the target mean inventory  $(Im, r_j)_{act} \leq (Im, r_j)_{tar}$ ,

then it is necessary (by harmonizing or reducing the order times or by reducing the interoperation times) to find new logistic potentials of the working system.

The results of selected measures for exploiting the hidden logistic potentials of working systems in the tool-production department and measures for finding new logistic potentials of working systems are presented in Table 4.

#### 4 CONCLUSION

Because of the increasing domestic and international competition between companies, and the transition from a market of sellers to a market of customers, companies have to become more economic, which largely depends on the inventory of orders, and the range and lead times of the companies' working systems [6].

This paper proposes a procedure for finding and exploiting the hidden logistic potentials of working systems in a company; these can be found only by continuously monitoring the inventory of orders, and the range and lead times of the working systems. Controlling allows for a continuous monitoring of the actual values of the inventory, the range and the lead times of working systems. If these values deviate from the target values, measures can be taken in order to bring the actual values closer to the

Preglednica 4. *Ukrepi za izkoriščanje skritih in odkrivanje novih logističnih zmožnosti delovnih sistemov orodjarne*

Table 4. *Measures for exploiting the hidden (and finding new) logistic potentials of working systems in the tool-production department*

Delovni sistem / Working system WC <sub>j</sub>	Relativno dejansko srednje stanje naročil / Relative actual mean inventory (Im,r <sub>j</sub> ) <sub>act</sub> %	(Im,r <sub>j</sub> ) <sub>act</sub> > 180 %			(Im,r <sub>j</sub> ) <sub>act</sub> ≤ 180 %					
		časovno omejeno povečanje kapacitet / increasing capacities for a limited time frame	časovno zadrževanje prihoda naročil / stopping the arrival of orders	časovna/lokacijska premaknitev dela obremenitve / transferring (in time or space) a part of the working system's load	Variacijski koeficient / Coefficient of variation μ <sub>TO</sub>	srednji čas za naročilo Dd Mean order time Wd T <sub>Om<sub>j</sub></sub>	srednji čas prehoda Dd Mean interoperation time Wd T <sub>IOm<sub>j</sub></sub>	μ <sub>TO</sub> > 1 harmonizacija časov za naročilo / harmonization of order times	μ <sub>TO</sub> ≤ 1 redukcija časov za naročilo / reduction of order times	T <sub>Om<sub>j</sub></sub> < T <sub>IOm<sub>j</sub></sub> redukcija časa prehoda / reduction of the interoperation times
1	270,25	x								
2	1177,89	x	x							
·										
17	604,42	x	x	x						
·										
29	54,99				1,24	1,14	1,69	x		
·										
38	208,14	x								

logistične zmožnosti delovnih sistemov izčrpane, je treba, z dodatnim ukrepom harmonizacije časov za naročila ali skrčenje časov prehoda ali izdelave s prekrivanjem ali povečevanjem prilagodljivosti delovnih sistemov, odstraniti pregrade, ki ovirajo nadaljnje skrčenje srednjega stanja, srednje založenosti in srednjega pretočnega časa delovnih sistemov.

Izvedeni preizkus ugotavljanja in izkoriščanja skritih logističnih zmožnosti delovnih sistemov enote ORODJARNA družbe ETI d.d. Izlake je pokazal, da v orodjarni obstajajo znatne skrite logistične zmožnosti delovnih sistemov, ki jih bo treba v prihodnosti z izvedbo predlaganih ukrepov čim bolj izkoristiti.

target ones. Only after the hidden logistic potentials of working systems have been exhausted is it necessary to remove the barriers (by additional harmonization of the order times, or by a reduction of the interoperation times, or manufacturing by overlapping, or increasing the flexibility of working systems) that prevent a further reduction of the mean inventory, the range and the lead time of working systems.

A case study of finding and exploiting the hidden logistic potentials of working systems in the tool-production department of the ETI Ltd. company from Izlake has shown that there are considerable logistic potentials that should be exploited in future by the realization of the suggested measures.

5 LITERATURA  
5 REFERENCES

[1] Wiendahl, H.P. (1995) Lead-oriented manufacturing control, *Springer, Verlag*, Berlin, 41-199.  
[2] Starbek, M., J. Grum (2000) Operation lead time control, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 16, 443-450.

- [3] Starbek, M., J. Grum (2001) Control of the state of orders on machines, *Comoputers & Industrial Engineering* 40, 35-49.
- [4] Kušar, J., A. Brezovar, J. Grum, M. Starbek (2004) Realistic lead time scheduling of operations of orders *Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, 1037-1046.
- [5] Nyhuis, P., H.P. Wiendahl (1999) Logistische Kennlinien, *Springer Verlag Berlin*, 81-94.
- [6] Starbek, M., D. Menart (2000) The optimization of material flow in production, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, 1299-1310.
- [7] Baker, K. R. (1974) Introduction to sequencing and scheduling, *J. Wiley & Sons Inc.*, New York.
- [8] Sule, D. R. (1997) Industrial scheduling, *PWS Publishing company*, Boston.
- [9] Sayed, A. E, O.T. Boucher (1994) Analysis and control of production systems, *Prentice Hall, Englewood Cliffs*, New Jersey, 202-229

Naslov avtorjev: dr. Janez Kušar  
mag. Tomaž Berlec  
prof. dr. Jože Duhovnik  
prof. dr. Janez Grum  
prof. dr. Marko Starbek  
Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana  
janez.kusar@fs.uni-lj.si  
tomaz.berlec@fs.uni-lj.si  
joze.duhovnik@fs.uni-lj.si  
janez.grum@fs.uni-lj.si  
marko.starbek@fs.uni-lj.si

Authors' Address: Dr. Janez Kušar  
Mag. Tomaž Berlec  
Prof. Dr. Jože Duhovnik  
Prof. Dr. Janez Grum  
Prof. Dr. Marko Starbek  
University of Ljubljana  
Faculty of mech. eng.  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana, Slovenia  
janez.kusar@fs.uni-lj.si  
tomaz.berlec@fs.uni-lj.si  
joze.duhovnik@fs.uni-lj.si  
janez.grum@fs.uni-lj.si  
marko.starbek@fs.uni-lj.si

Prejeto: 14.9.2004  
Received:

Sprejeto: 25.5.2005  
Accepted:

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



## Nova metoda za določevanje krivulje mejnih deformacij v digitalnem okolju

### An Improved Method for Determining a Forming Limit Diagram in the Digital Environment

Aleš Petek - Tomaž Pepelnjak - Karl Kuzman

*Deformacijske meje pločevine, opredeljene z lokalizacijo in trganjem materiala, so pomemben parameter pri analizi preoblikovalnih postopkov. Meje dopustnih deformacij pločevine pri različnih deformacijskih stanjih najbolje prikažemo v diagramu mejnih deformacij. Za preizkusno določitev diagrama so potrebni obsežni in dragi preizkusi. Alternativna metoda za določitev krivulje mejnih deformacij (KMD) je analiza trganja materiala z numeričnimi simulacijami.*

*V prispevku je predstavljena metoda določevanja krivulje mejnih deformacij za celotno področje. Z uporabo programskega paketa ABAQUS je bila izvedena simulacija MKE po Marciniaku preizkusa vroče cinkane jeklene pločevine. Opisan je kriterij za določitev KMD z numerično simulacijo in na koncu še primerjava numerično in preizkusno dobljene KMD.*

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: preoblikovanje pločevine, krivulje mejnih deformacij, metode končnih elementov, simuliranje numerično)**

*The deformation limits of sheet metals, which are determined with localization and fracture, represent an important parameter for the analyses of sheet-metal forming processes. The forming limits of sheet metal are represented by a forming limit diagram (FLD), which shows the various deformation states. For an experimental determination of a FLD extensive and expensive tests are necessary. An alternative method for determining the forming limit curve (FLC) is an analysis performed using numerical simulations.*

*This paper introduces a method for determining the forming limit curve for the whole range of the FLD for sheet metal. A simulation of the Marciniak test with the finite element method (FEM) was performed for hot-galvanized steel using the ABAQUS program. The criterion for determining the FLD with a numerical simulation is presented. Finally, the numerically obtained forming limit curve is compared with an experimental curve.*

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: sheet metal forming, forming limit curves, finite element methods, numerical simulations)**

#### 0 UVOD

Krivulja mejnih deformacij (KMD) pločevine predstavlja mejo, do katere lahko določen material preoblikujemo – deformiramo, ne da bi pri tem prišlo do porušitve. Opredelimo jo v odvisnosti od dveh glavnih plastičnih deformacij  $\varphi_1$  (večja na ravnini pločevine) in  $\varphi_2$  (manjša na ravnini pločevine), kakor prikazuje slika 1.

V industrijski praksi nas velikokrat zanima, kako bo potekal preoblikovalni postopek, kje so kritična področja – možnost porušitev in napak.

#### 0 INTRODUCTION

The forming limit curve (FLC) for sheet metal indicates the point to which a material can be formed before cracks occur on the specimen. The curve is defined as a correlation between the first principal strain  $\varphi_1$ , which is major in the plane of the sheet metal, and the second principal strain  $\varphi_2$ , which is minor in the plane of the sheet metal (Figure 1).

In industrial practice it is often important how the forming process is performed; it is necessary to define where the critical areas of necking and

Zaradi prihranka časa in stroškov je nujno potrebno analizirati tehnologijo preoblikovanja še preden izdelamo orodja in izvedemo preizkuse. V ta namen se v zadnjem času vse bolj uporabljajo sodobne numerične simulacije, ki v t. i. "računalniškem okolju" prikažejo potek preoblikovalnega postopka. Če ugotovimo, do katere meje lahko preoblikujemo določen izdelek, lahko postopek optimiramo, s tem prihranimo čas, znižamo stroške in izboljšamo kakovost.

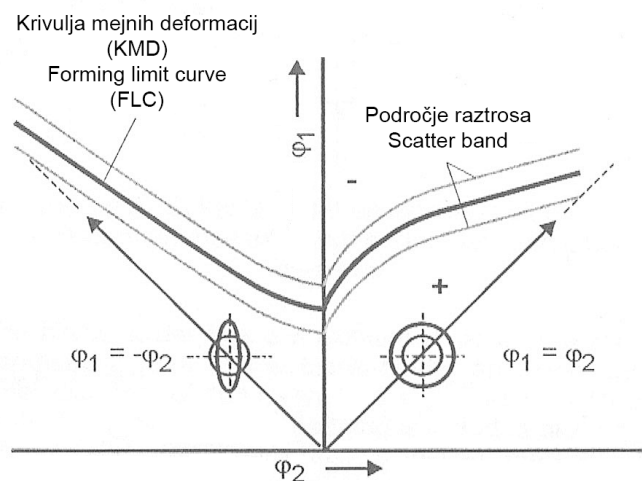
Začetek analize mejne deformacije izhaja iz leta 1940. Prvi diagram, ki je bil podoben tipičnemu diagramu mejnih deformacij (DMD), je objavil Gansamer leta 1946, kot opisujeta Geiger in Merklein [1]. Leta 1965 je Keeler [2] razvil zasnovano DMD, kakor je poznana dandanes. Keeler je s preizkusi ugotovil, da je krivuljo mejne deformabilnosti za pločevino mogoče prikazati v koordinatnem sistemu dveh glavnih deformacij, vendar le za področje  $\varphi_2 > 0$ . Ob koncu 60. let je to zamisel razširil Goodwin [3], ki je dopolnil diagram za območje  $\varphi_2 < 0$ . Zadnjih 40 let je diagram mejnih deformacij vzbudil pomemben vtis na raziskovalne ustanove in industrijo predvsem pri vprašanju, kako določiti največje deformacije pri katerih še ne bo prišlo do porušitve materiala med preoblikovanjem. Zaradi povečane uporabe numeričnih simulacij pločevinskih postopkov, ki so posledica razvoja zmogljivejših računalniških sistemov, je bil razvoj na področju KMD še bolj pospešen.

Razvoj določevanja KMD je usmerjen v tri glavna področja: teoretično, preizkusno in numerično določevanje.

fracture are. The forming technology can be analysed before the tool is manufactured, which leads to savings in costs and time. For this purpose numerical simulations have recently been used to show the course of the forming process in a 'digital environment'. If the forming limit for a particular product is known the process can be optimized. In this way time is saved, costs are reduced and the quality of products is improved.

The analysis of forming limits began in the 1940s. The first diagram, which was similar to the typical FLD, was published by Gansamer in 1946, as was described by Geiger and Merklein [1]. In 1965 Keeler [2] developed the concept of the nowadays known FLD. By using experiments Keeler realised that it was possible to show a FLC for a sheet metal in a coordinate system of two main strains, but only for the right-hand side of the contemporary known FLD ( $\varphi_2 > 0$ ). This idea was extended by Goodwin [3] at the end of the 1960s when the diagram was completed for left-hand side with deformations of  $\varphi_2 < 0$ . Over the past 40 years, the concept of the forming limit diagram has created a significant impact in both academia and industry on how we determine the maximum deformation that a material can withstand, without necking or tearing, during a sheet metal process. Since the enhanced use of numerical simulations in the sheet metal forming stimulated due to the immense increase in computer power, the necessity on research work in the field of FLD has also intensified.

The development of determining FLDs is oriented in three main fields: theoretical, experimental and numerical determination.



Sl. 1. Diagram mejnih deformacij (Hašek) [1]  
Fig. 1. Forming limit diagram (according to Hašek) [1]

Po razvoju zamisli diagrama (Keeler [2], Goodwin [3]) se je raziskovanje preoblikovalnosti materiala usmerilo predvsem na razvoj matematičnih modelov za teoretično določevanje krivulje mejnih deformacij. Prva, ki sta predlagala kriterij lokalizacije na tanki pločevini za ravninsko napetostno stanje, sta bila Hill [4] in Swift [5]. Njuna analiza napove lokalizirano plastično deformacijo v področju  $\varphi_2 < 0$ , pri čemer je model temeljil na homogenih lastnostih pločevine. Prvi matematični model za teoretično določevanje krivulje, ki temelji na nehomogeni pločevini z vidika geometrije in sestave, sta razvila Marciniak in Kuzinsky, in je danes bolj poznan kot model M-K [6]. Eden najboljših teoretičnih modelov, ki se zelo dobro ujema s preizkusnimi podatki, je na konferenci IDDRG predstavil Cayssials leta 1998 [7]. Zaradi velike natančnosti se Cayssials model uporablja v sodobnih računalniških programih za analizo preoblikovanja pločevine v digitalnem okolju.

Zgoraj omenjeni teoretični modeli so zelo zapleteni in zahtevajo temeljito predznanje mehanike in matematike. Izračunane KMD žal niso vedno primerljive z preizkusnimi rezultati, zato so v zadnjih letih razvili tudi delno empirične modele. Prvi avtor delno empiričnega modela je bil Keeler.

Potreba po zmanjšanju obsežnega analitičnega izračunavanja in možnosti hitrega določevanja KMD tudi v industrijskem okolju je privedla do proučevanja natančnosti in učinkovitosti opredelitve krivulj mejnih deformacij s preizkusi [8]. Za določitev različnih deformacijskih stanj so bile med preoblikovalnim postopkom zahtevane različne geometrijske oblike orodja. Predstavljene so bile posebne metode za določitev različnih napetostnih stanj z eno geometrijsko obliko orodja in različno oblikovanimi preizkušanci.

Prvo široko uporabljeno metodo je leta 1971 predlagal Nakazima [9], ki je za določitev vseh deformacijskih stanj na DMD uporabljal eno orodje. Uporabljeno je bilo preoblikovalno orodje, sestavljeno iz polkrožnega pestiča, matrice in držala. Za določitev različnih deformacijskih stanj so uporabljeni pravokotni preizkušanci različnih širin. Slaba stran te metode je merjenje deformacij na polkrožnem preizkušancu, za kar sta potrebni najmanj dve kameri.

Leta 1973 je Marciniak [10] predstavil podobno metodo za določevanje KMD (sl. 2). V nasprotju s prejšnjo metodo ostaja pri Marciniakovem preizkusu analizirano področje med

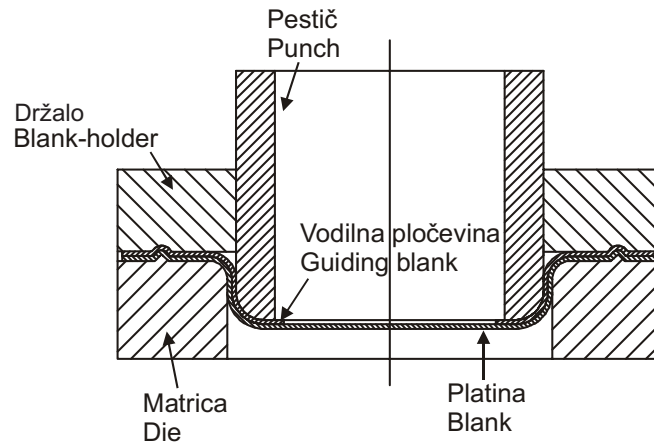
After the evolution of the concept of FLDs (Keeler [2], Goodwin [3]), the research on material formability was focused mainly on the development of mathematical models for theoretical determination of FLDs. Hill [4] and Swift [5] were the first to propose a general criterion for localized necking in thin sheets under a plane stress state. Their analyses predicted localized plastic deformation in the negative minor strain region ( $\varphi_2 < 0$ ). The model assumed homogeneity of the sheet metal. Marciniak and Kuzinsky have proposed the first realistic mathematical model for a theoretical determination of FLDs taking into account the non-homogeneous material behaviour of the analysed sheet metals from the geometrical and structural points of view. This model is nowadays known as the M-K model [6]. One of the best theoretical model, which fits to the experimental data, was introduced by Cayssials at the IDDRG conference in 1998 [7]. Because of its high precision the majority of computer programs use the Cayssials model for sheet-metal analyses in the digital environment.

The above-mentioned theoretical models are rather complex and need a profound knowledge of the continuum mechanism and mathematics. Theoretically calculated FLCs are not always in agreement with the experimental data. Therefore, some semi-empirical models have been developed. The first author of a semi-empirical model was Keeler.

The necessity to reduce the extensive analytical calculations and the possibility of a fast determination of the FLC in the industrial environment led to a study of the precision and efficiency of definition of the FLC with experiments [8]. To obtain various strain states during the forming process dissimilar tool geometries are required. Special methods for determining different stress states with only one tool geometry and various shaped tests are proposed.

The first widely applied method was introduced by Nakazima in 1971 [9]. He used a single tool to determine all the strain states of the FLD. The tool composed of a hemispherical punch, a die and a blank holder. Rectangular test pieces with various widths for a definition different deformation states are used. The drawback of this method is the necessity for at least two cameras for strain measurements on the hemispherical test piece.

A similar method for determining FLCs (Figure 2) was introduced by Marciniak in 1973 [10]. In contrast to Nakazima method the investigated region in the Marciniak test remains flat during the experiment.



Sl. 2. Orodje Marciniak metode  
Fig. 2. Tool for the Marciniak method

preoblikovanjem ravno. Merjenje deformacij lahko, zaradi 2D - problema, izvedemo z eno kamero, kar je bistvena prednost te metode. Zaradi možnosti nastanka porušitve preizkušanca na polmeru pestiča uporabljamo vodilni obroč, ki takšno trganje prepreči. Uspešnost metode je odvisna od natančne geometrijske oblike vodilnega obroča in trenja med preizkušancem in vodilno pločevino.

Za analizo deformacij pločevine potrebujemo pri obeh metodah na površini analiziranega preizkušanca natisnjeno mrežo. Deformacija mreže je bila včasih merjena s posebnimi mikroskopi, medtem ko se v novjšem času uporabljajo optični merilni sistemi s CCD kamerami.

Geiger in Merklein sta na vsakoletnem srečanju CIRP leta 2003 predstavila zanimivo zamisel o povezavi med lokalizacijo in gradientom glavne deformacije [1] pri Nakazima metodi.

Poleg zgoraj omenjenih metod določevanja KMD je bilo v zadnjih desetih letih predstavljenih še veliko drugih metod, kakor so enoosni natezni preizkus, s katerim lahko določimo KMD le za področje  $\varphi_2 < 0$ , hidravlični izbočitveni test, Keeler test, Hecker test, Hašek test in druge [11].

V zadnjih letih se zaradi potrebe po zmanjšanju stroškov in številu preizkusov za določevanje KMD vse več uporabljajo simulacije MKE. Brun [12] predstavlja zamisel o analizi lokalizacije z drugim odvodom debeline po času z Nakazima metodo, medtem ko Ozturk analizira trganje materiala s kriterijem žilave porušitve na isti preizkusni metodi [13].

Področje lokalizacije in kasneje zloma na preizkušancu je z uporabo numerične simulacije težko

Therefore, because this case is a 2D-application, strains can be measured with only one camera, an important advantage of this method. Due to the danger of fracture, which can appear outside the observed specimen area, a guiding blank is used. This prevents such a failure. The effectiveness of this method depends on the geometrical precision of the guiding blank and the friction between the test piece and the guiding blank.

The deformation analysis in both methods requires a grid system printed on sheet-metal surface. Originally, the deformed grids were measured with special microscopes, but nowadays optical measuring systems with CCD cameras are used.

At the annual CIRP meeting in 2003 an idea about the correlation between the materials' necking and the gradient of major strain versus time during the Nakazima method was presented by Geiger and Merklein [1].

In addition to the above-mentioned methods for determining the FLC, many other methods were introduced in the past ten years, e.g., the uniaxial tensile test, which defines only the left part of the FLD ( $\varphi_2 < 0$ ); the hydraulic bulge test; the Keeler test; the Hecker test; and the Hašek test [11].

In recent years demands on cost reduction and decreased number of tests necessary for definition of the FLC have intensified the use of finite-element simulations. Brun [12] introduced the idea that the onset of necking can be predicted by the second time derivative of thinning by the Nakazima method, whereas Ozturk analysed the material failure using the ductile fracture criteria applied in the same test [13].

The onset of necking and the subsequent fracture of the specimen are hard to predict with



napovedati. V prispevku je predstavljen inovativen postopek o iskanju kriterija za rešitev zgoraj omenjenega problema.

Različna deformacijska stanja v pločevini dosežemo z različnimi preizkusi. V praksi želimo uporabiti čim manj preizkusnih orodij, zato želimo KMD izdelati s preizkusi, pri katerih se spreminja oblika preizkušanca in ne oblika orodja. Iz omenjenega razloga smo tako pri preizkusnem, kakor pri numeričnem določanju KMD uporabili Marciniakov izbočitveni preizkus.

Tipični popis diagrama mejnih deformacij se izvede s štirimi različnimi deformacijskimi stanji (globoki vlek, natezni preizkus, enoosno deformacijsko stanje in enakomerno izbočevanje), pri katerih v dani pločevini povzročimo lokalno stisnjenje in nato porušitev materiala. Pojav začetka lokalnega stisnjenja se šteje kot indikator porušitve preoblikovalnega postopka za pločevino. V tem trenutku se na kritičnem območju preizkušanca pojavijo deformacije, ki definirajo točke krivulje mejnih deformacij na diagramu  $\varphi_1$  v odvisnosti od  $\varphi_2$ . Deformacijo na mestu porušitve pri preizkušanju izmerimo z uporabo grafometrične analize ([8] in [14]). Analiza temelji na ugotavljanju velikosti in smeri deformacij na posameznem območju pločevine na osnovi spremembe koordinatne merilne mreže, ki jo pred preoblikovanjem nanese na preizkušanelec. Pri numeričnem določanju pa deformacijo na mestu porušitve določimo z uporabo algoritma, opisane v tem prispevku.

## 1 OPIS NUMERIČNEGA MODELA

Model za simulacijo Marciniakovega preizkusa je sestavljen iz togih delov orodja, kakor so valjasto oblikovan pestič z ravnim poglobljenim čelom, zgornja plošča (držalo) in spodaj odprta matrika z zavorno letvijo in deformljivih delov, kakršna sta preizkušanelec in vodilni obroč (sl. 3). Pri Marciniakovi metodi uporabljamo že omenjen vodilni obroč, prikazan na sliki 3, ki preprečuje nastanek največjih deformacij preizkušanca v bližini polmera pestiča. Ta obroč se deformira skupaj s preizkušancem, pri čemer premesti deformacije preizkušanca iz polmera pestiča na ravno površino pod pestičem. Geometrijska oblika orodja je bila izbrana glede na objave tujih raziskav.

Marciniakov preizkus zahteva uporabo različnih geometrijskih oblik preizkušancev za določitev različnih deformacijskih stanj in napetosti. Simulacijski postopek je potekal na sedmih

numerical simulations. This paper presents an innovative approach to finding alternative criteria to solve the above-described problem.

Different strain states in sheet metal are reached with various tests. In practice it is desirable to minimise the number of used forming tools. We want to define the FLC using tests where the specimens' shapes change and the tool geometry remains unchanged. For this reason the Marciniak test was selected for the experimental as well as for the numerical determination of the FLC.

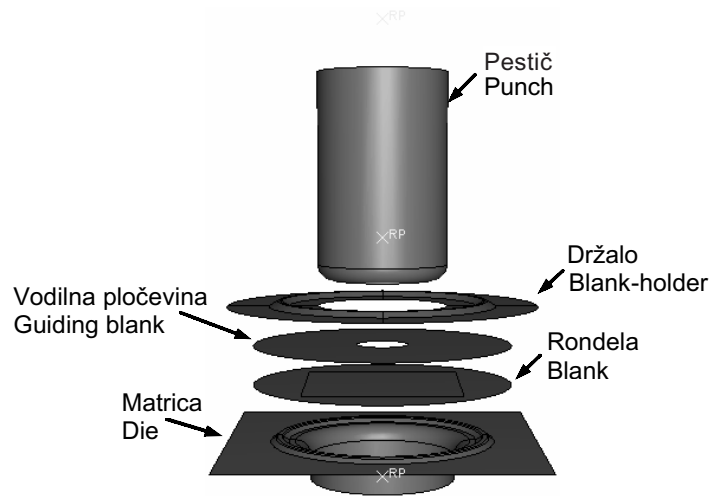
A typical description of the FLD is executed with four characteristic deformation states (deep drawing, uniaxial tension, uniform tension and biaxial balanced stretch forming), by which the localization and the subsequent material fracture in the sheet metal is caused. The onset of necking is considered as a fracture indicator of the forming process for sheet metal. At this point limit strains on the critical area of the specimen appear, which define the points for the limit curve on the diagram  $\varphi_1$  versus  $\varphi_2$ . Deformation, where the fracture occurs, is measured using graphometric analyses ([8] and [14]). This analysis is based on size and direction investigation of the major strains of the particular sheet metal area by changing the coordinate measure grid, which is printed on the specimens before the forming process. However, with a numerical simulation the fracture strain is determined using the methodology described in this paper.

## 1 DESCRIPTION OF THE FINITE-ELEMENT MODEL

The finite-element model for the Marciniak test consists of rigid tool parts: a cylindrical punch with a flat bottom, a blank holder and a die with drawbead and deformable parts, like the specimen and the guiding blank (Figure 3). The guiding blank used in the Marciniak method, as shown in Figure 3, prevents the appearance of maximal strains in the vicinity of the punch radius. This blank is deformed together with the specimen and helps to reposition the critical strains from the punch radius to the flat surface under the punch. The tool geometry was chosen after consulting the publications from international research work.

The Marciniak test requires the application of various specimens' geometries for a determination of the different strain states and stresses. The simulation process was achieved with seven different





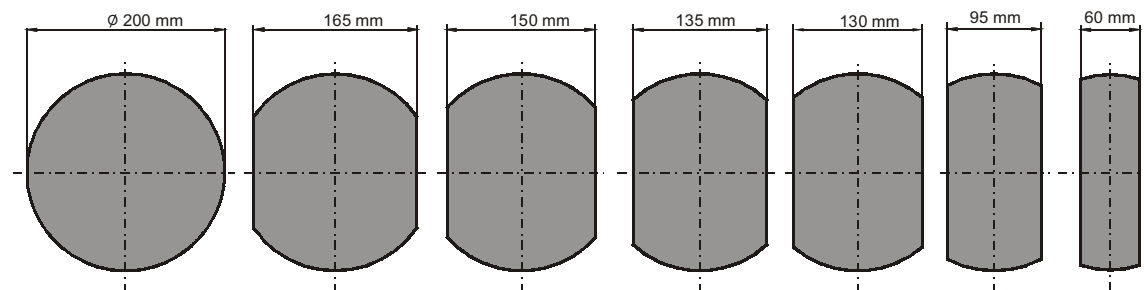
Sl. 3. Objekti simulacije Marciniak preizkusa  
Fig. 3. Finite element model of Marciniak test

preizkušancih različnih oblik (sl. 4). Prvi preizkušanec ima obliko kroga premera 200 mm (rondela), preostalih šest pa ima obliko traku (platina), ki je bil izrezan iz kroga s premerom 200 mm, s širinami 165 mm, 150 mm, 135 mm, 130 mm, 95 mm in 60 mm. Vsak od vzorcev pomeni na diagramu mejnih deformacij eno specifično deformacijsko pot. Za numerično simuliranje omenjenega preoblikovalnega postopka smo uporabili programski paket ABAQUS, ki temelji na metodi končnih elementov (MKE). Izbrali smo 3D lupinske elemente z več integracijskimi točkami po debelini lupine. Zaradi velikega števila objektov simulacije, ki so v medsebojnem kontaktu, smo se v izogib kontaktnim problemom pri implicitnem načinu računanja odločili za eksplicitni način računanja.

Mehanske lastnosti preizkušanca (vroče cinkana jeklena pločevina), ki jih potrebujemo za popis elasto-plastičnega obnašanja materiala, smo dobili z neprekinjenim enosnim nateznim preizkusom v Laboratoriju za preoblikovanje na Fakulteti za

specimen geometries (Figure 4). The first specimen is a blank with a 200 mm diameter; the other six are strip-shaped cut from the same blank with a diameter of 200 mm. The widths of the strips are 165 mm, 150 mm, 135 mm, 130 mm, 95 mm and 60 mm. Each sample corresponds to a specific strain path on the FLD. For the simulations of the Marciniak method, the commercially available finite-element program ABAQUS was used. Three-dimensional shell elements with five integration points across the thickness were selected. Due to the large number of simulation objects in contact, solver convergence problems can occur during the simulation. An explicit solver was selected to alleviate this problem.

The material properties of hot-galvanized low-carbon steel necessary to define the elasto-plastic material behaviour were obtained using a uniaxial tensile test in the Forming Laboratory of the Faculty of Mechanical Engineering in Ljubljana ([15] and [16]). The stress-strain curve was approximated



Sl. 4. Različne oblike preizkušancev  
Fig. 4. Different shapes of test pieces

Preglednica 1: Mehanske lastnosti vroče cinkane jeklene pločevine

Table 1: Material property of hot galvanized steel

$C = 719,2$ MPa	$E = 210$ GPa
$n = 0,153$	$\rho = 7850$ kg/m <sup>3</sup>
$r_0 = 0,948$	$\nu = 0,3$
$r_{45} = 0,793$	$t_0 = 0,64$ mm
$r_{90} = 1,003$	

pri čemer so:

$C$ .....konstanta utrjevanja materiala [MPa]  
 $n$ .....ekspONENT utrjevanja [1]  
 $r$ ..... koeficient normalne anizotropije [1]  
 $E$ .....modul elastičnosti [MPa]  
 $\rho$ .....gostota [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\nu$ .....Poissonovo število [1]  
 $t_0$ .....začetna debelina preizkušanca

where the parameters are:

$C$ .....strength coefficient [MPa]  
 $n$ .....strain hardening coefficient [1]  
 $r$ .....material anisotropy [1]  
 $E$ .....Young's modulus of elasticity [MPa]  
 $\rho$ .....density [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\nu$ .....Poisson's ratio [1]  
 $t_0$ .....initial specimen thickness

strojništvo v Ljubljani ([15] in [16]). Preračun približka krivulje plastičnosti smo izvedli po Hollomonovem potenčnem zakonu. Mehanske lastnosti so prikazane v preglednici 1.

Material je bil popisan z elasto-plastičnim snovnim zakonom. Upoštevali smo anizotropno obnašanje materiala, ki smo jo popisali s Hill-ovim kvadratičnim kriterijem tečenja. Menimo, da model MKE ni odvisen od hitrosti preoblikovanja. Simulacijski postopek je bil razdeljen na dva koraka. V prvem koraku se držalo giblje v smeri  $z$  in pritisne vodilno pločevino ter preizkušane ob matrico. Zob matrice deformira material in preprečuje drsenje preoblikovanca med držalom in matrico. Matrica in pestič ostajata v tem koraku nepremična. Sila držala je med celotnim postopkom simuliranja približno 150 kN. V drugem koraku preoblikovalnega postopka se pestič giblje v smeri  $z$ , dokler ne doseže zahtevane oddaljenosti.

Trenje med dotikalnimi površinami posameznih delov Marciniakovega modela je definirano s Coulombovim zakonom. Vrednosti koeficientov trenja  $\mu$  med posameznimi telesi simulacije v dotiku, dobljene iz preizkusov, so:

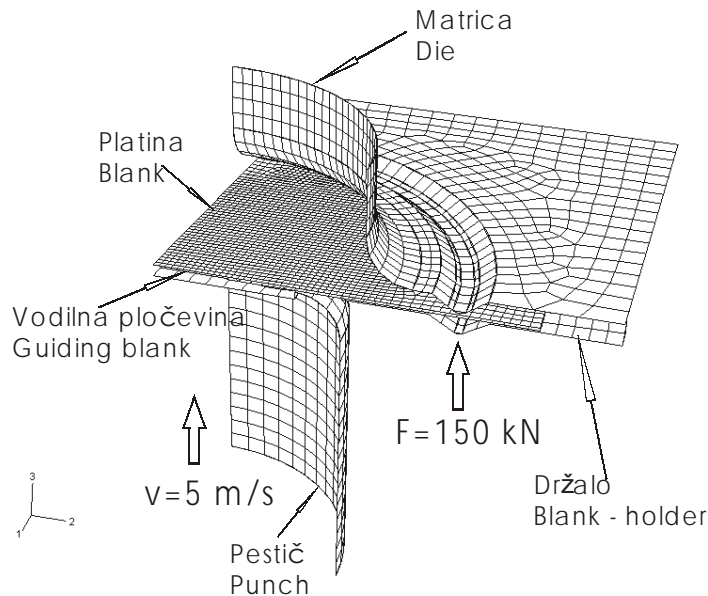
- pestič – vodilna pločevina:  $\mu = 0,08$ ,
- držalo – vodilna pločevina:  $\mu = 0,25$ ,
- vodilna pločevina – preizkušane:  $\mu = 0,3$ ,
- preizkušane – zob matrice:  $\mu = 0,25$ ,
- preizkušane – polmer matrice:  $\mu = 0,08$ .

by the Hollomon potential law. The material properties are shown in Table 1.

In the FE simulations the elasto-plastic material behaviour was modelled. The anisotropic material properties were considered, which were described with the Hill quadratic yield criterion. The model was assumed to be rate independent. The simulation processes were performed in two steps. In the first step the blank holder moves down in the 'z'-direction and presses the guiding blank and the sheet-metal specimen onto the die. The die drawbead deforms the material and prevents the specimen sliding between the blank holder and the die. The cylindrical punch and the die remain fixed in this step. The blank-holder force is approximately 150 kN during the whole simulation process. In the second simulation step the punch moves with a constant speed in 'z'-direction until the prescribed displacements are achieved.

The contact interaction between the surfaces in the FE model is defined with the Coulomb friction law. The friction coefficients,  $\mu$ , among the simulation objects in contact have the following values, obtained from the experiments:

- Punch – guiding blank:  $\mu = 0,08$ ,
- Blank holder – guiding blank:  $\mu = 0,25$ ,
- Guiding blank – blank:  $\mu = 0,3$ ,
- Blank – die drawbead:  $\mu = 0,25$ ,
- Blank – die radius:  $\mu = 0,08$ .



Sl. 5. Model končnih elementov (1/4)  
 Fig. 5. Finite element model (1/4)

Mreža in robni pogoji MKE Marciniakovega modela so prikazani na sliki 5. Posebno pozornost smo posvetili mreži preizkušanca. Zaradi pričakovanega nastanka lokalizacije oziroma zloma preizkušanca v področju pod pestičem, to področje omrežimo na zelo majhne kvadratne elemente mreže velikosti  $1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$ . S tem zmanjšamo vpliv velikosti in oblike mreže na natančnost numerično dobljene KMD [17], medtem ko se čas računanja numerične simulacije poveča. Velikost pravokotnega področja je pri preizkušancih, širših od 120 mm, veliko  $120 \times 120 \text{ mm}^2$ . Pri ožjih preizkušancih pa se to področje primerno zoži.

## 2 OPIS KRITERIJA ZA DOLOČEVANJE KMD

Pri analizi KMD preiskujemo nastanek lokalizacije oziroma porušitve na preizkušancu med postopkom preoblikovanja. Določiti je potrebno območje ter čas nastanka lokalizacije in kasnejše porušitve. Zamisel o kriteriju za določevanje KMD z numerično simulacijo smo dobili iz teoretičnega modela Marciniaka–Kuckzinskega (M-K), ki temelji na določevanju lokalizacije na področju vnesene geometrijske napake. Kratek opis modela M-K je predstavljen v naslednjem poglavju. Prav tako je bila koristno uporabljena Geigerjeva gradientna metoda

The mesh and boundary condition of the Marciniak finite-element method are presented as one quarter of the entire model - Figure 5. Special attention was given to the specimen's mesh. Due to the expectation of localized necking and sample fracture under the punch this area was meshed with a very small squared mesh with a size of  $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ . Implementing a so small grid size, the influence of the mesh size and its shape on the accuracy of the numerically obtained FLC [17] decreases; however, the calculation time of the numerical simulation increases. Specimens wider than 120 mm have a mapped mesh area of  $120 \times 120 \text{ mm}^2$ . When using narrow specimens this area is correspondingly narrower.

## 2 METHODOLOGY DESCRIPTION FOR DETERMINATION OF THE FLC

The onset of necking or fracture of the formed specimen is investigated when the numerical FLC is analysed. The time and area of the onset of necking and subsequent fracture is defined. Several ideas about the criterion for the determination of the numerical FLC are obtained from the theoretical Marciniak–Kuckzinsky (M-K) model. The model describes the localization in the area with the inserted geometrical defect. A brief description of the M-K model is presented in the following section. Geiger's and Merklein's gradient method [1] was also

[1]. S preizkusnim postopkom je ugotovil, da se gradient deformacije med preoblikovalnim postopkom naglo spremeni v trenutku nastanka lokalizacije. Podobno zamisel o uporabi drugega odvoda deformacije debeline po času, kot kriterij lokalizacije, je v računalniškem okolju predstavil Brun [12]. Metoda napove, kdaj se pojavi lokalizacija in ni primerna za analiziranje, kje in kako se je ta pojavila.

### 2.1 Kratek opis teoretičnega modela Marciniaka – Kuckzinskega

Z uporabo modela M-K analiziramo plastično nestabilnost v materialu. Pri tem upoštevamo plastični model z izotropnim utrjevanjem materiala in ravninsko napetostno stanje.

Model temelji na povečevanju začetne napake v obliki ozkega utora, nagnjenega pod kotom  $\psi_0$  glede na os  $y$  (sl. 6). Začetna velikost geometrijske napake je karakterizirana z razmerjem  $e_0^b/e_0^a$ , kjer je  $e_0^a$  začetna debelina področja in  $e_0^b$  debelina utora. Osi  $x$ ,  $y$  in  $z$  ustrezajo vzdolžni, prečni in pravokotni smeri glede na smer valjanja pločevine, medtem ko 1 in 2 predstavljata glavni osi napetosti in deformacij v homogenem področju.

Smeri na utoru so predstavljene z osmi  $n$ ,  $t$ ,  $z$ , kjer je 't' vzdolžna os. Obe področji materiala sta izpostavljeni plastični deformaciji, pri čemer upoštevamo stalno raztegotanje homogenega dela. Plastična deformacija se pri obremenitvi pojavi v obeh področjih. Njena velikost pa je odvisna od prečnega prereza področja. Ob dosegu kritične

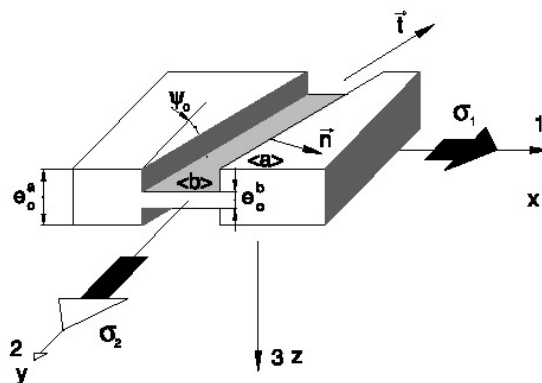
found to be useful. They established with their experimental work that the strain gradient during the forming process changes rapidly at the instant when the localization occurs. A similar idea, analysed in the digital environment, about the usage of the second temporal derivation of the thickness strain as localization criteria is presented by Brun [12]. The method predicts when the onset of necking occurs but it is not suitable for analysing where and how it appears.

### 2.1 Brief description of theoretical Marciniak–Kuckzinsky model

The simulation of the plastic instability is performed using the M-K analysis. The rigid plasticity, the plane stress condition and the isotropic work hardening of the material are assumed.

The model is based on the growth of an initial defect in the form of a narrow band inclined at an angle  $\psi_0$  with respect to the principle axis. The initial value of the geometrical defect is characterized by the ratio  $e_0^b/e_0^a$ , where  $e_0^a$  and  $e_0^b$  are the initial thicknesses in the homogeneous region and the groove, respectively. The  $x$ ,  $y$  and  $z$  axes correspond to the rolling, transverse and normal directions of the sheet, whereas the 1 and 2 axes represent the principal stress and strain directions in the homogeneous region, respectively.

The set of axes bound to the groove is represented by the  $n$ ,  $t$  and  $z$  axes, where 't' is oriented in the longitudinal direction. This two-zone material is subjected to plastic deformation by applying a constant incremental stretching of the homogeneous part. The plastic flow occurs in both regions, but the evolution of the strain rates is different in



Sl. 6. Začetna napaka M-K modela [18]  
Fig. 6. Initial defect of the M-K model [18]

deformacije v utoru se v njem pojavi lokalizacija. Pri tem je dosežena mejna deformacija pločevine. Za lažjo izpeljavo ravnotežnih enačb modela M-K se predpostavi, da se deformacija ( $\varphi_1$ ) pojavi v smeri osi  $x$ .

Natančen opis teoretične analize M-K, shematsko prikazane na sliki 6, lahko zasledimo v različnih virih ([6],[18] do [20]).

## 2.2 Opis numeričnega kriterija za določitev KMD

Pri iskanju kriterija za določitev numerično dobljene krivulje mejnih deformacij smo najprej analizirali diagram preoblikovalne sile, ki ga dobimo z numerično simulacijo za vsako izmero vzorca posebej.

V splošnem prikazuje preoblikovalna sila naraščajočo pot do dosega njene največje vrednosti in nenadno zmanjšanje ob pojavu porušitve pločevine, kakor se to zgodi pri preizkusu. Pri Marciniakovi metodi uporabljamo vodilno pločevino, ki se zaradi boljših preoblikovalnih lastnosti in večje debeline poruši kasneje kakor preizkušanelec. Kasnejša porušitev vodilne ploče pri simulaciji z MKE zadržuje nenadno zmanjšanje sile, ki se pojavi pri porušitvi preizkušanca. Porušitev skupine vzorcev, ki popisujejo levo stran KMD, se pojavi po celotni drsni ravnini, pri čemer se le-ti razpolovijo. Ta celoten zlom preizkušancev vpliva na pojav nenadnega zmanjšanja sile preoblikovanja kljub uporabi vodilne pločevine. Zato je mogoče pojav nenadnega zmanjšanja sile pri Marciniakovi metodi opazovati le pri preizkušancih, s katerimi popišemo levo stran KMD.

Če vrišemo deformacijsko stanje posameznih preizkušancev v trenutku, ko se preoblikovalna sila zmanjša, in če upoštevamo samo najvišje točke posameznih preizkušancev, je natančnost narisane KMD zelo majhna. Iz tega lahko sklepamo, da je preoblikovalna sila preveč splošen parameter in zato ni najbolj primerna za opredelitev meje porušitve pločevine.

Za določitev pojava lokalnega stisnjenja potrebujemo manj splošen parameter, kakor je preoblikovalna sila, ki mora biti povezan s posameznim elementom oz. vozliščem. Iz narave lokalnega stisnjenja debeline pločevine ter ob upoštevanju analize M-K, bi lahko za parameter izbrali plastično deformacijo debeline najtanjšega vozlišča.

two zones. When the flow localization occurs in the groove at a critical strain in the homogeneous region, the limiting strain of the sheet metal is reached. Furthermore, the major strain is assumed to occur along the  $x$  axis.

A detailed description of the theoretical M-K analysis, schematically illustrated in Figure 6, can be found in several publications ([6],[18] to [20]).

## 2.2 Description of the numerical criterion for the determination of the FLC

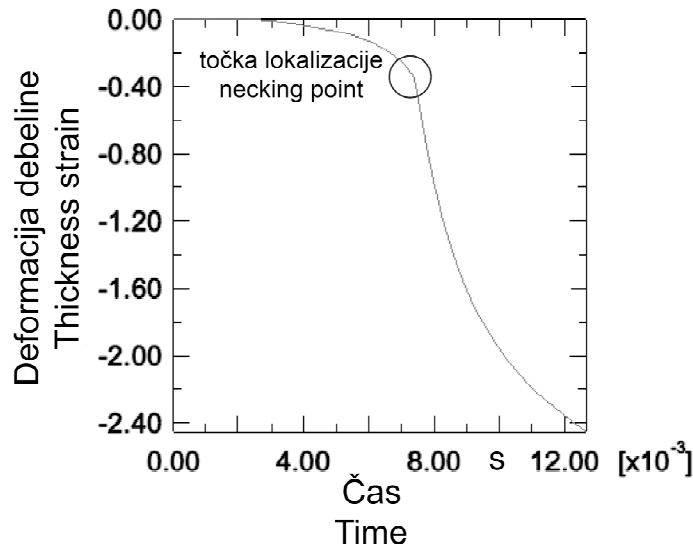
The first attempt made by an investigation of the criterion for the determination of the numerically achieved FLC was the analysis of the forming force versus time for all the simulated specimen dimensions.

The stamping force obtained by the FEM shows an increasing ranking until its maximum value is reached and abruptly decreases as soon as failure appears on the sheet, as also happens with the experiment. The guiding blank, which has better forming properties and/or greater thickness, is used by the Marciniak method and fails later than the specimen. The subsequent fracture of the guiding blank by the FEM simulation delays the sudden decrease of the forming force appearing as a result of material fracture. The fracture of all the specimens describing the left part of the forming limit diagram ( $\varphi_2 < 0$ ) is appears on the whole slide plane. In these cases the samples are divided into two approximately equal parts. This specimens rupture results in a suddenly decrease in the forming force, despite the use of a guiding blank. Therefore, the appearance of an abrupt decrease of the forming force during the Marciniak method can only be seen for samples defining the left-hand side of the FLD.

If the strain state of the particular specimens at the moment when the forming force drops down is plotted, and only the highest points of several specimens are considered, the drawn FLC is not accurate enough. It can be concluded that the forming force is a too general parameter and is therefore probably not the most suitable one to describe the deformation behaviour of the sheet metal.

For the determination of the phenomenon of localized necking, a criterion related to the single node or element is needed. This is a less general parameter than the forming force. With consideration of the M-K analysis and the nature of the local contraction of sheet thickness, the plastic thickness strain of the thinnest node can be chosen. When





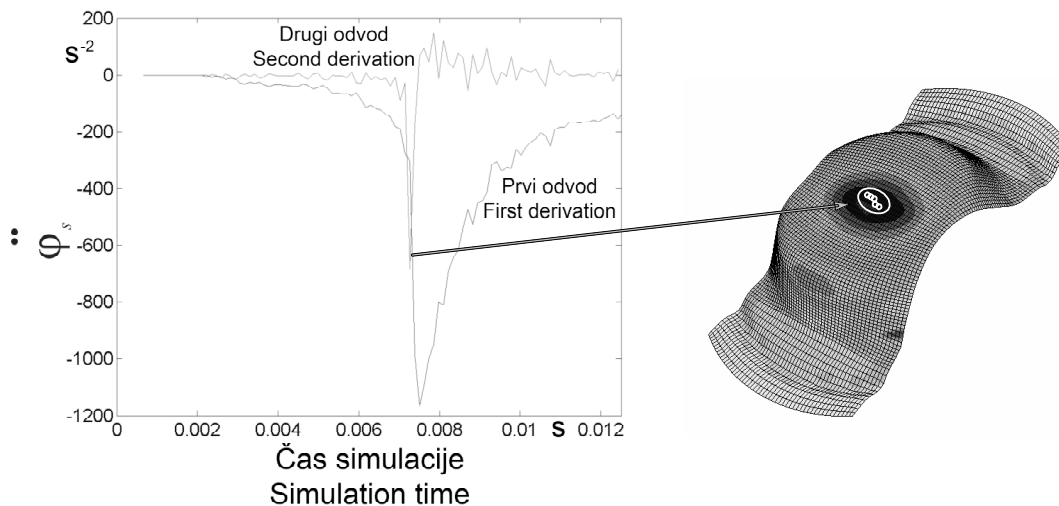
Sl. 7. Tanjšanje najtanjšega vozlišča v odvisnosti od časa (platina 95 mm)  
 Fig.7. Thinning as a function of time for the critical node (platinum 95 mm)

Ob pojavu lokalnega stisnjenja moramo zaznati ostro spremembo v deformacijskem obnašanju izbranega vozlišča. Na krivulji, ki prikazuje logaritemsko deformacijo v smeri debeline pločevine  $\varphi_s$  v odvisnosti od časa (sl. 7), vidimo koleno, ki poudarja skokovito spremembo deformacije.

Če predvidevamo, da je začetek lokalne kontrakcije povezan z značilno spremembo hitrosti deformacije debeline v odvisnosti od časa, potem ima drugi časovni odvod deformacije  $\dot{\varphi}_s(t)$  v tem trenutku največji ekstrem funkcije. Slika 8 prikazuje

necking appears, a sharp change in the strain behaviour of the selected node should be noted. On the curve which shows the true principal strain in the sheet thickness direction  $\varphi_s$  versus time (Figure 7), a knee can be observed. This underlines a bigger variation of strain against time.

If we consider that the onset of necking can be connected with a significant variation in the strain thickness velocity versus time, then the second temporal derivation of strain  $\ddot{\varphi}_s(t)$  has at this moment maximal extreme function. The first and



Sl. 8. Začetek lokalizacije in njena lega na preizkušancu  
 Fig. 8. Onset of necking and its location on the analysed specimen

prvi in drugi odvod deformacije debeline v odvisnosti od časa. Drugi odvod prikazuje lokaliziran vrh v času. V tem trenutku lahko pričakujemo pričetek lokalnega stisnjenja na vzorcu.

Ovrednotenje stanj glavnih deformacij ( $\varphi_1$  in  $\varphi_2$ ) različnih geometrijskih preizkušancev, analiziranih glede na ekstrene funkcije  $\ddot{\varphi}_s(t)$  kritičnih vozlišč posameznega preizkušanca, daje točke za določitev KMD z uporabo numeričnega postopka.

### 2.3 Opis metodologije

Pri proučevanju kriterijev za določitev KMD z uporabo numeričnih simulacij se je kot najboljša izkazala analiza debelinske deformacije. Pri vrednotenju numerično opredeljene KMD smo uporabili sedem različnih geometrijskih oblik preizkušancev.

Uporabljena metodologija pri določanju KMD s pomočjo numeričnih simulacij je povzeta v naslednjih sedmih korakih:

**1 – Iskanje najtanjšega vozlišča.** Na analiziranem modelu MKE iščemo najtanjša vozlišča preizkušanca za celoten čas preoblikovanja, ki ga diskretiziramo na časovne korake  $t_o$ .

**2 – Določanje deformacije debeline.** Najtanjša vozlišča vseh časovnih korakov so označena in vnesena v program za MKE analize ABAQUS. Omenjenim vozliščem zapišemo pripadajoče deformacije debeline med celotnim postopkom preoblikovanja.

**3 – Izračun prvega in drugega časovnega odvoda deformacije debeline.** Predvidevamo, da je začetek lokalne kontrakcije povezan z značilnim povečanjem deformacije debeline v odvisnosti od časa. Skokovito spremembo  $\varphi_s$  najbolje prikazuje drugi časovni odvod deformacije, ki ga izračunamo in analiziramo za vsako najtanjšo vozlišče. Drugi odvod deformacije opredelimo kot:

$$\ddot{\varphi}_s = \frac{d^2 \varphi_s}{dt^2} \quad (1)$$

**4 – Označevanje največje vrednosti drugega časovnega odvoda za posamezno vozlišče.** Izračunana sta prvi in drugi časovni odvod plastične deformacije. Oba imata vrh strogo lokaliziran v času, okoli katerega se pojavi tudi koleno deformacijske krivulje. Vrh drugega odvoda, ki pomeni precejšnja razliko v hitrosti deformacije, prikaže čas, pri katerem naj bi se pojavila numerično dobljena lokalna kontrakcija.

**5 – Izbiranje največje vrednosti drugega časovnega odvoda med vsemi vozlišči.** Napišemo algoritem, ki

second derivatives of thickness strain versus time are shown in Figure 8. The later one represents a localized peak in time. At this moment we can expect the onset of necking in the specimen.

An evaluation of the main strain states ( $\varphi_1$  and  $\varphi_2$ ) for different specimen geometries, analysed according to the function extremes  $\ddot{\varphi}_s(t)$  of the critical nodes on a particular specimen, gives the points for a determination of the FLD by a numerical approach.

### 2.3 Methodology description

The thickness strain proved to be the best parameter for an analysis of the numerically obtained FLC. Seven different specimen geometries were used by evaluating the numerically defined FLC.

The methodology used for a determination of the FLC with numerical simulations can be summarised in the following seven steps:

**1 – Searching the most thinned node.** On the analysed FEM model the most thinned nodes of the specimen for the whole forming time, which is separated into time intervals of  $t_o$ , are searched.

**2 – Defining the thickness strain.** The most thinned nodes of all the time increments are indicated and entered in program for the FEM analyses (ABAQUS). For that, nodes corresponding to the thickness strain during the whole forming process are recorded.

**3 – Calculation of the first and second temporal derivatives of thickness strain.** It is supposed that the onset of necking is related with a typical increase of thickness strain versus time. A sharp variation of  $\varphi_s$  is best represented by a second temporal derivative, which is calculated and analysed for each of the most thinned nodes. The second strain derivative is defined as:

**4 – Indicating the maximal value of the second temporal derivative for an individual node.** The first and second temporal derivatives of plastic strain are calculated. Both have a peak that is rigorously localized in time, around which the knee of the strain curve appears. The peak of the second derivative, which acts as a large variation in the deformation velocity, represents the time in which the numerically defined necking is supposed to appear.

**5 – Selecting the largest value of second temporal derivative among all the nodes.** The algorithm was

primerja čase nastankov največjih vrednosti drugega odvoda posameznih vozlišč preizkušanca in zapiše čas nastanka ter številko vozlišča, pri katerem se je največja vrednost drugega odvoda najhitreje pojavila.

**6 – Zapis glavnih deformacij v prečni ( $\varphi_1$ ) in vzdolžni ( $\varphi_2$ ) smeri vozlišča.** Zapišemo glavni deformaciji v prečni in vzdolžni smeri vozlišča, ki ga je shranil algoritem, opisan v koraku 5.

**7 – Risanje numerično dobljene KMD.** Koraki 1 do 6 se ponavljajo za vseh sedem geometrijskih oblik preizkušanca, s čimer ovrednotimo različna področja v diagramu deformacijskih stanj.

Med analiziranjem nastanka lokalizacije oz. zloma na posameznem preizkušancu po zgoraj opisani metodi se lahko pri različnih vozliščih v enakem trenutku pojavi izrazita sprememba  $\dot{\varphi}_s$ . Pri nadaljnji analizi ugotovimo, da so to sosednja vozlišča, ki se nahajajo v področju nastanka lokalizacije oz. porušitve preizkušanca. Zato je na sliki 9 pri določeni geometrijski obliki vzorca prikazanih več kritičnih točk.

### 3 PRIMERJAVA PREIZKUSNO IN NUMERIČNO DOBLJENE KRIVULJE MEJNIH DEFORMACIJ

Za določanje numerične krivulje mejnih deformacij, smo uporabili enak material preizkušanca kakor pri preizkusnem določanju KMD. Preizkusni del je bil izveden na orodju za Marciniakov preizkus, opremljen z optičnim sistemom za vrednotenje podatkov v Laboratoriju za preoblikovanje na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani.

Slika 9 prikazuje preizkusno in numerično dobljene točke KMD za vročo cinkano jekleno pločevino. Spodnja črta na diagramu predstavlja lokalizacijo, zgornja pa porušitev preizkušanca pri preizkusnem določanju KMD.

Z opisanim numeričnim kriterijem za določevanje KMD napovedujemo začetek lokalnega stisnjenja na preizkušancu. Pri analizi diagrama ugotovimo, da se leva stran numerično dobljenih točk, v primerjavi s preizkusom, nagiba k napovedovanju pretrga preizkušanca. Iz omenjenega lahko ugotovimo, da z numeričnim kriterijem ne moremo natančno določiti začetka lokalizacije na preizkušancu pri vseh geometrijskih oblikah vzorcev. Problem bi rešili s pogostejšim shranjevanjem tanjšanja posameznih vozlišč na preizkušancu, predvsem v trenutku nastanka lokalizacije.

written that compare the origin times of maximal value of the second derivative for particular specimen nodes and then write down the origin time and the node number at which the maximal value of the second derivative first appeared (at minimum time).

**6 – Recording the main strains in the transversal ( $\varphi_1$ ) and the longitudinal ( $\varphi_2$ ) direction of the node.**

The main strains are written down in transversal and longitudinal directions for the node, and saved with the algorithm described in step 5.

**7 – Plotting the numerical FLC.** Steps 1 to 6 are repeated for each of the seven specimens' dimensions in order to evaluate the different areas in the FLD diagram.

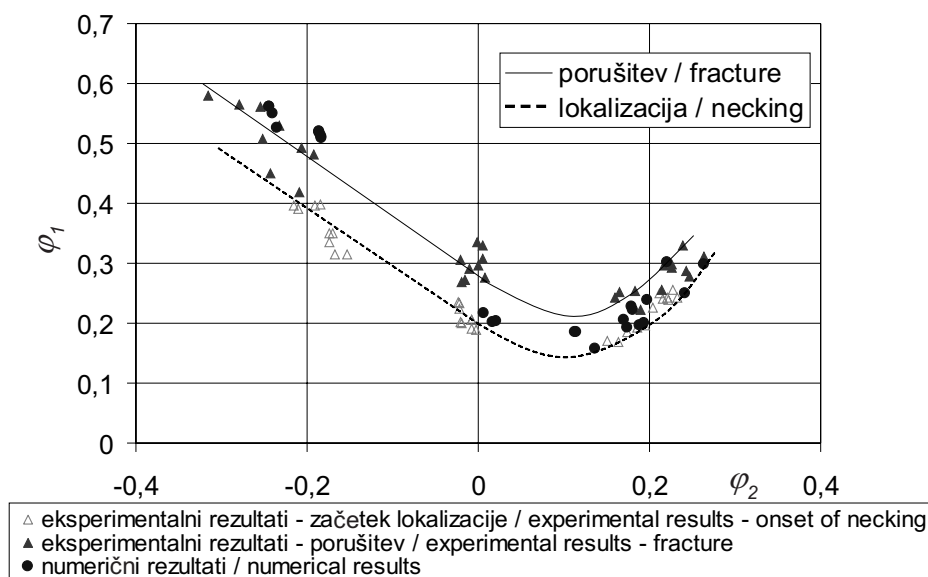
During the analysis the onset of necking and fracture in the particular specimens by the methodology described above can appear at different nodes at the same moment expressive variation of the  $\dot{\varphi}_s$ . However, with further analysis this node was determined as adjacent nodes, that are in the area, where the necking or failure on the specimen originates. Therefore, more critical points for the defined specimen geometry are shown in Figure 9.

### 3 COMPARISON OF THE EXPERIMENTAL AND NUMERICALLY OBTAINED FLC

The numerical and experimental determinations of the FLC were performed with the same material properties. The experiments were carried out on the Marciniak test tool and optical data-acquisition equipment in the Forming Laboratory, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana.

The experimental and numerically obtained points of the FLC for hot-galvanized steel are shown in the Figure 9. The lower line on the diagram represents the localization, whereas the upper line represents specimen failure by the experimentally defined FLC.

With this numerical approach for the determination of the FLC the onset of necking on the specimen is predicted. Furthermore, it is evident from the diagram that the left side of the numerically obtained points tends to predict specimen fracture in comparison with the experimental test. However, it could be established that it is not possible to accurately determine the onset of necking on the specimen for all the analysed geometries using the numerical criterion. The problem could be solved with a higher frequency of data saving for all the nodes on the specimen, especially at the moment when the necking occurs.



Sl. 9. Primerjava numerično in preizkusno dobljene KMD  
 Fig. 9. Comparison of numerical and experimental obtained FLC

Numerično dobljene točke mejnih deformacij se pojavljajo med področjem, ki ga zajemata KMD lokalizacije in zloma preizkušancev pri preizkusu. Ker se področje numerične krivulje nahaja v kritičnem področju preizkusne krivulje, jo lahko vsekakor uporabimo za oceno preoblikovalnosti materiala.

Do odstopanj med numerično in preizkusno dobljenimi točkami mejnih deformacij lahko pride zaradi vizualnega pregleda posnetkov začetka lokalizacije in kasneje zloma na preizkušancu pri preizkusnem določanju točk, kar ima lahko pristransko naravo. Z uporabo pogostejšega shranjevanja posnetkov bi lahko omenjeni pristranski vpliv zanemarili.

Pri določevanju KMD z numerično simulacijo pa se izognemo pristranskemu vplivu določitve lokalizacije na preizkušancu. V tem primeru je natančnost numerično analizirane lokalizacije na preizkušancu odvisna od gostote shranjevanja podatkov med simulacijskim postopkom.

Primerjava med preizkusno in numerično dobljeno KMD je bila izvedena na podlagi treh različnih oblik vzorcev (na diagramu slika 9: levo - platina širine 90 mm, sredina - platina širine 130 mm in desno - rondela). Zaradi natančnejšega poteka numerične KMD so v diagram (sl. 9) vnesene tudi mejne deformacije preostalih numerično analiziranih preizkušancev (platina širine: 95 mm, 135 mm, 150

Numerically obtained points of the strain limits appear between the area that is limited with necking and the fracture limit curve by an experimental determination of the FLC. Since the numerical curve is placed in a critical area of the experimental curve it can be anyway used for the estimation of the material formability.

The deviation between the numerically and experimentally obtained strain limit points can be related to a visual data evaluation of the onset of necking and the later fracture in the specimen by an experimental determination of the points, which can have a subjective nature. The above-mentioned subjective influence can be neglected by using repeated data saving.

The subjective influence of the necking definition on the specimen is negligible for a numerical determination of the FLC. In this case the accuracy of the numerically analysed necking on the specimens depends on the frequency of the saved data.

The comparison between the experimentally and numerically obtained FLC is based on three different test geometries (Figure 9: left - specimen width of 90 mm, middle - specimen width of 130 mm and right - blank of 200 mm in diameter). The limit strains of the other numerically analysed specimens with widths of 95 mm, 135 mm, 150 mm and 165 mm are also entered in the diagram (Figure 9) for an ac-

mm in 165 mm). Za natančnejšo določitev lege KMD bi bilo potrebno analizirati večje število preizkušancev s širinami okoli 130 mm, saj še tako majhna sprememba geometrijske oblike vzorca vpliva na spremembo poteka deformacije v odvisnosti od časa.

#### 4 SKLEP

Največja prednost predstavljene metode je možnost avtomatizacije in vrednotenje velikega števila različnih geometrijskih oblik preizkušancev. Zato je metoda zmožna hitro in zanesljivo napovedati krivuljo mejnih deformacij.

Kljub temu, da prihaja do razlik med numerično in preizkusno dobljenimi točkami, lahko rezultate štejejo kot dobre, saj se numerično dobljena KMD dobro prilega preizkusni KMD na celotnem območju diagrama mejnih deformacij.

Dobljeni so zadovoljivi rezultati z nižjimi stroški in v krajšem času kakor pri preizkusu. Z natančnejšim vnosom materialnih podatkov v numerični program bi dosegli popolnejšo krivuljo mejnih deformacij.

V nadaljevanju raziskovalnega dela bomo z opisano metodo določili še KMD za materiale, ki imajo drugačne mehanske lastnosti (aluminij, titan, nerjavče jeklo itn.). S tem bomo dobili potrditev o splošni veljavnosti tako dobljenih krivulj mejnih deformacij, v primeru odstopanj pa bomo skušali ugotoviti vzroke za njihov nastanek.

curate definition of the numerical FLC. A large number of specimens with widths around 130 mm would be needed to analyse the accurate position of the FLC, because a small difference in the specimen geometry can have an enormous influence on changes to the strain path against time.

#### 4 CONCLUSION

The most important advantage of the presented numerical method is its potential for automation and the evaluation of a large number of different specimen geometries. Therefore, the method is able to quickly and reliably predict the forming limit curve.

In spite of the differences between the numerically and experimentally obtained points the final results are acceptable, because the numerically obtained FLC is in good agreement with the experimentally obtained curve over the whole range of the forming limit diagram.

Satisfactory results are obtained with less cost and in a shorter time than with experiment. Of course, the more accurate are the material data for the input of the numerical program, the better is the obtained forming limit curve.

In future research work we will determine, with the above-mentioned numerical approach, the FLCs for other materials with diverse mechanical properties (aluminium, titanium, stainless steel, etc.). In this way the general validity of the presented methodology will be confirmed. In the case of deviations the reasons for these anomalies will be analysed as well.

#### 5 LITERATURA

#### 5 REFERENCES

- [1] M. Geiger, M. Merklein (2003) Determination of forming limit diagrams – a new analysis method for characterization of materials' formability; *Annals of the CIRP* Vol. 52/1/2003
- [2] S. P. Keeler (1964) Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches. *ASM Trans.* 56, 25-48.
- [3] G. M. Goodwin (1968) Application of strain analysis to sheet metal forming in the press shop. *SAE paper* No. 680093
- [4] R. Hill (1952) On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets, *J. Mech. Phys. Solids* 1, 1952
- [5] H. W. Swift (1952) *J. Mech. Phys. Solids*, 1 (1952) 19.
- [6] Z. Marciniak, K. Kuczynski (1967) Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal, *Int. J. Mech. Sci.* 9 (1967) 609-620
- [7] F. Cayssials (1998) A new method for predicting FLC, *Proc. Of 20th IDDRG*, Genval, Belgium 1998, p. 443-454
- [8] F. Gologranc, J. Pipan, P. Bezgovšek, E. Zebec, J. Kadivnik, A. Haring, Z. Horvat (1980) Projekt Obdelovalni sistemi in proizvodna kibernetika, 3. del, Identifikacija preoblikovalnosti tanke pločevine, Ljubljana.



- [9] K. Nakazima, T. Kikuma, K. Asuka (1971) Study on the formability of steel sheet. *Yawata Technical Report*, Nr. 264, 1971, p.678-680.
- [10] Z. Marciniak, K. Kuczinski, T. Pokora (1973) Influence of the plastic properties of the material on the forming limit diagram for sheet metal tension, *Int. J. Mech. Sci.*, 15 (1973), p. 789-805.
- [11] D. Banabic, H.-J. Bunge, K.Pöhlandt, A.E. Tekkaya (2000) Formability of metallic materials; *Springer – Verlag*, Berlin Heidelberg.
- [12] R. Brun, A. Chambard, M. Lai and P. de Luca (1999) Actual and virtual testing techniques for a numerical definition of materials; *NUMISHEET 99*; France.
- [13] F. Ozturk, D. Lee (2004) Analysis of forming limits using ductile fracture criteria; *Journal of Materials Processing Technology*, 147 (2004) 397-404
- [14] J. Kadivnik (1982) Uporaba grafometrične metode pri komparativni analizi preoblikovanja tanke pločevine za izdelavo velikih karoserijskih delov, magistririj, *Fakulteta za strojništvo*, Ljubljana.
- [15] J. Pipan, F. Gologranc, Z. Kampuš, T. Špan (1989) Zasedovanje preoblikovalnih procesov z računalnikom. V: Obdelovalna tehnika: 1. seminar, *Fakulteta za strojništvo*, Ljubljana.
- [16] F. Gologranc, K. Kuzman (1989) Tehnika preoblikovanja – stanje in smeri razvoja. V: Obdelovalna tehnika: 1. seminar, *Fakulteta za strojništvo*, Ljubljana.
- [17] H. J. Kim, H. Y. Kim, I. K. Kwak, Y.S. Shin (1999) Numerical and experimental analysis for the prediction of forming limit in stamping processes; *NUMISHEET 99*; France.
- [18] M. C. Butuc, J.J. Gracio, A. Barata da Rocha (2003) A theoretical study on forming limit diagrams prediction; *Journal of Materials Processing Technology* 142 (2003) 714-724
- [19] F. Barlat (1989) Forming limit diagrams-prediction based on some microstructural aspects of materials, *The Minerals, Metals, Materials Society*.
- [20] R. H. Wagoner, K.S. Chan, S.P. Keeler (1989) Forming limit diagrams: concepts, methods and applications; Ohio.

Naslov avtorjev: Aleš Petek  
dr. Tomaž Pepelnjak  
prof.dr. Karl Kuzman  
Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za strojništvo  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana  
ales.petek@fs.uni-lj.si  
tomaz.pepelnjak@fs.uni-lj.si  
karl.kuzman@fs.uni-lj.si

Authors' Address: Aleš Petek  
Dr. Tomaž Pepelnjak  
Prof.Dr. Karl Kuzman  
University of Ljubljana  
Faculty of Mechanical Eng.  
Aškerčeva 6  
SI-1000 Ljubljana, Slovenia  
ales.petek@fs.uni-lj.si  
tomaz.pepelnjak@fs.uni-lj.si  
karl.kuzman@fs.uni-lj.si

Prejeto:  
Received: 18.2.2005

Sprejeto:  
Accepted: 25.5.2005

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

## Simulacija bočnega nihanja potniških vagonov

### Simulating the Lateral Vibrations of Passenger Wagons

Žilvinas Bazaras – Mindaugas Leonavičius

*V tej raziskavi sva se posvetila dinamiki železniških potniških vagonov, metodam za reševanje problemov s tega področja in dinamičnim pojavom v vagonu. S programskim paketom ADAMS/Rail sva ustvarila matematični model, ki omogoča izračun prečno vsiljenega nihanja vagona. V postopku izdelave tega modela sva ocenila geometrijske in mehanske značilnosti vagona. Poleg tega sva predstavila funkcije, ki opisujejo sinusoidne nepravilnosti železniške proge v ravnini, in sicer za primere, ko sinusoidna valovna dolžina znaša 10 m, 20 m, 30 m in 40 m in je valovna amplituda 0,0025 m, 0,0035 m, 0,0050 m in 0,0065 m. Z uporabo teh funkcij sva opisala vpliv vzbujanja na dinamični sistem.*

© 2005 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: vagoni potniški, dinamika, nihanja bočna, modeli matematični)**

*In this investigation we look at the dynamics of railway passenger wagons, the methods of providing solutions and the dynamic processes of a carriage. Using the program package ADAMS/Rail, a mathematical model is created to calculate the transversally forced oscillations of the carriage. During the creation of this model the geometrical and mechanical characteristics of the carriage are estimated. In addition, the functions describing the sinusoidal irregularities of the road in the plane are presented for cases when the sinusoidal wavelength is 10 m, 20 m, 30 m and 40 m, and the wave amplitude is 0.0025 m, 0.0035 m, 0.0050 m and 0.0065 m. With the help of these functions the excitation influence on the dynamic system is described.*

© 2005 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: railway passenger cars, dynamics, lateral vibrations, mathematical models)**

#### 0 UVOD

Zaradi izboljšav na lokomotivah, povečanih hitrosti in strožjih zahtevah prometne varnosti postajajo raziskave dinamike pojavov celotne vlakovne kompozicije ter analize medsebojnega delovanja sil koles in tirnic vse bolj pomembne. Mnogi znanstveniki na različnih koncih sveta so delovali, in v mnogih primerih še vedno delujejo, na področju raziskovanj vlakovnih kompozicij. Mednje spadajo Rao V. Dukkipati, S. Narayana Swamy ([1] in [2]), C. Andersson, P. Carlbom, J. Forstberg [3], M.F. Verigo, A.J. Kogan [4], V.F. Uskalov [5], W.O. Shiehlen [6], Veršinskij [7]. Veliko število držav, v katerih potekajo raziskave vlakovnih kompozicij, dokazuje, da problemi vezani na dinamiko vlakovne kompozicije ostajajo nerešeni in pomenijo izziv za posamezne države. Ti problemi so zelo pomembni tudi za Litvo, saj se je tu stanje

#### 0 INTRODUCTION

With the improvements in traction devices, the increased speeds and the stricter traffic-safety requirements, research into the dynamic processes of rolling stock as well as analyses of the interaction forces between the wheel and the rail becomes more and more important. A lot of scientists from all around the world have worked, and in many cases continue to work, in the area of rolling stock. These include Rao V. Dukkipati, S. Narayana Swamy ([1] and [2]), C. Andersson, P. Carlbom, J. Forstberg [3], M.F. Verigo, A.J. Kogan [4], V.F. Uskalov [5], W.O. Shiehlen [6], Vershinsky [7]. The large number of countries where the dynamics of rolling stock is being investigated shows that the problems related to rollingstock dynamics remain unsolved and represent a challenge on the national level. These problems are also very important in Lithuania because the condition of the trains and the railways has

vlakov in železnic poslabšalo in je zato potnikom težko ponuditi udobno vožnjo.

Prispevek obravnava problem dinamike vodoravnih dinamičnih procesov, ki se pojavlja ob gibanju vagona po progi z bočnimi nepravilnostmi.

Vodoravni dinamični pojavi močno vplivajo na stabilnost gibanja, tj. na zmožnost elastične zveze vlakovne kompozicije, da ohrani prečno nihanje v mejah, potrebnih za zagotavljanje udobja in varnosti potnikov. Eden glavnih kazalnikov, ki določa enakomernost gibanja, upošteva amplitudo in pospešek nihanja. Prispevek predstavlja odvisnosti teh kazalnikov od hitrosti gibanja in nepravilnosti tira.

## 1 NEPRAVILNOSTI ŽELEZNIŠKEGA TIRA

Najpogostejša je skoraj sinusoidna nagubanost tirnic, obravnavana v virih [1] do [3] in prikazana na sliki 1,

$$\eta(t) = a \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{l} x\right) = a \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{l} vt\right) \quad (1),$$

kjer je  $l$  valovna dolžina sinusoidnih nepravilnosti,  $a$  amplituda sinusoidnih nepravilnosti,  $v$  hitrost in  $t$  čas.

Analiza dolgoročnih opazovanj železniške proge [7] je pokazala, da je imelo 55 do 65 odstotkov odsekov železnice, narejene iz železobetonskih tirov, nepravilnosti v vodoravni smeri in v obliki pravilne sinusoide. Poleg tega je imelo 20 do 30 odstotkov teh tirov še nepravilnosti v obliki nepravilne sinusoide, ki pa jo v dobrem približku lahko vpišemo s pravilno sinusoido.

Glavne povprečne vrednosti vodoravnih nepravilnosti so podane v preglednici 1 [5].

worsened, making it difficult to provide passengers with acceptable levels of comfort.

This paper discusses one of the problems of the dynamics of wagons' horizontal dynamic processes that occurs while a wagon moves along lateral road irregularities.

Horizontal dynamic processes have a great impact on the stability of movement, i.e., on the capability of the elastic lug of the rolling stock to maintain transversal oscillations within the limits of the requirements for providing comfort and safety for passengers. One of the main indicators that determines the evenness of movement involves the amplitudes and accelerations of oscillations. This paper discusses the dependences of these indicators on movement speed and road irregularities.

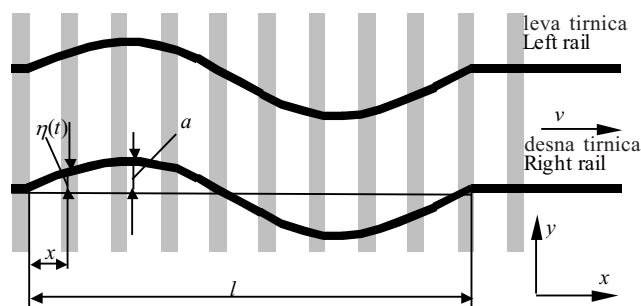
## 1 RAILWAY-TRACK IRREGULARITIES

Nearly sinusoidal rail corrugations, like those described in [1] to [3], (Fig. 1) are the most commonly encountered

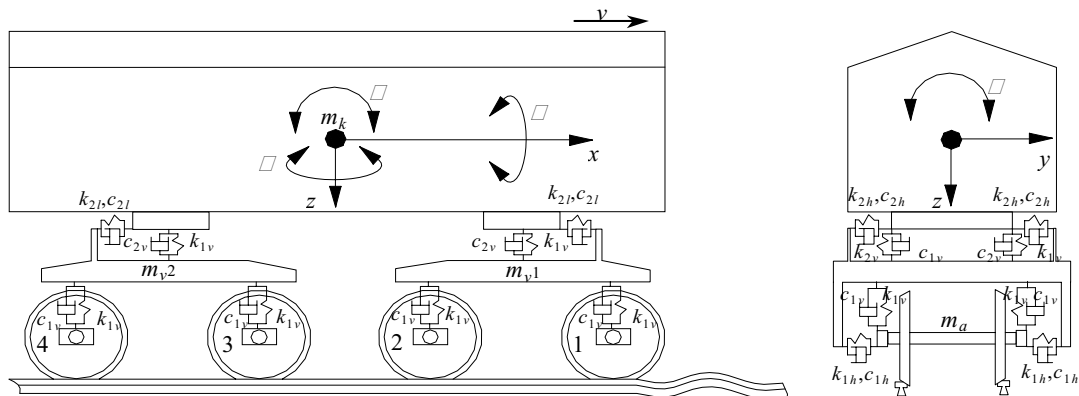
where  $l$  is the wavelength of the sinusoidal irregularities,  $a$  is the amplitude of the sinusoidal irregularities,  $v$  is the velocity and  $t$  is the time.

In an analysis of the long-term conditions of a railway [7], 55 to 65 % of the pieces of the railway track with ferro-concrete rails were found to have irregularities in the horizontal direction in the form of a correct sine wave. In addition, 20 to 30 % of these pieces were found to have irregularities in the form of an incorrect sine-wave form that would not be difficult to approximate to a correct sine wave.

The major average values of the horizontal irregularities are given in Table 1 [5].



Sl. 1. Osnovna shema sinusoidnih nepravilnosti železniške proge  
Fig. 1. Principal scheme of the sinusoidal irregularities of the railway



Sl. 2. Poenostavljeni, dinamični model potniškega vagona  
 Fig. 2. Simplified, dynamical model of a passenger wagon

Preglednica 1. Nepravilnosti približno sinusoidne oblike

Table 1. Characteristics of practically sinusoidal irregularities

Oblika bočnih nepravilnosti Shape form of the lateral irregularities	Parametri bočnih sinusoidnih nepravilnosti $\eta(t)$ Parameters of lateral sinusoidal irregularities $\eta(t)$	
	$a$ [m]	$l$ [m]
pravilna sinusoida correct sine wave	0,001 do/to 0,003	10 do/to 25
nepravilna sinusoida incorrect sine wave	0,002 do/to 0,004	10 do/to 20

2 OPIS MODELA POTNIŠKEGA VAGONA

2 DESCRIPTION OF THE PASSENGER-WAGON MODEL

Raziskave različnih vrst železniškega prevoza vključujejo:

- analize sil, ki se pojavljajo med kolesom in tirom;
- vpliv koles, podvozja in drugih delov konstrukcije na dinamiko vagona;
- analize gibanja vagona po nepravilnem tiru;
- analize občutljivosti železniškega vagona;
- določitev amplitudno-frekvenčnih značilnosti elementov vagona.

Raziskovalna simulacija, ki je bila del programa ADAMS/Rail, je potekala na potniškem vagonu s podvozjem tipa KVZ CNII ([8] in [9]).

Slika 2 prikazuje dinamični model preučevanega vagona.

Vagon je oblikovan kot toga karoserija, vezana na okvir z vzmetjo in dušilniki ( $k_2$  in  $c_2$ ), ki imajo linearne značilnosti. Okvir je prav tako oblikovan kot togo telo, povezano s dvojicama koles ( $k_1$  in  $c_2$ ) prek vzmetno-dušilne enote.

Research into various types of railway transport includes:

- analyses of the forces that appear between the wheel and the rail;
- the influence of the wheels, bogies and other parts of the construction on the dynamics of the carriage;
- analyses of the carriage's movement along an irregular track;
- analyses of the railway carriage's sensitivity;
- the determination of the amplitude/frequency characteristics for the elements of a carriage.

In this work a passenger wagon with the KVZ CNII-type bogies ([8] and [9]) was used in the simulation research as part of the ADAMS/Rail program.

The dynamical model of the research wagon is shown in Figure 2.

The wagon is modelled as a rigid body, which is connected via a spring and truck dampers ( $k_2$  and  $c_2$ ) that have linear characteristics. The bogie frame is also modelled as a rigid body, which is connected to the wheel sets ( $k_1$  and  $c_2$ ) by the

Preglednica 2. Tehnični podatki potniškega vagona s podvozjem tipa KVZ CNII  
 Table 2. Technical data of the passenger wagon with the KVZ CNII-type bogies

<b>Parameter</b>	<b>Vrednost / Value</b>
<i>masa karoserije, kg</i> <i>Mass of a wagon body, kg</i>	43 400
<i>masa okvirja, kg</i> <i>Mass of a bogie frame, kg</i>	2 615
<i>masa podvozja, kg</i> <i>Mass of a wagon bogie, kg</i>	7 100
<i>masa kolesne dvojice, kg</i> <i>Mass of a wheelset, kg</i>	1 500
<i>masa ležajnika osi, kg</i> <i>Mass of an axle box, kg</i>	155
<i>premer koles, m</i> <i>Diameter of the wheels, m</i>	0,92
<i>nosilo medosne razdalje, mm</i> <i>Tape circle distance, mm</i>	1 520
<i>nosilo kolesne dvojice, m</i> <i>Wheelset base, m</i>	2,4
<i>razdalja med dvema podvozjema, m</i> <i>Distance between two bogies, m</i>	17
<i>primarna bočna togost vzmetenja, kN/m</i> <i>Primary lateral suspension stiffness, kN/m</i>	860
<i>sekundarna bočna togost vzmetenja, kN/m</i> <i>Secondary lateral suspension stiffness, kN/m</i>	385
<i>sekundarno bočno dušenje vzmetenja, kNs/m</i> <i>Secondary lateral suspension damping, kNs/m</i>	100

Povezava je linearna. Izbrani parametri modelnega vagona in njegovo gibanje so predstavljeni v preglednici 2.

Da bi povzeli značilnosti modela, moramo vse linearne enačbe, ki določajo vsiljeno nihanje modela, ki ga povzročajo motnje, povezane z neenakomernostjo proge, izraziti z matrikami [7]:

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = [B]\{u\} \quad (2),$$

kjer so  $\{y\}$  krajevni vektor,  $\{u\}$  vektor motenj,  $[M]$  matrika vztrajnosti,  $[C]$  matrika dušenja,  $[K]$  matrika togosti in  $[B]$  matrika porazdelitve motenj.

Ko izberemo način izračuna, lahko dinamične enačbe nihanja opišemo z Lagrangevimi enačbami drugega reda, ali z D'Alembertovim načelom (če silam, ki delujejo na točke sistema, dodamo sile vztrajnosti, dobimo uravnotežen sistem sil) [4]. Diferencialne enačbe morajo upoštevati geometrijske, fizikalne in statične odvisnosti.

Na temelju geometrijskih razmerij lahko določimo odvisnosti sprememb (tj. deformacij)

spring-damper unit. The connection is a linear type. The parameters chosen for the modelled wagon and its movement are presented in Table 2.

In order to summarize the model, all the linear equations defining the forced oscillations of the model, and which are caused by disturbances due to the road roughness, should be expressed by matrices [7]:

where  $\{y\}$  is a position vector,  $\{u\}$  is a vector of disturbances,  $[M]$  is inertial matrix,  $[C]$  is a damping matrix,  $[K]$  is a rigidity matrix, and  $[B]$  is matrix representing the distribution of disturbances.

After selecting the calculation scheme, the dynamic equations of the oscillations can be described by Lagrange's type-II equations or by D'Alembert's principle (by adding the inertial forces to the forces acting on the system points, a balanced system of forces is obtained) [4]. The differential equations should take into account geometric, physical and static dependencies.

On the basis of the geometric relations we can determine the dependencies of the changes (i.e., the



povezav komponentnih vozlišč konstrukcije v določenem koordinatnem sistemu. Ob upoštevanju fizikalnih zakonov, reakcije povezav, vztrajnostne sile analiziranih komponent in momente vztrajnostnih sil izrazimo kot deformacije ter zapišemo enačbe za izračun hitrosti in pospeškov vozlišč. Dobljene odvisnosti vstavimo v sistem diferencialnih enačb dinamičnega sistema. Ko rešimo sistem, dobimo razmerje med porožilnimi silami in spremembami komponent vagona.

### 3 METODA SIMULACIJE

Simulacijo časovnega poteka smo izvedli v pogojih sinusoidne bočne nepravilnosti leve in desne tračnice (sl. 1).

Ko se vlakovna kompozicija giblje po progi z bočnimi nepravilnostmi, je karoserija izpostavljena vodoravnemu nihanju z različnimi amplitudami in frekvencami, katerih vrednosti so odvisne od naslednjih dejavnikov [10]:

- hitrosti vagona;
- mehanskih lastnosti komponent jeklene konstrukcije;
- vodoravnih odstopanj tračnic;
- porazdeljenosti nepravilnosti na obeh straneh.

Za potrebe preučevanja dinamičnih karakteristik vagona smo analizirali bočne vibracije vagona pri različnih hitrostih, od 10 km/h do 160 km/h, v območju sinusoidnih nepravilnosti in v ravnini različnih parametrov (valovna dolžina  $l$  je: 10 m, 20 m, 30 m in 40 m; valovna amplituda  $a$  je: 0,0025 m, 0,0035 m, 0,005 m in 0,0065 m).

deformations) of the connections of the structural component nodes in the specified coordinate system. By applying physical laws, the reactions of the connections, the inertial forces of the analysed components and the moments of the inertial forces are expressed as deformations, and the equations for calculating the speeds and accelerations of the nodes are compiled. The obtained dependencies are put into the system of differential equations of the dynamic system. After the system is solved, a relation between the actuation forces and the changes of the wagon's components is obtained.

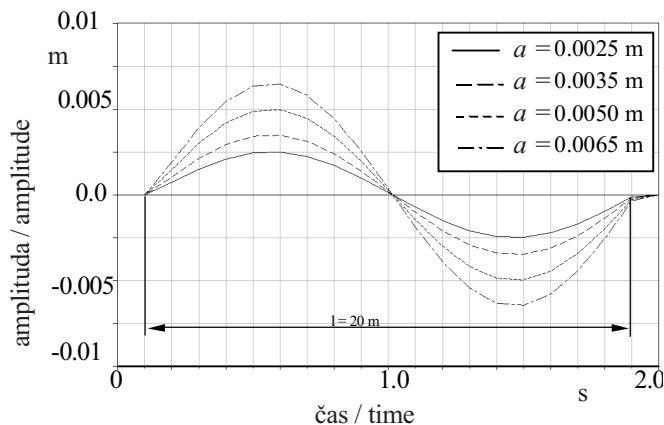
### 3 THE METHOD OF SIMULATION

Time-history simulations were performed under the conditions of sinusoidal lateral irregularity on both the left- and right-hand rails (Fig. 1).

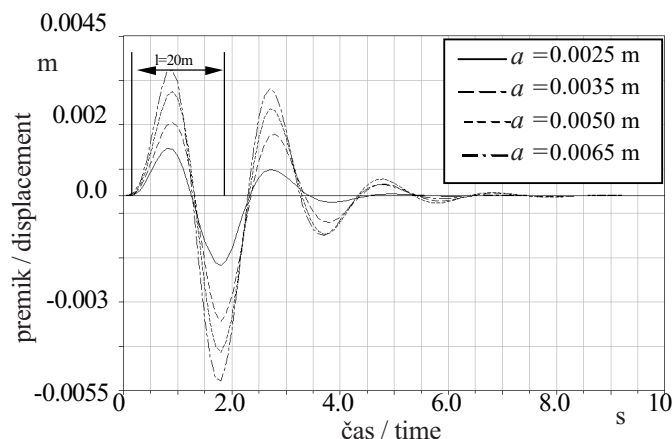
When the rolling stock moves along the lateral road irregularities, the body acquires horizontal oscillations with different amplitudes and frequencies, the values of which depend on the following factors [10]:

- the speed of the wagon;
- the mechanical properties of the structural components;
- the horizontal deviations of the rails;
- the distribution of the irregularities on both rails.

For the study of the dynamic characteristics of the truck the body's lateral vibrations were analyzed at different speeds, from 10 km/h to 160 km/h, on the sinusoidal irregularities in the plane of different parameters (the wavelength  $l$  is 10 m, 20 m, 30 m and 40 m; the wave amplitude  $a$  is 0.0025 m, 0.0035 m, 0.005 m and 0.0065 m).



Sl. 3. Funkcije, ki določajo železniške tire pri hitrosti 40 km/h  
Fig. 3. Railway rails-defining functions when the speed is 40 km/h



Sl. 4. Spremembe premikov zaradi bočnih vibracij karoserije potniškega vagona, ki se giblje s hitrostjo 40 km/h na padajočem delu sinusoidne oblike,  $l = 20$  m

Fig. 4. Changes of lateral vibration displacements of the body of a passenger wagon that moves with a speed of 40 km/h on the slump  $l = 20$  m, of sinusoid shape

Predpostavljali smo, da je proga popolnoma toga; v najinih izračunih nismo upoštevali deformacij tirov.

Slika 3 prikazuje funkcije sinusoidnih nepravilnosti (valovna dolžina  $l = 20$  m; valovna amplituda  $a$  je: 0,0025 m, 0,0035 m, 0,005 m in 0,0065 m), katerih časovna odvisnost ustreza proženju pri hitrosti vagona 40 km/h.

Po opisu prožilnega učinka na dinamični model, izvedenega s funkcijami, ki določajo nepravilnosti proge, je bilo mogoče analizirati vrednosti amplitude in pospeška nihanj vozlišča karoserije. Izbrana točka vozlišča je na sredini okvirja nad prvim podvozjem. Višina vozlišča je v višini človeških ramen.

Ko proga sproži gibanje preučevanega dinamičnega modela in s tem določi sinusoidno funkcijo, z upoštevanjem različnih hitrosti vagona, lahko dobimo amplitudne vrednosti sprememb in pospeške preučevane karoserije potniškega vagona.

Za določitev odvisnosti največjih amplitudnih vrednosti sprememb in pospeškov na izbranih točkah karoserije od hitrosti vagona, izraženih s sinusoidno funkcijo, ki jo določa proga, je bilo treba izdelati diagrame, ki predstavljajo te odvisnosti (gl. sliki 5 in 6).

Če analiziramo sosledje sprememb vrednosti prečnega nihanja karoserije, prikazanega na sliki 5, razumemo, da je karoserija, ki se giblje po vzdolžnih nepravilnostih v obliki sinusoide različnih amplitudnih vrednosti in valovnih dolžin, izpostavljena največjemu vzdolžnemu nihanju, ko je

We assume that the track is absolutely rigid and deformations of the rail were not taken into account in our calculations.

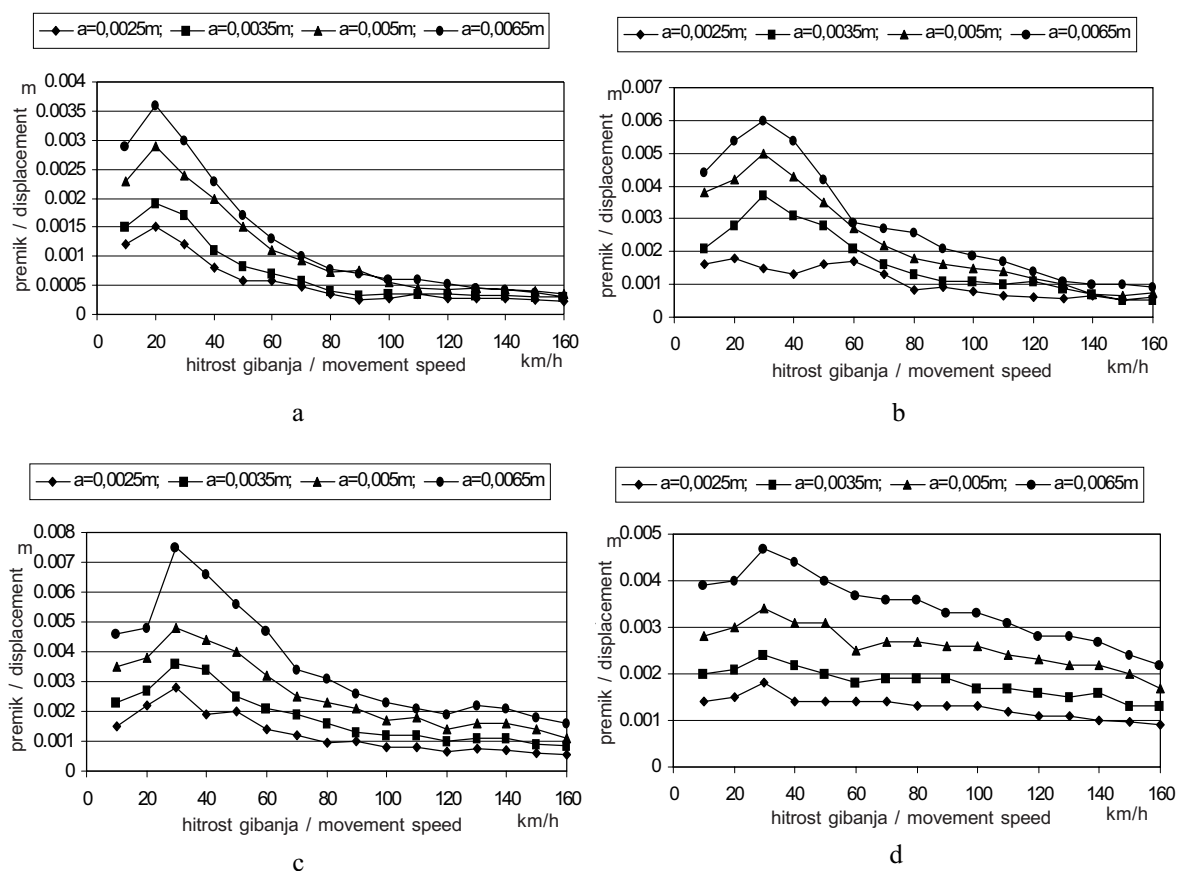
Figure 3 shows the graphs of the sinusoidal irregularity functions (wavelength  $l = 20$  m; the wave amplitude  $a$  is 0.0025 m, 0.0035 m, 0.005 m and 0.0065 m), the variation dependencies of which, with respect to time, correspond to the actuation when the speed of the wagon is 40 km/h.

After the actuation impact on the created dynamic model of the calculation was described by the functions defining the road irregularities, the amplitudes and accelerations of the oscillations of the body node were analysed. The chosen point of the node is in the middle of the frame above the first carriage. The node height is the same level as a human shoulder.

When the analysed dynamic model is actuated by the road, defining the sinusoidal function, the amplitude values of the changes and accelerations of the analysed passenger-wagon body are obtained by applying different speeds of the wagon.

In order to determine the dependencies of the maximum amplitude values of the changes and accelerations of the analysed wagon-body points on the speed of the wagon, with the road-defined sinusoidal function, some diagrams were made to represent the dependencies (see Figs. 5 and 6).

By analyzing the schedules of the changes of the values of the cross-section oscillations of the carriage body shown in Figure 5, it is clear that the car body, moving through longitudinal irregularities with a sine-wave form of different amplitudes and wavelengths, reaches the largest longitudinal fluctuations when the



Sl. 5. Odvisnosti največjih vrednosti bočnih premikov potniškega vagona s podvozjem tipa KVZ CNII od hitrosti, ko na potniški vagon vplivajo bočne nepravilnosti sinusoidne oblike v ravnini  
 Fig. 5. Dependencies of the maximum values of lateral displacements of the passenger wagon with the KVZ CNII-type bogies on speed when a passenger wagon is affected by the lateral irregularities of the sinusoidal shape in the plane

valovna dolžina sinusoidnega prečnega nihanja  $l = 10\text{ m}$  (sl. 5 a). Vagon se giblje s hitrostjo  $20\text{ km/h}$  (pri različnih amplitudnih vrednostih nepravilnosti). Ko pa je dolžina  $l = 20\text{ m}$ ,  $30\text{ m}$  in  $40\text{ m}$  (sl. 5 b do d), se vagon giblje s hitrostjo  $30\text{ km/h}$  (pri različnih amplitudnih vrednostih nepravilnosti).

Če primerjamo največje vrednosti premikov, ki jih povzročajo nihanje in so prikazane s krivuljami slike 5, z nastavljenimi zneski nepravilnosti, ki imajo amplitudne vrednosti sinusoide, lahko vidimo, da so pri valovni dolžini sinusoide  $l = 10\text{ m}$  (sl. 5 a) največje vrednosti premika povzročene z nihanjem za 54 do 60 % manjše od vrednosti amplitude površine vzbujanja (pri hitrosti vagona  $20\text{ km/h}$ ). Kadar je valovna dolžina sinusoide  $l = 20\text{ m}$  (sl. 5 b), lahko največje vrednosti premika nihajočega vagona primerjamo z vrednostmi amplitude nepravilnosti (pri hitrosti vagona  $30\text{ km/h}$ ). Kadar je valovna dolžina

wavelength of the sine-wave cross-section oscillations is  $l = 10\text{ m}$  (Fig. 5 a). The car moves with a speed of  $20\text{ km/h}$  (at different values of the amplitudes of irregularities). As the length is  $l = 20\text{ m}$ ,  $30\text{ m}$  and  $40\text{ m}$  (Fig. 5 b to d), the car moves with a speed of  $30\text{ km/h}$  (at different values of the amplitudes of irregularities).

Comparing the maximum displacement values of the oscillations shown in the curves in Figure 5 with the preset values of the irregularities with sine-wave amplitudes, we can see that at a wavelength of the sinusoid of  $l = 10\text{ m}$  (Fig. 5 a), the maximum values of the displacement of the oscillations are 54–60 % less than the values of the amplitudes of the excitation surface (when the car moves with a speed of  $20\text{ km/h}$ ). When the wavelength of the sinusoid is equal to  $l = 20\text{ m}$  (Fig. 5 b), the maximum values of the displacement of the body oscillations are comparable to the values of the irregularity amplitudes (as the car moves with a speed of  $30\text{ km/h}$ ). When the wavelength of the

sinusoide  $l = 30$  m (sl. 5 c), največje vrednosti amplitude nihanja presežejo vrednosti amplitude nepravilnosti za 12 do 15 %.

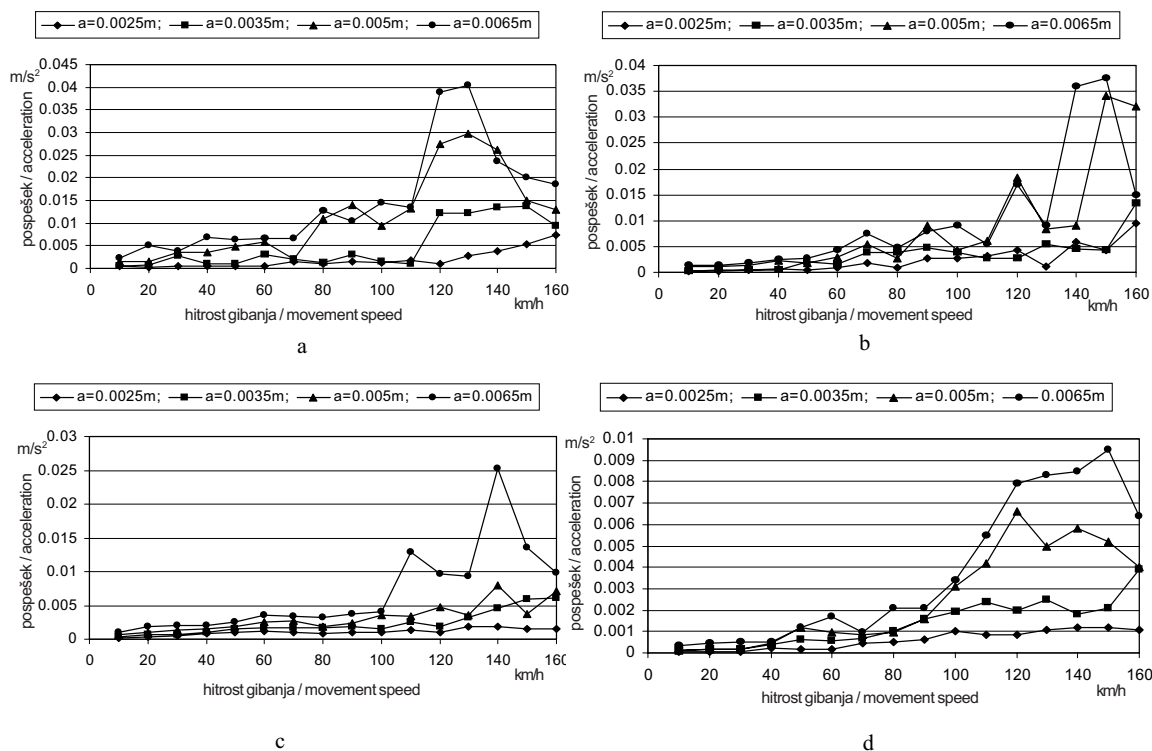
Kadar valovna dolžina sinusoide doseže  $l = 40$  m (sl. 5 d), se vrednosti premikov prečnih nihanj vagona povečajo, nakar se te vrednosti pričnejo rahlo zniževati. Vrednost največjega premika nihanja (pri hitrosti vagona 30 km/h) doseže 71 % do 73 % nastavljenih iznosov amplitude nepravilnosti vzbujanja. To manjšo spremembo vrednosti največjega premika (v primeru, ko je hitrost vagona spremenjena zaradi nepravilnosti z nastavljenimi zneski) lahko razložimo z dejstvom, da pri prekoračitvi dolžine vzdolžne sinusoide nepravilnosti,  $l = 40$  m, (pri nastavljenih zneskih amplitude sinusoide) sinusoida izzveni v ravno črto.

Kakor kažejo odvisnosti na sliki 5, se pri vagonu, ki se giblje s hitrostjo 10 in 50 km/h, nihanje, ki ga povzroči prožilni učinek, približa prostemu nihanju in se zato vrednosti amplitude povečujejo. Kot posledica prožilnega učinka se amplitude sprememb začnejo zmanjševati, ko je presežena hitrost 60 km/h.

sinusoid is equal to  $l = 30$  m (Fig. 5 c), the maximum values of the oscillation amplitudes exceed the values of the irregularity amplitudes by 12 to 15 %.

When the wavelength of the sinusoid reaches  $l = 40$  m (Fig. 5 d) the displacement values of the cross-section oscillations of the car increase, after which they start to decrease insignificantly. The value of the maximum displacement of oscillations (as the car moves with a speed of 30 km/h) reaches 71–73 % of the preset values of the amplitudes of the excitation irregularities. This minor change in the values of maximum displacement (when the speed of the wagon is different due to irregularities with the preset values) can be explained by the fact that when exceeding the length of the longitudinal sine wave of irregularities of  $l = 40$  m (at preset values of amplitudes of the wave) the sinusoid practically turns into a straight line.

As the dependencies in Figure 5 show, when the wagon moves at speeds of 10 and 50 km/h, the oscillations caused by the actuation impact are close to the free oscillations, and therefore the amplitudes are increasing. As a result of this actuation impact, the amplitudes of the changes start to decrease when a speed of 60 km/h is exceeded.



Sl. 6. Odvisnosti največjih vrednosti bočnih pospeškov potniškega vagona s podvozjem tipa KVZ CNII od hitrosti v primeru, ko na vagon vpliva bočna nepravilnost sinusoidne oblike v ravnini

Fig. 6. Dependencies of the maximum values of lateral accelerations of the passenger wagon with the KVZ CNII-type bogies on speed when a passenger wagon is affected by the lateral irregularities of the sinusoidal shape in the plane

Če analiziramo krivulje pospeškov bočnih nihanj, prikazanih na sliki 6, vidimo, da se največji pospeški nihanja pojavijo, ko sta dolžini sinusoid vzdolžnih nepravilnosti naslednji:  $l = 10$  m (sl. 6 a) in  $l = 20$  m (sl. 6 b); pri tem pa je sinusna amplituda nepravilnosti:  $a = 0,0065$  m. V obeh primerih je največja vrednost pospeška približno  $0,04 \text{ m/s}^2$  pri hitrosti vagona  $130 \text{ km/h}$  (sl. 6 a) in  $150 \text{ km/h}$  (sl. 6 b).

Omeniti je treba, da se v vseh primerih, prikazanih na sliki 6, največja vrednost pospeškov vzdolžnega nihanja vagona z amplitudo  $a = 0,0025$  m in  $s = 0,0035$  m povečuje postopno. Ob povečanju amplitude  $a$  do vrednosti  $0,005$  m in  $0,0065$  m opazimo precejšnje povečanje največjih pospeškov, kadar vagon preseže hitrost  $100$  do  $110 \text{ km/h}$ .

#### 4 SKLEPI

V prispevku sva analizirala bočne dinamične pojave v vagonu, ki se giblje po tračnicah z nepravilnostmi sinusoidne oblike. Ocenila sva vpliv parametrov bočnih nepravilnosti sinusoidne oblike (valovna dolžina  $l$  je  $10$  m,  $20$  m,  $30$  m, in  $40$  m; valovna amplituda  $a$  je  $0,0025$  m,  $0,0035$  m,  $0,0050$  m, in  $0,0065$  m) in hitrosti vagona  $10$  do  $160 \text{ km/h}$  na bočno vibriranje karoserije. Nato sva ustvarila simulacijo interaktivne dinamike med progo in vagonom.

Po izvedbi računalniške analize je mogoče določiti optimalne hitrosti vagona in le te hitrosti smejo biti uporabljene na predelu prevladujočega gibanja posameznih segmentov.

Izsledki raziskave bodo pomagali izboljšati dinamične značilnosti vagona, tj. zmanjšati škodljivi vpliv gibanja vagona na udobje potnikov.

Med analizo železniške proge z uporabo vagonskega modela sva med naključno porazdeljenostjo nepravilnosti opazila tudi nekatere pravilnosti.

Izvedena analiza naju je vodila do naslednjih sklepov:

1. Izbrani model lahko, celo v poenostavljeni obliki, omogoči natančne rezultate in ga zato lahko uporabimo za reševanje problemov, ki nastajajo v zapletenih razmerah zunanjih vplivov.
2. Kadar hitrost vagona preseže  $100 \text{ km/h}$ , se amplituda pospeška poveča.

Having analysed the curves of the accelerations of the longitudinal oscillations shown in Figure 6 we see that the maximum accelerations of the oscillations are reached when the lengths of the sine waves of the longitudinal irregularities are equal to  $l = 10$  m (Fig. 6 a) and  $l = 20$  m (Fig. 6 b), while the sine-wave amplitude of the irregularities is equal to  $a = 0.0065$  m. In both cases the maximum values of the accelerations reach about  $0.04 \text{ m/s}^2$  when the car moves with speeds of  $130 \text{ km/h}$  (Fig. 6 a) and  $150 \text{ km/h}$  (Fig. 6 b).

It should be mentioned that in all the cases shown in Fig. 6 the maximum values of the accelerations of the longitudinal oscillations of the carriage body at amplitudes of  $a = 0.0025$  m and  $a = 0.0035$  m increase gradually. With an increase in the amplitude  $a$  up to  $0.005$  m and  $0.0065$  m, a substantial growth in the maximum accelerations is observed when the car exceeds speeds of  $100$  to  $110 \text{ km/h}$ .

#### 4 CONCLUSIONS

In this paper we have analysed the lateral dynamical processes when a wagon moves along irregularities of a sinusoidal shape on both the left- and right-hand rails. We evaluated the influence of the parameters of the lateral irregularities of the sinusoidal shape (wavelength  $l$  equal to  $10$  m,  $20$  m,  $30$  m, and  $40$  m; wave amplitude  $a$  equal to  $0.0025$  m,  $0.0035$  m,  $0.0050$  m, and  $0.0065$  m) and wagon speeds of  $10 \text{ km/h}$  to  $160 \text{ km/h}$  on the lateral vibrations of the body. Then the interaction dynamics of the road and the wagon was modelled.

After performing the computational analyses it is possible to determine the optimum speeds of the wagon movement, and only these speeds should be the allowed subject to the dominated corrugations in the particular segments.

This would allow us to improve the dynamic properties of a wagon; thereby, reducing the harmful impact of the wagon on the passenger's comfort.

When analysing lanes of road - measuring wagon, among random distribution of irregularities some regularities were noticed.

The performed analysis led to the following conclusions:

1. The used model, even in its simplified form, can provide accurate results, and therefore may be applied to solve tasks with complex conditions of external impact;
2. When the speed of a wagon exceeds  $100 \text{ km/h}$ , the amplitudes of the acceleration increase.



5 LITERATURA  
5 REFERENCES

- [1] Dukkipati, R.V., S.S. J Narayana (2001) Mechanism and machine theory, No36, 577–587.
- [2] Dukkipati, R.V. (2002) *JSME Int. J. Series C-Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing*, No45(1), 168-175.
- [3] Andersson, C. (1997) Railway turnout vibrations-division of solid mechanics. *Chalmers University of Technology*, Report EX.
- [4] Вериго, М.Ф., Коган А.Я. (1986) Взаимодействие пути и подвижного состава. *Транспорт*, Москва.
- [5] Ушкалов, В.Ф., Резников Л.М и др. (1989) Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств. *Наукова думка*, Киев.
- [6] Schiehlen, W.O. (1988) Dynamics of high-speed vehicle. *Springler-Verlag*, Wien-New-York.
- [7] Вершинский, С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. (1991) Динамика вагона. *Транспорт*, Москва.
- [8] Чертежи тележки КВЗ цельнометаллических пассажирских вагонов. *Транспорт*, Москва (1967).
- [9] Шадур, Л.А., Челноков И.И и др. (1980) Вагоны. *Транспорт*, Москва.
- [10] Skvireckas, R., Ž. Bazaras (2002) Proceedings of the V<sup>th</sup> International Scientific Conference for Middle and Eastern European Countries: Railway wheel sets. *Silesian Technical University*, Katowice, Poland.

Naslova avtorjev: prof.dr. Žilvinas Bazaras  
Tehnična univerza Kaunas  
Oddelek za transportno tehniko  
Kestucio str. 27  
LT-44025 Kaunas-4, Litva  
Zilvinas.Bazaras@ktu.lt

Authors' Address: Prof.Dr. Žilvinas Bazaras  
Kaunas Univ. of Technology  
Dept. of Transport Engineering  
Kestucio str. 27  
LT-44025 Kaunas-4, Lithuania  
Zilvinas.Bazaras@ktu.lt

prof.dr. Mindaugas Leonavičius  
Tehnična univ. Vilnius Gediminas  
Oddelek za trdnost materialov  
Sauletekio al. 11  
LT-10223 Vilnius-40, Litva  
minleo@fm.vtu.lt

Prof.Dr. Mindaugas Leonavičius  
Vilnius Gediminas Technical Univ.  
Dept. of Strength of Materials  
Sauletekio al. 11  
LT-10223 Vilnius-40, Lithuania  
minleo@fm.vtu.lt

Prejeto: 21.12.2004  
Received:

Sprejeto: 24.2.2005  
Accepted:

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

## Strokovna literatura - Professional Literature

### Ocena knjige - Book Review

#### M. Požnel: Trojezični strojniški slovar

Zal.: Tehniška založba Slovenije, 2005.  
Obseg: format 17 × 24 cm,  
trije deli: 223 strani, 214 strani in 215 strani  
Cena: 20.000 SIT

Delo je sestavljeno iz treh samostojnih knjig: slovensko-angleško-nemški slovar, angleško-nemško-slovenski slovar in nemško-angleško-slovenski slovar. Na začetku vsakega dela je več preglednic: napisani so avtorji, ki so opravili pregled slovarja po posameznih področjih, sledijo preglednice z veličinami in enotami SI in nato preglednica s področji uporabe slovarja. Na koncu vsakega dela je dodana še preglednica z uporabljenimi tehnično literaturo: napisani so trije slovenski in tuj avtor, večji del uporabljene literature pa predstavljajo različni tehnični standardi. Očitno je avtor trojezičnega slovarja črpal slovenske izraze predvsem iz teh standardov. Posledica tega je, da je slovar zelo enostranski in ga težko imenujem "strojniški".

Manjkajo besede iz obdelovalne tehnike, predvsem pa izrazi iz energetske in procesne tehnike, ki jih je zbral prof. Černigoj v svojih slovarjih, čeprav so njegova dela v trojezičnem slovarju omenjena pri

strokovni literaturi. Iz tega strojniškega področja skoraj ni gesel, zastopani so le motorji z notranjim zgorevanjem. Manjkajo na primer osnovni pojmi: anergija, eksnergija (izraza, ki jih je v svetovno zakladnico znanja prispeval prav naš prof. Rant), entalpija, entropija. Nadalje klasični izrazi: energetika, procesna tehnika, potencialna, kinetična, notranja energija, prevod in prenos toplote, parni kotel, zgorevalna toplota, dimni plini, toplotni tok, toplotna moč. Manjkajo besede: batni (volumenski) in turbinski stroji (na primer: parna, plinska, vodna turbina, vetrnica, propeler), energetski, delovni in pogonski stroji, toplotni in hidravlični itd.

Trojezični strojniški slovar je tako postal neuravnotežen, čeprav obsega približno 10.000 gesel. Tudi sama zgradba slovarja je neobičajna, saj ni grajen na osnovi pomenskih gnezd.

Kljub naštetih pomanjklivostim je pričujoči trojezični slovar dobrodošla pomoč strokovnjakom in osnova za nadaljnje delo. Upam, da bo avtor tega slovarja svoje delo nadaljeval, razširil izrazoslovaje na vsa področja strojništva in delo prilagodil sodobni zgradbi slovarjev.

prof.dr. Matija Tuma

### Nove knjige - New books

#### AIAA - American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston

Pamadi B.: Performance, stability, dynamics, and control of airplanes, Second Ed., 780 str., 116,95 \$

Zipfel P.: Fundamentals of six degrees of freedom aerospace simulation and analysis in Fortran and C++, 265,00 \$

Colgren R.: Applications of robust control to nonlinear systems, 185 str., 61,50 \$

Chernyi G.G., et al.: Physical and chemical processes in gas dynamics - Vol. 2 (Physical and chemical kinetics and thermodynamics of gases and plasmas), 300 str., 65,50 \$

Chernyi G.G., et al. (ur.): Physical and chemical processes in gas dynamics (Cross sections and rate constants), 320 str., 65,50 \$

#### EE - Edward Elgar Publishing, Cheltenham

Meier P., Munasinghe M.: Sustainable energy in developing countries (Policy analysis and case studies), 304 str., 69,95 £

Schrattenholzer L., Miketa A., Riahi K., Roehrl R.A.: Achieving a sustainable global energy system (Identifying possibilities using long-term energy scenarios), 240 str., 59,95 £

Green K., Miozzo M., Dewick P. (ur.): Technology, knowledge and the firm (Implications for strategy

- and industrial change), 336 str., 69,95 £
- Chen C.-H., Shih H.-T.: High-tech industries in China, 160 str., 39,95 £
- Takeyama L., Gordon W., Towse R. (ur.): Developments in the economics of copyright (research and Analysis), 256 str., 55,00 £
- Boyer R.: The future of the economic growth (As new becomes old), 192 str., 55,00 £
- Joskow P. L., Waterson M. (ur.): Empirical industrial organization, 1072 str., 250,00 £
- Becattini G.: Industrial district (A new approach to industrial change), 224 str., 49,95 £
- Geels F. W.: Technological transitions and system innovations (A co-evolutionary and socio-technical analysis), 352 str., 79,95 £
- Georghiou L., Rigby J., Cameron H. (ur.): Evaluating the impact of technology and research (The theory nad practice of socio-economic assessment), 208 str., 49,95 £
- Hirooka M.: Innovation dynamism and economic growth (A nonlinear perspective), 256 str. 55,00£
- Aichholzer G., Burkert H. (ur.): Public sector information in the digital age (Between markets, public management and citizens' rights), 320 str., 69,95 £
- Clark R., Ma J. (ur.): Recruiting, retention and retirement in higher education (Building and managing the faculty of the future), 224 str., 49,95 £
- Mulder P.: The economics of technology diffusion and energy efficiency, 304 str., 65,00 £

#### **John Wiley & Sons, Chichester**

- Li W.: Risk assessment for power systems (Models, methods and applications), 300 str., 58,95 £
- Allen S. M., Balluffi R. W., Carter W. C.: Kinetic processes in materials, 500 str., 47,50 £
- Bhatti M. A.: Fundamental finite element analysis (with Mathematica and MatLab computations), 800 str., 71,95 £
- Müller J.: Controlling with SIMATIC (Practice book for SIMATIC S7 and SIMATIC PCS7 control systems), 165 str., 32,50 £
- Lehr J. H.: Water encyclopedia (Four volume set),

4080 str., 585,00 £

- Staszewski W. J.: Wavelets for mechanical engineering applications, 450 str., 60,00 £
- Soong T.T.: Handbook of structural control (Active, hybrid and semiactive control), 416 str., 75,00 £
- McBride G. B.: Using statistical methods for water quality management (Issues, problems and solutions), 352 str., 55,95 £
- Manring N.: Hydraulic control systems, 464 str., 75,50 £
- Banerjee S.: Dynamics for engineers, 320 str., 75,00 £
- Farrell Y. A., Polycarpou M. M.: Approximation based control (Unifying neural, fuzzy and traditional adaptive approximation approaches), 500 str., 48,95 £
- Pigan R., Metter M.: Automating with PROFINET (Industrial communication based on industrial ethernet), 200 str., 32,50 £
- Varadan V. K., Vinoy K. J., Gopalakrishnan S.: Smart material systems and MEMS (Design and development methodologies), 512 str., 75,00 £

#### **SMEITS - Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije, Beograd**

- Živković B., Stajić Z.: Mali termotehnički priručnik, 450,00 d
- Zarić S.: Priručnik iz industrijske pneumatike, 300 d
- Zarić S.: Priručnik iz industrijske hidraulike, 300 d
- Grahovac N.: Priručnik za vlažan I komprimovani vazduh, 250 d
- Bogner M. (ur.): Termotehničar (I, II)

#### **Springer, Berlin**

- Petkov V.: Relativity and the nature spacetime, 280 str., 39,95 €
- Scott-Sabic V.: Logistik-Wörterbuch/Dictionary of logistics (Deutsch-Englisch/ Englisch-Deutsch), 480 str., 49,95 €
- Wassermann O.: Das intelligente Unternehmen (Prozesse beschleunigen, Menschen begeistern), 281 str., 39,95 €
- Heillingrath B., Gehr F. (ur.): Logistik in der Automobilzulieferindustrie, 200 str., 69,95 €
- Oertel H.: Prandtl's essentials of fluid mechanics, 723 str., 79,95 €

## Osebnosti - Personal Events

### 80. obletnica prof.dr. Janeza Dekleve - 80th Anniversary of Prof.Dr. Janez Dekleva

Nedavno je profesor dr. Janez Dekleva, dolgoletni profesor Fakultete za strojništvo v Ljubljani izpolnil osemdeset zelo razgibanih, pa tudi viharnih let. Rodil se je v Ljubljani v družini očeta (gradbenega inženirja) iz Vremskega Britofa na Primorskem in matere (gosposkinje) iz Ribnice na Dolenjskem. Osnovno šolo je končal na Vadnici in maturiral na Prvi državni realni gimnaziji v Ljubljani. Bil je odličen učenec. V prostem času je hodil k telovadbi v Narodni dom. Vse počitnice je preživel v krogu materinega sorodstva v zanj zelo priljubljeni Ribnici na Dolenjskem.

Leto njegove mature je bilo 1943., t. j. vojno leto. Ker je odraščal v narodnostno zavedni in socialno čuteči družini, se je po maturi pridružil narodno-osvobodilnemu gibanju. Najprej je bil borec Tomšičeve brigade, kasneje organizator in eden od vodij partizanskega gibanja v Južnoprimorskem okrožju, kjer je zmagovito končal svoj boj za osvoboditev Primorske.

Leta 1945 se je vpisal na Tehnično fakulteto – oddelek za elektrotehniko – šibki tok Univerze v Ljubljani. Leta 1949 je diplomiral z odličnim uspehom z nalogo: Paralelno vzbujujana antena. Že med študijem ga je k sodelovanju povabil njegov mentor prof. dr. Mirjan Gruden, kasneje pa tudi akademik prof. dr. Anton Peterlin, ki je vodil gradnjo novega fizikalnega Inštituta Jožef Stefan in navdušil mladega diplomanta zanj. Odločil se je za svojega mentorja, kateremu je najprej obljubil sodelovanje. Tako je bil po opravljeni diplomi izbran za asistenta pri prof. dr. Mirjanu Grudnu na Oddelku za šibki tok Tehnične fakultete – Oddelka za elektrotehniko Univerze v Ljubljani.

Po kratkem asistentskem stažu je na zahtevo republiških in zveznih vladnih organov odšel v Beograd na zvezno UDB-o, kot specialist za antene. Tam ga je presenetila z ničemer utemeljena aretacija



30. decembra 1949. Sledil je osem mesečni zapor v znani Beograjski ječi Glavnjači (od 30. dec. 1949 do avg. 1950), nato pa je preživel še leto dni (od avg. 1950 do avg. 1951) na Golem otoku.

Po povratku v Ljubljano se je proti koncu leta 1951 zaposlil na Inštitutu Jožef Stefan (IJS), kjer je vodil Laboratorij za masno spektrometrijo. Njegova prva naloga je bila povezana s problematiko radiofrekvenčnih masnih spektrometrov, ki so se prav v tistem času pojavili v strokovni literaturi in kjer so iskali načine za izboljšavo njihove resolucije. Ker pa so kemiki na IJS rabili masne spektrometre z visoko resolucijo, je laboratorij izdelal klasični magnetni masni spektrometer za njihove potrebe. Izgradnja tega masnega spektrometra je bila uspešna, tako da so nekaj primerkov te aparature izdelali tudi za druge raziskovalne inštitute v Jugoslaviji. Žal pa trud, da bi industrija prevzela nadaljnjo izdelavo klasičnih magnetnih masnih spektrometrov, ni uspel. Ob 40. obletnici IJS je septembra 1994 za svoje pionirsko delo pri razvoju spektrometrije v Sloveniji prejel zahvalno listino inštituta.

Problematika resolucije radiofrekvenčnih masnih spektrometrov je bila tudi tema njegove doktorske disertacije, ki jo je uspešno obranil leta 1956.

Leta 1955 je bil član jugoslovanske delegacije na Prvi konferenci za miroljubno uporabo jedrske energije v Ženevi. V letih 1956 do 1960 je bil znanstveni sodelavec fizikalnega oddelka Univerze Harvard in Tehnološkega inštituta v Massachusettsu (MIT, Cambridge, Mass, USA). Bil je član znanstvenega koordinacijskega odbora za raziskave in razvoj elektronskega sinhrotrona za 6BeV za potrebe obeh omenjenih univerz, ki ga je vodil prof. M. S. Livingston. Ta pospeševalnik je bil uspešno zgrajen. V ZDA je tudi predaval klasično elektrodinamiko. Leta 1957 je bil izvoljen za

znanstvenega sodelavca, leta 1960 pa za višjega znanstvenega sodelavca NIJS. Tam je v letih 1960 in 1963 vodil oddelek za pospeševalnike in elektrofizikalne instrumente.

Odhod akademika A. Peterlina z IJS je vplival tudi na jubilaranta, tako da je sprejel povabilo Elektrotehnične fakultete v Splitu, kjer je bil izvoljen za izrednega profesorja. V Splitu je v letih 1963 do leta 1968 predaval teoretsko elektrotehniko in se ukvarjal z raziskavami pasivnih in aktivnih mikrovalovnih elementov. V letih 1964 do 1966 je bil tudi dekan fakultete.

Njegovo delo v Splitu je bilo zelo uspešno, kar kažeta dve priznanji vodstva te fakultete. Ob deseti obletnici ustanovitve fakultete leta 1970 mu je njen predsednik sveta prof. Antun Hruš podelil svečano diplomo, kot priznanje za dosežene uspehe in napore za njen razvoj. Trideset let kasneje, leta 2000, pa mu je dekan fakultete prof. dr. Igor Duplančič podelil zahvalnico v znak priznanja za dolgoletno predano delo in prispevek k razvoju fakultete, ki se je takrat že imenovala Fakulteta za elektrotehniko, strojništvo in ladjedelništvo.

Kot profesor Elektrotehnične fakultete v Splitu je imel pogoste stike z Zagrebom. Na podlagi priznanj, ki jih je dobil za delo na ETF v Splitu in sodelovanja s profesorji iz Zagreba, si je med njimi pridobil velik ugled. Sledilo je povabilo na Visoko tehnično šolo Kopenskih sil JLA v Zagrebu, ki ga je sprejel in kjer je vodil katedro za elektroniko in podiplomski študij iz operacijskih raziskav. Leta 1969 je bil imenovan za člana znanstvenega sveta oboroženih sil JLA.

V tem času je dobil novo povabilo, da postane direktor Prometnega inštituta v Ljubljani. Ker ga je vleklo domov, se je vrnil v Slovenijo. Leta 1970 je postal direktor Prometnega inštituta, kjer je vodil raziskave problemov, povezanih s prometom v

slovenskem prostoru ter z gradnjo prometnih informacijskih sistemov, posebej za železnico. Ker ga je pri tem vodila želja, da bi inštitut oblikoval v strokovno visoko kvalificirano organizacijo, je k sodelovanju povabil skupino univerzitetnih profesorjev s področja matematike, elektrotehnike in ekonomije.

V letih 1968 do 1970 je predaval Operacijske raziskave na podiplomskem študiju Elektrotehnične fakultete v Zagrebu, od leta 1972 pa tudi na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani, kjer je bil l. 1973 izvoljen za rednega profesorja. Od takrat do upokojitve januarja 1993 je vodil pedagoško in raziskovalno delo na področju upravljanja proizvodnje. To delo je odlikovalo tesno sodelovanje z mnogimi slovenskimi uspešnimi industrijskimi organizacijami, kar je omogočilo temeljito raziskovanje in poznavanje stanja v naši industriji. O tem je nastala obsežna znanstvena literatura.

Razen v raziskovalni in pedagoški sferi je vložil nemalo naporov tudi v organih in organizacijah, ki so reševali pomembna družbena in družbeno-strokovna vprašanja.

Prof. dr. Janez Dekleva je bil ves čas svojega raziskovalnega in pedagoškega obdobja skrben, odgovoren in dobrohoten do vseh, ki smo z njim sodelovali. Ves čas ga je navdajala skrb za pravočasno, kakovostno in učinkovito znanstveno raziskovalno delo za razvoj in razcvet naše industrije in ljudi. Kot izpostavljen človek ni vedno naletel na naklonjenost, je pa vseskozi ostal zvest svojim načelom.

Ob visokem jubileju mu želimo mnogo zdravja in veselja, posebej ob raziskovalnem delu.

prof.dr. Marko Starbek  
doc.dr. Zoran Kariž

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

### DOKTORATI

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

dne 27. maja 2005: **mag. Simon Muhič**, z naslovom: "Porazdelitev in kakovost zraka pri lokalni klimatizaciji" in **mag. Tom Bajcar**, z naslovom: "Modeliranje tokovnih karakteristik v rotirajočem difuzorju".

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru so z uspehom zagovarjali svoje doktorske disertacije:

dne 17. maja 2005: **mag. Tatjana Fulder**, z naslovom: "Model razvoja sposobnosti v industrijskih grozdih",

dne 19. maja 2005: **mag. Jožef Predan**, z naslovom: "Gonilna sila razvoja razpoke v nehomogenem materialu" in



*dne 31. maja 2005: mag. Gorazd Bombek*, z naslovom: "Merjenje hitrosti abrazivnih delcev v dvofaznih tokovih".

S tem so navedeni kandidati dosegli akademsko stopnjo doktorja znanosti.

#### MAGISTERIJI

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

*dne 30. maja 2005: Vojko Leskovar*, z naslovom: "Analiza tehnoloških parametrov utopnega kovanja skupine geometrijsko podobnih izkolkov".

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

*dne 18. maja 2005: Mihael Hameršak*, z naslovom: "Razvoj modela avtomatskega zajemanja podatkov pri vzdrževanju".

S tem sta navedena kandidata dosegla akademsko stopnjo magistra znanosti.

#### DIPLOMIRALISO

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

*dne 30. maja 2005: Pavel FURLAN, Franci ŠTUPICA, Andrej TOMINEC, Albert TRNOVŠEK.*

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

*dne 26. maja 2005: Denis KOVAČ.*

\*

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

*dne 12. maja 2005: Tomo DUKARIĆ, Franc GOMBAČ, Mitja KAMIN, Tomaž KOVAČIČ, Andraž KRŽIŠNIK, Klemen PENKO, Rok REMIC.*

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

*dne 26. maja 2005: Iztok CESTNIK, David EKART, Marko GRAŠIČ, Simon HAMONAJEC, Boštjan KRAJNC, Marko LOBE, Stanislav MARKOJA, Dušan MURGELJ, Matej ROBLEK, Bojan ŠPES.*

## Navodila avtorjem - Instructions for Authors

Članki morajo vsebovati:

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

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

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

### VSEBINA ČLANKA

Članek naj bo napisan v naslednji obliki:

- Naslov, ki primerno opisuje vsebino članka.
- Povzetek, ki naj bo skrajšana oblika članka in naj ne presega 250 besed. Povzetek mora vsebovati osnove, jedro in cilje raziskave, uporabljeno metodologijo dela, povzetek rezultatov in osnovne sklepe.
- Uvod, v katerem naj bo pregled novejšega stanja in zadostne informacije za razumevanje ter pregled rezultatov dela, predstavljenih v članku.
- Teorija.
- Eksperimentalni del, ki naj vsebuje podatke o postavitvi preskusa in metode, uporabljene pri pridobitvi rezultatov.
- Rezultati, ki naj bodo jasno prikazani, po potrebi v obliki slik in preglednic.
- Razprava, v kateri naj bodo prikazane povezave in posplošitve, uporabljene za pridobitev rezultatov. Prikazana naj bo tudi pomembnost rezultatov in primerjava s poprej objavljenimi deli. (Zaradi narave posameznih raziskav so lahko rezultati in razprava, za jasnost in preprostejše 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 številke<sup>1</sup>.

### OBLIKA ČLANKA

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

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

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

Papers submitted for publication should comprise:

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

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

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

### THE FORMAT OF THE PAPER

The paper should be written in the following format:

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

### THE LAYOUT OF THE TEXT

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

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

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

### Enote in okrajšave

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

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

### Slike

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

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

**Vse označbe na slikah morajo biti dvojezični.**

### Preglednice

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

**Vsi podnaslovi preglednic morajo biti dvojezični.**

### Seznam literature

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

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

### Podatki o avtorjih

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

### SPREJEM ČLANKOV IN AVTORSKE PRAVICE

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

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

### Units and abbreviations

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

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

### Figures

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

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

**All figure captions must be bilingual.**

### Tables

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

**All table captions must be bilingual.**

### The list of references

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

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

### Author information

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

### ACCEPTANCE OF PAPERS AND COPYRIGHT

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

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