

1. Prispevek k parameterski identifikaciji dinamičnih sistemov z eno prostostno stopnjo  
Parameter Identification for Single-Degree-of-Freedom Dynamic Systems
2. Prostorska porazdelitev faktorja ugodja na temelju numeričnega modeliranja naravne konvekcije  
A Three Dimensional Factor-of-Comfort Distribution Based on Numerical Modeling of Natural Convection
3. Naprava s pnevmatično aktivno površino: Tehnike krmiljenja gibljivih predmetov  
A Pneumatic Active-Surface Device: Control Techniques for Flexible Objects
4. Energijska bilanca občine Tolmin  
The Energy Balance of the Tolmin Municipality



## Vsebina

### Contents

Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering  
letnik - volume 48, (2002), številka - number 6

#### Razprave

- Jakšič, N., Boltežar, M.: Prispevek k parameterski identifikaciji dinamičnih sistemov z eno prostostno stopnjo 302
- Glavnik, A., Hriberšek, M., Škerget, L.: Prostorska porazdelitev faktorja ugodja na temelju numeričnega modeliranja naravne konvekcije 318
- Uran, S., Šafarič, R.: Naprava s pnevmatično aktivno površino: Tehnike krmiljenja gibljivih predmetov 332
- Drole, M., Sekavčnik, M., Tuma, M.: Energijska bilanca občine Tolmin 355

#### Strokovna literatura

#### Osebne vesti

#### Navodila avtorjem

#### Papers

- Jakšič, N., Boltežar, M.: Parameter Identification for Single-Degree-of-Freedom Dynamic Systems 302
- Glavnik, A., Hriberšek, M., Škerget, L.: A Three-Dimensional Factor-of-Comfort Distribution Based on Numerical Modeling of Natural Convection 318
- Uran, S., Šafarič, R.: A Pneumatic Active-Surface Device: Control Techniques for Flexible Objects 332
- Drole, M., Sekavčnik, M., Tuma, M.: The Energy Balance of the Tolmin Municipality 355

#### Professional Literature

#### Personal Events

#### Instructions for Authors

# Prispevek k parameterski identifikaciji dinamičnih sistemov z eno prostostno stopnjo

## Parameter Identification for Single-Degree-of-Freedom Dynamic Systems

Nikola Jakšić - Miha Boltežar

*V prispevku predstavljamo metodo identifikacije parametrov sistemov z eno prostostno stopnjo. Uvrščamo jo v skupino metod parametrične identifikacije sistemov, ki potrebujejo strukturiran matematični model. Metoda omogoča izračun parametrov gibalne enačbe modela na podlagi merjene časovne vrste pospeška obravnavanega sistema. Metodo smo preskusili na eksperimentalni napravi z lastnostmi Duffingovega nihala. Rezultati so pokazali, da metoda omogoča kakovostno identifikacijo parametrov na kratkih časovnih vrstah, pri razmeroma majhnem številu točk časovne vrste in za raznovrstne sisteme z eno prostostno stopnjo.*

© 2002 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: sistemi dinamski, ugotavljanje parametrov, stopnje prostosti, modeli matematični)**

*An approach to parameter identification for a single-degree-of-freedom system is presented. It fits into the group of parametric system identification methods that use a structured mathematical model. It uses the free acceleration response of the system in order to estimate the parameters of the equation of motion for the model under consideration. The approach has been tested on an experimental device with the features of a Duffing oscillator. The results show that our approach offers parameter identification with good quality for short time series using only a modest number of data points for a wide range of single-degree-of-freedom systems.*

© 2002 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: dynamical systems, parametric identification, degrees of freedom, mathematical model)**

### 0 UVOD

V inženirski praksi se velikokrat zgodi, da je dober model sistema znan, ali pa ga je mogoče izpeljati iz osnovnih zakonitostih mehanike. Določitev vrednosti parametrov gibalne enačbe izbranega modela iz dinamičnega odziva sistema je naloga, ki jo rešuje pričujoče delo. To nalogo je mogoče rešiti na več različnih načinov.

Prispevek [1] obravnava lastna nihanja sistema z eno prostostno stopnjo z viskoznim dušenjem in s Coulombovim modelom suhega drsnega trenja. Postopek uporabi zmanjševanje amplitud pomika sistema za identifikacijo parametrov disipacije energije.

V članku [2] avtorja razvijeta metodo na podlagi aproksimacijske teorije polinomov Čebišova za sisteme z eno prostostno stopnjo, pri katerih predpostavita polinomsko togostno in dušilno karakteristiko. Identifikacija stabilnega linearnega sistema z uporabo polinomskih funkcij je predstavljena v [3]. Primer identifikacije

### 0 INTRODUCTION

In engineering practice a good model of the real system, or a few likely candidates for a good model of the real system, are usually known or can be deduced from basic mechanical principles. The task is to determine the parameters of the model's equation of motion based on information contained in the system's dynamical response. There are several ways of achieving this.

One study [1] considered the free vibrations of a single-degree-of-freedom (s.d.o.f.) system with combined viscous damping and Coulomb dry friction. This approach used only the amplitude decay of the displacement response of the system.

An approach to parameter identification of assumed polynomials for the description of nonlinearities in restoring and damping forces within a forced dynamical system was used in [2]. This approach uses approximation theory with Tchebishev polynomials. The identification of a stable linear system using polynomial kernels was presented in [3].

ekvivalentnega viskozne dušenja lahko najdemo v [4].

Parameterske identifikacije nelinearnih sistemov se lahko lotimo na nekaj načinov. Identifikacijo parametrov nelinearnega sistema omogoča model PHP (pospešek - hitrost - pomik) [5] prek poznavanja modela in kinematičnih spremenljivk pomika, hitrosti in pospeška sistema. Delo [6] predstavlja metodo za parametrično identifikacijo modelov večih vstopov in izstopov. Rekurzivno metodo identifikacije za nekatere nelinearne sisteme na podlagi šumnih meritev predstavlja [7]. Identifikacija z ekvivalentno linearizacijo le malo nelinearnih sistemov je predstavljena v [8]. Metoda, ki oceni parametre nelinearnega sistema na podlagi frekvenčnih odzivih funkcij višjih redov, je opisana v [9]. V delih [10] in [11] avtor uporabi Hilbertovo transformacijo za identifikacijo parametrov nelinearnega sistema z eno prostostno stopnjo. Identifikacija parametrov nelinearnih sistemov z uporabo valovne transformacije je opisana v [12] in z uporabo nevronske mreže v [13] do [15]. Ocene parametrov sistemov s histereznim učinkom obravnavajo v [16] do [19].

V tem prispevku predstavljamo metodo identifikacije parametrov poljubnih sistemov z eno prostostno stopnjo, ki je preprosta in uspešna tudi na kratkih merjenih časovnih vrstah. Preliminarne raziskave [20] so pokazale, da daje metoda zelo dobre rezultate, kadar za identifikacijo parametrov uporabimo spremenljivke faznega prostora in kadar je pospešek glavni vir informacij o sistemu [21]. Nadaljnje raziskave ([22] do [24]) so potrdile uspešnost metode pri identifikaciji parametrov nelinearnih modelov z eno prostostno stopnjo na podlagi kratkih meritev pospeška sistemov.

Predstavljeno metodo smo preskusili na podlagi lastnega nihanja eksperimentalne naprave, ki ima lastnosti Duffingovega nihala. Merjeni pospešek smo uporabili za parametrsko identifikacijo sistema.

## 1 METODA

V inženirski praksi velikokrat modeliramo dejanski sistem z modelom z eno prostostno stopnjo, katerega lastna nihanja popišemo z enačbo (1). To je lahko že končni model ali pa le prvi korak k modeliranju sistema.

$$\ddot{x} - F(x, \dot{x}; a_1, \dots, a_n) = 0 \quad (1),$$

kjer  $a_1, \dots, a_n$  pomenijo  $n$  neznanih parametrov, ki jih moramo identificirati. Metoda temelji na geometrijski predstavitvi rešitve gibalne enačbe sistema kot dvoparametrične družine krivulj. Glede na začetne pogoje je le ena možna krivulja, tir gibanja. Vsaka točka tira gibanja in njeni časovni odvodi zadovoljijo gibalno enačbo. Diferencialne enačbe sistema lahko

An approach to the identification of equivalent viscous damping parameters is discussed in [4].

Non-linear systems are approached in several different ways. The AVD (Acceleration-Velocity-Displacement) model [5] offers a way of achieving parameter identification for a non-linear system by knowing the model and time series of displacement, velocity and acceleration. A method of parameter identification for a multi-input multi-output model was also presented in [6]. A recursive approach for a class of non-linear systems from noisy measurements was introduced in [7]. An identification of weakly non-linear systems using equivalent linearization was presented in [8]. A method used for estimations of the non-linear systems based on high-order frequency-response functions was described in [9]. In [10] and [11] the Hilbert transform was used in order to identify the parameters of the s.d.o.f. non-linear system. The use of the wavelet transform entered the field of the non-linear system's parameter identification in [12]. Parameter identification via neural networks was presented in [13] to [15]. The identification of a hysteretic system was studied in [16] to [19].

In this paper an approach to parameter identification is proposed that is simple, convenient for short measured time series and can be used on different classes of s.d.o.f. systems. Preliminary studies [20] have shown that the method gives very good results when phase-space variables are used for the identification and when the acceleration is the main source of the system's information [21]. Further research ([22] to [24]) confirmed the success of the parameter identification method applied to the short measured acceleration response of the non-linear s.d.o.f. system.

The parameter identification method is tested against a real experimental device that resembles a Duffing's system by using the device's free acceleration response.

## 1 METHOD

It is not unusual in engineering practice to model a real dynamical system with a s.d.o.f. model in which the free vibrations are governed by equation (1). This can be either the final model or just the first approach to the problem.

where  $a_1, \dots, a_n$  represent  $n$  unknown parameters, which need to be determined. The approach is based on a geometrical representation of the solutions of the differential equation of motion. The solutions consist of a family of curves governed by two parameters. Only one trajectory is realized with the initial conditions. The differential equation of motion can be represented by



predstavimo kot sistem algebrskih enačb, če jih rešujemo na njihove parametre. Za izračun  $n$  parametrov potrebujemo teoretično le  $n$  točk tirnice in ustrezajočih  $n$  točk na časovnih odvodih kinematičnih spremenljivk, ki jo sestavljajo. Tako prevedemo problem v reševanje sistema algebrskih enačb oziroma v reševanje predefiniranega sistema algebrskih enačb. Slednje opravimo z metodo najmanjših kvadratov odstopanj.

Cilj je karakterizacija mehanskega sistema z izbranim modelom. Predpostavimo, da je tip diferencialne enačbe gibanja znan in da je časovna vrsta pospeška sistema izmerjena. Pod temi predpostavkami je mogoče metodo razdeliti na dva dela:

- a) **Rekonstrukcija** prostora stanj; to je rekonstrukcija manjkajočih časovnih vrst hitrosti in pomika iz merjenega pospeška z numeričnim integriranjem. Če merjena časovna vrsta vsebuje šum ravni  $\text{SNR} \leq 40$  dB, je potrebno njeno glajenje. V ta namen smo uporabili kubične približne zlepke. Če pa je raven šuma v merjeni časovni vrsti manjša, oziroma če smo merjeno časovno vrsto že zgladili, uporabimo interpolacijske zlepke 3. ali 5. reda za numerično integracijo časovne vrste pospeška. V primeru daljših merjenih časovnih vrst (več ko 2 nihaja) priporočamo uporabo časovnih oken. Dobljeno časovno vrsto hitrosti interpoliramo in ponovno integriramo. Faza rekonstruiranja časovnih vrst je popolnoma neodvisna od izbranega modela.
- b) **Oceno** vrednosti parametrov izvedemo z metodo najmanjših kvadratnih odstopanj ciljne funkcije (2). Slednjo izpeljemo iz diferencialne enačbe gibanja (1). Gibalna enačba (1) velja pri kateremkoli času, zato lahko seštejemo vrednosti leve strani enačbe pri vseh diskretnih časih in tako ustvarimo ciljno funkcijo:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m [\ddot{x}_i - F(x_i, \dot{x}_i; a_1, \dots, a_n)]^2 \quad (2),$$

kjer  $m$  pomeni število točk merjene časovne vrste pospeška,  $m > n$  in  $x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$  pomenijo pomik, hitrost in pospešek  $i$ -te točke.  $a_1, \dots, a_n$  označuje  $n$  parametrov, ki jih želimo identificirati. Ker smo časovni vrsti hitrosti in pomika dobili z numerično integracijo iz časovne vrste pospeška, moramo dodati dve novi neznaniki in tudi novo spremenljivko. Novi neznaniki sta prosti integracijski konstanti - neznan začetna pogoja  $x_0$  in  $\dot{x}_0$ . Nova spremenljivka pa je diskretni čas  $t_i$  pri  $i$ -ti točki časovne vrste pospeška. Ciljno funkcijo moramo zatorej napisati na novo:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m [\ddot{x}_i - F(x_i, \dot{x}_i, t_i; x_0, \dot{x}_0, a_1, \dots, a_n)]^2 \quad (3).$$

an algebraic equation where the parameters are considered to be unknowns. Hence, to estimate the  $n$  parameters of the model's equation of motion, theoretically only  $n$  points on the trajectory and on the time derivatives of its kinematics variables are needed. The problem is transformed to one of solving a system of algebraic equations or a predefined system of algebraic equations by means of a least-squares approximation, if there are more points than parameters.

The aim is to characterize a mechanical system with a chosen model. Let us consider that the type of differential equation of motion is known and the acceleration time history of the system under consideration is measured. Then the approach to parameter identification can be divided into two parts:

- a) **Reconstruction** of the state space, in other words, the reconstruction of the missing velocity and displacement time histories from the measured acceleration time history by numerical integration. If the noise level in the measured time history is  $\text{SNR} \leq 40$  dB then smoothing of the latter has to be performed. In this paper, the approximating cubic splines were used for this purpose. For the case of low-level noise in the acceleration time history and for the case of an already-smoothed acceleration time history the interpolation with splines of the 3rd or 5th degree was used in order to numerically integrate the acceleration time history. For the case of a long measured time history (more than 2 cycles) the time-window approach is strongly recommended. The obtained velocity time history has to be interpolated and integrated again. The reconstruction stage of the approach is completely model independent.
- b) **Estimation** of the parameters is achieved by a least-squares fit of the least-squared merit function, equation (2), deduced from the equation of motion, equation (1). Since the equation of motion (1) is valid for any given time, we can sum up the values of the equation for all the discrete times and thus we can create the merit function equation:

where  $m$  denotes the number of points of the measured acceleration time history,  $m > n$  and  $x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$  denote displacement, velocity and acceleration at the  $i$ -th sampling point, respectively.  $a_1, \dots, a_n$  denote the  $n$  parameters to be identified. Because the velocity and displacement time histories have been numerically integrated from the acceleration time history, two new unknowns and a new variable are introduced. These two new unknowns are the free integration constants, i.e. the unknown initial conditions  $x_0$  and  $\dot{x}_0$ . The new variable is the discrete time  $t_i$  at the  $i$ -th sampling point. Hence, the merit function must be rewritten as:

**Reševanje s časovnimi okni** zahteva razdelitev merjene časovne vrste na podkorake, ki se lahko prekrivajo. Vsak podkorak obravnavamo kot posebno časovno vrsto in jo izpostavimo identifikacijskemu postopku. Rezultate - identificirane vrednosti parametrov - povprečimo prek vseh podkorakov. Uporaba časovnih oken je nujna zaradi numeričnih napak, ki se pojavijo pri glajenju šumne časovne vrste pospeška in njene dvakratne numerične integracije.

## 2 DUFFINGOV SISTEM

Duffingov sistem lahko uporabimo pri modeliranju dinamičnega sistema z nelinearno togostjo v primeru nosilca v uklonjenem stanju ali velike deformacije nosilca [25]. Gibalno enačbo lastnega nihanja Duffingovega sistema lahko zapišemo kot:

$$\ddot{x} + a\dot{x} + bx + cx^3 = 0 \quad (4),$$

kjer je  $a$  parameter, ki opisuje viskozno dušenje,  $b$  je parameter, ki ponazarja linearni del togosti sistema,  $c$  pa opiše nelinearni del togosti sistema.

Edina mogoča atraktorja lastnega nihanja sistema z eno prostostno stopnjo sta točka in mejna zanka. Dinamično obnašanje obravnavanega sistema bo zategadelj preprosto.

Ciljno funkcijo predstavljene metode za identifikacijo parametrov Duffingovega sistema (4) lahko zapišemo kot:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m [\ddot{x}_i + a(\dot{x}_i + \dot{x}_0) + b(x_i + x_0 + t_i\dot{x}_0) + c(x_i + x_0 + t_i\dot{x}_0)^3]^2 \quad (5),$$

kjer  $t_i$  pomeni čas  $i$ -te točke.

Enačba (5) predstavlja nelinearni problem najmanjših kvadratov odstopanj. Rešujemo ga z iterativnim reševanjem:

- 1) Najprej moramo uganiti začetne vrednosti začetnih pogojev. Nelinearni optimizacijski problem tako prevedemo na linearno reševanje po metodi najmanjših kvadratov odstopanj - regresija. V vseh primerih smo izbrali nične začetne pogoje, s katerimi je bila konvergenca metode vedno hitra.
- 2) Linearni optimizacijski problem rešimo po metodi najmanjših kvadratov odstopanj (regresija).
- 3) Novo vrednost začetnih pogojev izračunamo iz ocenjenih regresijskih koeficientov.
- 4) Ponavljamo drugi korak iteracijske zanke, dokler niso izpolnjeni pogoji konvergence.

Vrednosti parametrov konvergirajo v že nekaj iteracijskih korakih. V primeru uporabe časovnih oken identificirani začetni pogoji v določenem časovnem oknu predstavljajo začetne vrednosti le-teh za naslednje časovno okno. Pogoj je le, da korak časovnih oken ne sme biti prevelik (kar se ne zgodi pogosto).

**The time-window approach** requires segmentation of the original time history into sub-intervals, which may overlap. Each sub-interval is treated as a separate time history. A complete identification procedure is applied to each sub-interval and the results – identified parameters – are finally averaged over all sub-intervals. The time-window approach is necessary because of the numerical errors introduced by smoothing of the noisy acceleration time history and its double numerical integration.

## 2 DUFFING'S SYSTEM

The Duffing's system can be used for modelling dynamical systems with non-linear stiffness such as the post buckling or the large deflection of beams [25]. The equation of motion of free vibrations of Duffing's system with dry friction can be written as:

where  $a$  is a parameter that describes viscous damping,  $b$  is a parameter representing the linear part of stiffness in the system and  $c$  denotes the non-linear part of stiffness.

In the case of free vibrations of a s.d.o.f. system the only attractor shapes possible are the point attractor and the limit cycle. The dynamical behavior of the system under consideration is expected to be simple.

Applying the approach of parameter identification to Duffing's system, equation (4), the least-squared merit function can be rewritten as:

where  $t_i$  denotes time at the  $i$ -th sampling point.

Equation (5) represents a non-linear least-squares-fit problem. It was solved by using the following iterative procedure:

- 1) The initial conditions must be guessed first. Thus the non-linear least-squares-fit problem is transformed into a linear one. The choice of zero initial conditions worked well in all cases.
- 2) The linear least-squares-fit problem is solved.
- 3) The new value for the initial conditions is computed from the estimated regression parameters.
- 4) The second step is repeated until the convergence criterion is met.

The values of the parameters converge after a few steps of the iteration. In the case of the time-window approach the estimated initial conditions from a certain time window are used as a good guess for the next time window if the time-window shift is not too big (which is rare).

## 3 PRESKUS

Preskusno delo smo opravili na namensko zgrajeni napravi, ki ima lastnosti Duffingovega nihala, ker omogoča nihanje z velikimi amplitudami. Najprej smo opravili preproste ločene teste: ocenili smo vzmetno karakteristiko sistema s statičnim testom in količino razsipane energije v sistemu z logaritmskim dekrementom. Nato smo primerjali rezultate, dobljene z našo metodo identifikacije parametrov, za katero verjamemo, da je preprosta za uporabo z rezultati, dobljenimi z ločenimi testi. Nadalje smo primerjali obnašanje metode in njene rezultate v primeru nihanja vztrajnostne mase, ko so grabljice v zraku in v vodi.

## 3.1 Preskusna naprava

Preskusno napravo sestavljata dve ločeni vzporedni listnati vzmeti, konzolno vpeti v stojalo na eni strani in pritrjeni na vzrajnostno maso na drugi strani. Velikost prečnega prereza posamezne vzmeti znaša  $a \times h = 1 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ . Dolžina vzmeti je  $l = 512 \text{ mm}$ . Velikost vztrajnostne mase znaša  $m_i = 1,892 \text{ kg}$ . Celotno vztrajnostno maso ocenimo na  $m_c = m_i + 2 \times m_s/3 = 1,971 \text{ kg}$ . Slika 1 prikazuje skico preskusne naprave.

## 3.2 Ločeni testi

Najprej smo določili vzmetno karakteristiko vzmeti in nato še razmernik dušenja iz merjene časovne vrste pospeška pri lastnem nihanju naprave.

Statično merjeno vzmetno karakteristiko smo ponazorili z linearno (6) in kubično (7) funkcijo. Merjeno ter tudi linearno in kubično približno vzmetno karakteristiko prikazuje slika 2. Na tej sliki prikazujemo le pozitivne vrednosti vzmetne karakteristike, ki je liha funkcija. Vrednost koeficienta  $k_1$  linearne karakteristike (6) je ocenjena na  $k_1 = 71,172 \text{ N/m}$ . Vrednosti koeficientov  $k_1$  in  $k_3$  kubične karakteristike (7) pa na  $k_1 = 78,072 \text{ N/m}$  in  $k_3 = -2470,504 \text{ N/m}^3$ .

## 3 EXPERIMENT

The experimental work was undertaken on a purpose-made experimental device which resembles the features of a Duffing's oscillator by allowing high-amplitude oscillations. Since we believe that our method is relatively simple to apply we also considered simple, separate tests of the system by estimating the system's spring characteristic by static testing and by estimating the amount of dissipated energy by the logarithmic decrement. The comparison of both approaches is presented. After that we applied the method to measured responses of the inertial mass while rake oscillating in water and compared the results to those obtained in the air experiment.

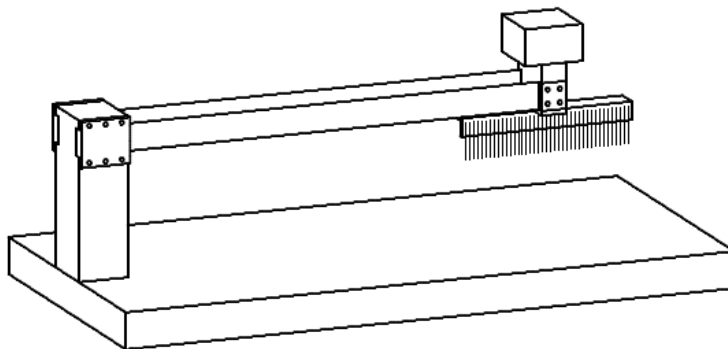
## 3.1 Experimental device

The experimental device is composed of two parallel but separated leaf springs clamped at one end and attached to an inertial mass at the other end. The dimensions of the spring's cross-section are  $a \times h = 1 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  and the spring's length is  $l = 512 \text{ mm}$ . The inertial mass is  $m_i = 1.892 \text{ kg}$ . The complete inertial mass is estimated to be  $m_c = m_i + 2 \times m_s/3 = 1.971 \text{ kg}$ . The experimental device is schematically shown in Fig. 1.

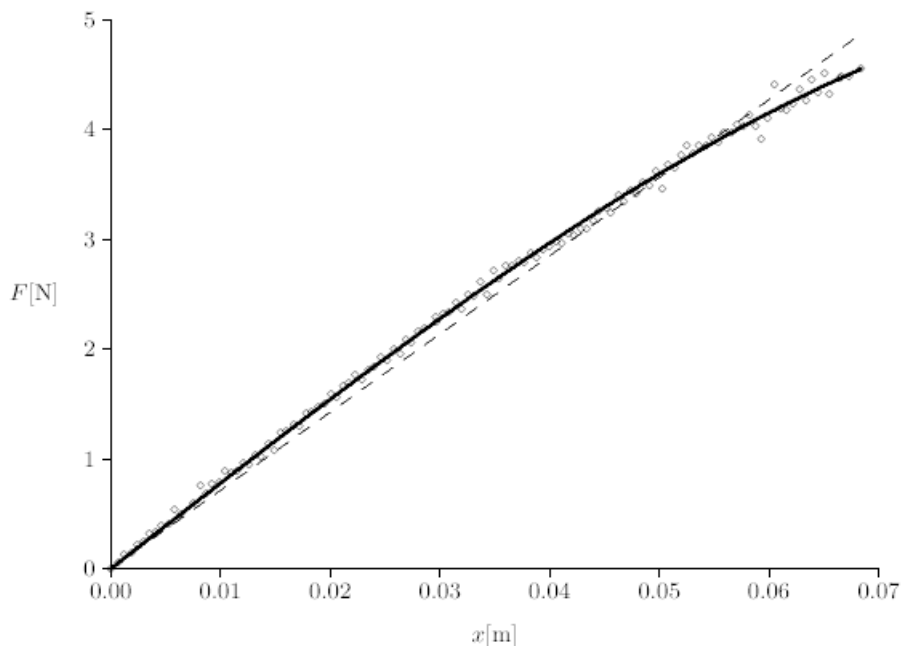
## 3.2 Separate tests

The spring characteristic was determined with a static test and then the damping ratio was determined from the measured acceleration free response of the device.

The statically measured spring characteristic was approximated with the linear, eq. (6), and the cubic, eq. (7), functions. The linear and cubic approximations of the measured spring characteristic are shown in Fig. 2. The characteristic of the spring is an odd function, but only positive values are shown in Figure 2. The value of the coefficient  $k_1$  of the characteristic eq. (6) is  $k_1 = 71.172 \text{ N/m}$ . The values of the coefficients  $k_1$  and  $k_3$  of the characteristic eq. (7) are  $k_1 = 78.072 \text{ N/m}$  and  $k_3 = -2470.504 \text{ N/m}^3$ .



Sl. 1. Preskusna naprava  
Fig. 1. Experimental device



Sl. 2. Statično določena vzmetna karakteristika: merjene točke ( $\diamond\diamond\diamond$ ), približna linearna karakteristika ( $---$ ) in približna nelinearna karakteristika ( $---$ )

Fig. 2. Statically determined spring characteristic: measurement points ( $\diamond\diamond\diamond$ ), approximate linear characteristic ( $---$ ) and approximate non-linear characteristic ( $---$ )

$$F(x) = k_1 \cdot x \tag{6}$$

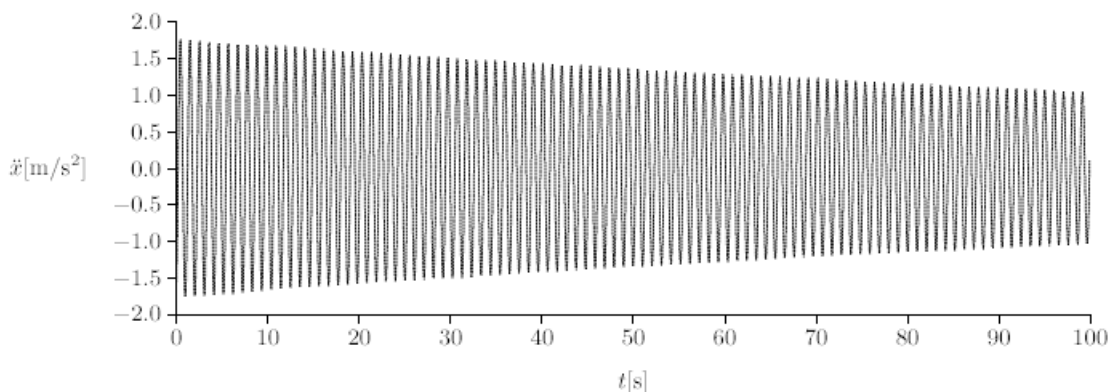
$$F(x) = k_1 \cdot x + k_3 \cdot x^3 \tag{7}$$

Če delimo  $k_1$  in  $k_3$  s celotno vztrajnostno maso, dobimo parametre Duffingovega modela  $b$  in  $c$ , enačba (4). Vrednosti parametra  $b$  izračunamo kot  $b = k_1/m_c = 39,610$  in vrednost parametra  $c$  kot  $c = k_3/m_c = -1253,427$ .

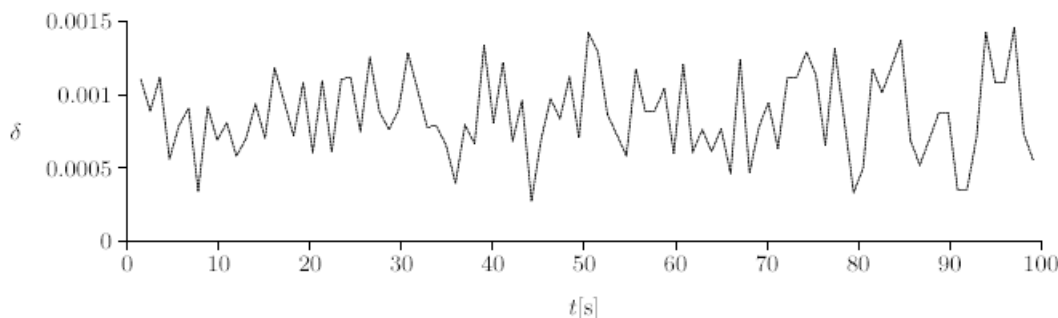
Merjeni odziv sistema (pospešek) pri lastnem nihanju prikazuje slika 3. Vrednosti razmernika dušenja v odvisnosti od časa so prikazane na sliki 4. Ekvivalentni razmernik viskoznega dušenja ocenimo z uporabo logaritmskega dekrementa linearnega modela s povprečenjem grafa na sliki 4. Vrednost razmernika dušenja  $\delta$  smo ocenili na  $\delta = 8,694 \cdot 10^{-4}$  oziroma pri upoštevanju parametrov Duffingovega modela (4):  $a = 1,0943 \cdot 10^{-2}$ .

If  $k_1$  and  $k_3$  are divided by the total inertial mass they fit to the parameters of Duffing's model  $b$  and  $c$ , respectively, equation (4). The value of  $b$  is computed as  $b = k_1/m_c = 39.610$  and  $c = k_3/m_c = -1253.427$ .

The measured free acceleration response is presented in Fig. 3. Values of the damping ratio as a function of time are shown in Fig. 4. The equivalent viscous damping ratio was estimated by using the logarithmic decrement of the linear model approach by averaging the plot in Figure 4. The damping ratio  $\delta$  was estimated to have a value of  $\delta = 8.694 \cdot 10^{-4}$  or in terms of Duffing's model, eq. (4):  $a = 1.0943 \cdot 10^{-2}$ .



Sl. 3. Merjena časovna vrsta pospeška, nihanje grabljic v zraku  
Fig. 3. Measured acceleration time series, rake oscillating in the air



Sl. 4. Časovni potek razmernika dušenja  $\delta$   
 Fig. 4. The damping ratio  $\delta$  as function of time

### 3.3 Identifikacija parametrov - grabljice v zraku

Pospešek smo merili z merilnikom pospeška, pritrjenim na vztrajnostno maso. Merjeno časovno vrsto smo zajeli z 12-bitno A/D konverzijo in jo shranili na trdi disk računalnika. Frekvenco vzorčenja smo nastavili na 1 kHz. Merjena časovna vrsta pospeška je prikazana na sliki 3.

Spremenljivke prostora stanj smo rekonstruirali z uporabo interpolacijskih kubičnih zlepkov zaradi nizke ravni šuma v merjeni časovni vrsti. Parametre smo identificirali na prvih desetih nihajih časovne vrste. Uporabili smo tudi postopek reševanja s časovnimi okni zaradi dolžine identifikacijskega koraka.

Preverili smo vpliv sprememb dolžine časovnega okna, frekvence vzorčenja in tudi koraka časovnega okna na veljavnost ocene vrednosti parametrov. Merjeno časovno vrsto smo prevzročili na 100 Hz in to vrednost označili kot privzeto vrednost. Privzeta vrednost dolžine časovnega okna je dva nihaja in privzeta vrednost koraka časovnega okna je 1/10 nihaja.

#### Vpliv sprememb dolžine časovnega okna

Rezultati identificiranih parametrov pri različnih dolžinah časovnega okna so prikazani v preglednici 1. V prvem stolpcu so navedene različne dolžine časovnega okna. V drugem stolpcu so oznake krivulj na sliki 5. V zadnjih treh stolpcih so zbrane identificirane vrednosti parametrov Duffingovega modela.

Na sliki 5 je prikazan detajl desete pozitivne amplitude. Merjeni pospešek je narisano z debelo črto. Odzivi Duffingovega modela pa so narisani s tankimi črtami. Oznake grafov odziva modela so opisane v preglednici 1. Vidimo lahko, da leži primerna izbira dolžine časovnega okna med enim nihajem in dvema nihajema.

#### Vpliv sprememb frekvence vzorčenja

Rezultati identificiranih parametrov pri različnih frekvencah vzorčenja so prikazani v preglednici 2. V prvem stolpcu so navedene različne frekvence vzorčenja. V drugem stolpcu so oznake krivulj na sliki 6. V zadnjih treh stolpcih so zbrane

### 3.3 Parameter identification: the rake in the air

The acceleration time history was measured by an accelerometer fixed to the inertial mass. The time history was acquired with a 12 bit A/D converter and stored on a PC's HDD. The sampling frequency was 1 kHz. The measured acceleration is presented in Fig. 3.

The state space was reconstructed by the cubic spline interpolation because of the low noise contamination of the measured time history. The parameters were identified on the first ten cycles of the response. The time-window approach to identification was adopted because of the length of the identification interval.

The impacts of variations of the length of the time window, the sampling frequency and the step of the time-window shift on the validity of the estimated parameters were studied. The time history was re-sampled at 100 Hz and this is set to be the default sampling frequency. The default time-window length was set to two cycles and the default time-window shift was set to 1/10 of the cycle.

#### Influence of time-window length variation

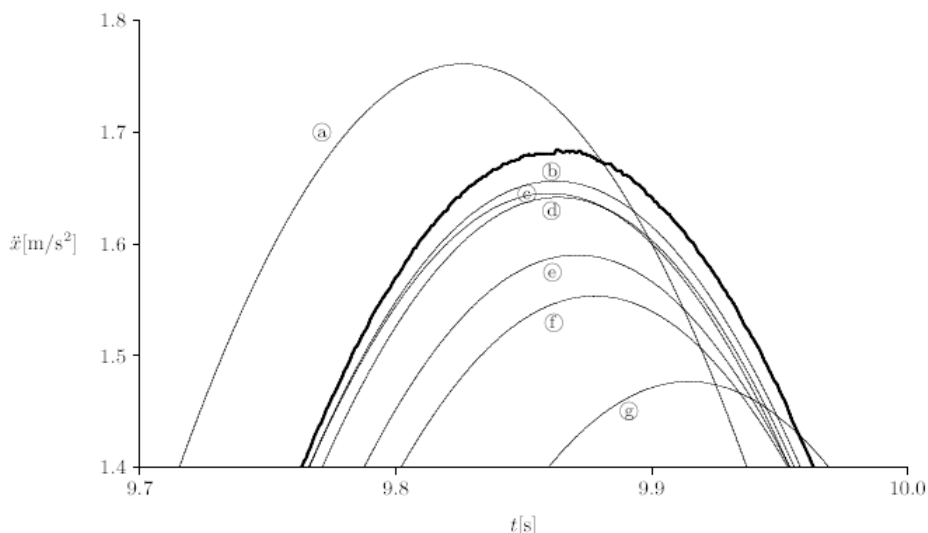
The results of the identified parameters for varying time-window length are shown in Table 1. The first column has the chosen time-window lengths, the second column denotes the labels of the curve in Fig. 5 and the last three columns contain values of the identified parameters of Duffing's model.

In Fig. 5 a detail of the tenth positive amplitude is shown. The measured acceleration is drawn with a thick line and the acceleration responses of Duffing's model are drawn with thin lines. The labels of the model responses correspond to the labels in Table 1. We can see that the best choices for the length of the time window lie between one and two cycles.

#### Influence of sampling-rate variation

The results for parameters at various sampling rates are shown in Table 2. The first column lists the sampling rates, the second column indicates the label of the curve in Fig. 6 and the last three columns contain values of the identified





Sl. 5. Merjeni pospešek (debela črta) in simulirani odziv Duffingovega modela pri parametrih, identificiranih pri različnih dolžinah časovnega okna, za oznake glej preglednico 1. Detajl desete pozitivne amplitude.

Fig. 5. Measured acceleration (thick line) and simulated responses of Duffing's model for the parameters identified at different time-window lengths, for labels see Table 1. Details of the tenth positive amplitude.

Preglednica 1. Ocenjene vrednosti parametrov Duffingovega modela pri različnih dolžinah časovnega okna  
Table 1. Estimated values of the parameters of Duffing's model at different time-window lengths

Dolžina časovnega okna Time-window length	Krivulja na sliki 5 Curve in figure 5	$a$	$b$	$c$
0.5 nihaja/cycle	(a)	$-8.409 \cdot 10^{-3}$	37.078	-451.256
1 nihaj/cycle	(b)	$1.232 \cdot 10^{-2}$	36.778	-442.403
1.5 nihaja/cycle	(c)	$1.153 \cdot 10^{-2}$	36.686	-387.403
2 nihaja/cycles	(d)	$1.209 \cdot 10^{-2}$	36.283	-162.403
3 nihaji/cycles	(e)	$1.427 \cdot 10^{-2}$	36.287	-212.612
4 nihaji/cycles	(f)	$1.537 \cdot 10^{-2}$	36.250	-234.609
5 nihajev/cycles	(g)	$2.069 \cdot 10^{-2}$	35.932	-221.224

identificirane vrednosti parametrov Duffingovega modela. Merjeno časovno vrsto smo prevzorčili tako, da ustreza vrednostim spreminjanih frekvenc vzorčenja.

Na sliki 6 je prikazan detajl desete pozitivne amplitude. Merjeni pospešek je narisano z debelo črto. Odzivi Duffingovega modela so narisani s tankimi črtami. Oznake grafov odziva modela so opisane v preglednici 2. Na sliki 6 lahko vidimo, da ni bistvene razlike med različnimi frekvencami vzorčenja.

#### Vpliv sprememb koraka časovnega okna

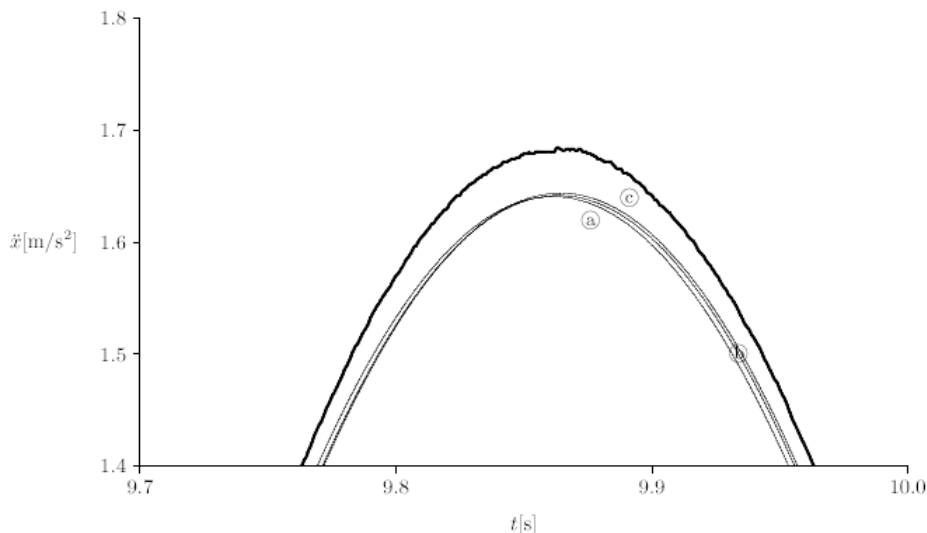
Rezultati identificiranih parametrov pri različnih korakih časovnega okna so prikazani v preglednici 3. V prvem stolpcu so navedeni različni koraki časovnega okna. V drugem stolpcu so oznake krivulj na sliki 7. V zadnjih treh stolpcih so zbrane

parameters of Duffing's model. The measured time history of the acceleration was resampled to match the desired sampling rate.

In Fig. 6 a detail of the tenth positive amplitude is shown. The measured acceleration is drawn with a thick line and the acceleration responses of Duffing's model are drawn with a thin line. The labels of the model responses correspond to the labels in Table 2. In Fig. 6 we can see that there are no major differences between the different sampling rates.

#### Influence of time-window shift variation

The results for parameters at various time-window shifts are shown in Table 3. The first column lists the time-window shifts, the second column indicates the label of the curve in Fig. 7 and the last three columns contain



Sl. 6. Merjeni pospešek (debela črta) in simulirani odziv Duffingovega modela pri parametrih, identificiranih pri različnih frekvencah vzorčenja, za oznake glej preglednico 2. Detajl desete pozitivne amplitude.

Fig. 6. Measured acceleration (thick line) and simulated responses of Duffing's model for the parameters identified at different sampling rates, for labels see Table 2. Details of the tenth positive amplitude.

Preglednica 2. Ocenjene vrednosti parametrov Duffingovega modela pri različnih frekvencah vzorčenja  
Table 2. Estimated values of the parameters of Duffing's model at different sampling rates

Frekvenca vzorčenja Sampling rate	Krivulja na sliki 6 Curve in figure 6	$a$	$b$	$c$
10 Hz	Ⓐ	$1.227 \cdot 10^{-2}$	36.291	-159.511
100 Hz	Ⓑ	$1.209 \cdot 10^{-2}$	36.283	-162.403
1000 Hz	Ⓒ	$1.188 \cdot 10^{-2}$	36.169	-157.292

identificirane vrednosti parametrov Duffingovega modela.

Na sliki 7 je prikazan detajl desete pozitivne amplitude. Merjeni pospešek je narisano z debelo črto. Odzivi Duffingovega modela so narisani s tankimi črtami. Oznake grafov odziva modela so opisane v preglednici 3. Na sliki 7 lahko vidimo, da ni bistvene razlike med različnimi koraki časovnega okna.

#### Ponovljivost preskusa

Parametre Duffingovega modela smo identificirali z najboljšo mogočo kombinacijo frekvence vzorčenja (1000 Hz), dolžine časovnega okna (1 nihaj) in koraka časovnega okna (1/1000 nihaja) na merjenem pospešku in dobili naslednje vrednosti parametrov:  $a = 1,067 \cdot 10^{-2}$ ,  $b = 36,780$  in  $c = -444,702$ .

Ponovljivost preskusa in metode smo preverili na enajstih različnih merjenih časovnih vrstah pospeška z enako frekvenco vzorčenja, dolžino časovnega okna in njegovim korakom kakor pri prvi časovni vrsti. Rezultati identifikacije so zbrani v preglednici 4. Vidimo lahko, da je raztros najmanjši pri

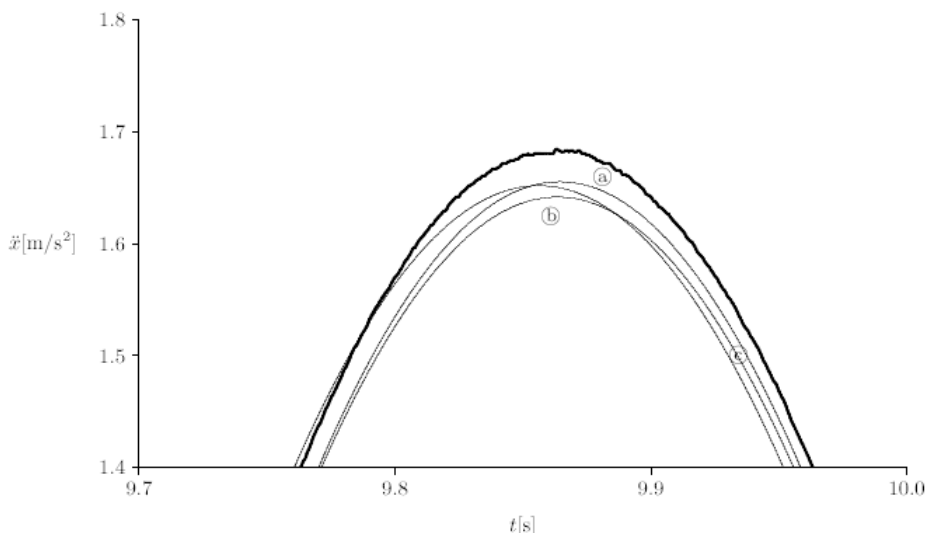
values of the identified parameters of Duffing's model.

In Fig. 7 a detail of the tenth positive amplitude is shown. The measured acceleration is drawn with a thick line and the acceleration responses of Duffing's model are drawn with a thin line. The labels of the model responses correspond to the labels in Table 3. In Fig. 7 we can see that there are no major differences between the different time-window shifts.

#### The experimental repeatability

The best possible combination of the sampling rate (1000 Hz), the time-window length (1 cycle) and the time-window shift (1/1000 cycle) applied to the identification procedure on the measured acceleration yield results for Duffing's model parameters of  $a = 1.067 \cdot 10^{-2}$ ,  $b = 36.780$  and  $c = -444.702$ .

The repeatability of the experiment and the method were tested on eleven different measured acceleration time histories with the same combination of the sampling rate, the time-window length and the time-window shift as for the first time history. The results of the identification are presented in Table 4. We can



Sl. 7. Merjeni pospešek (debeli črta) in simulirani odziv Duffingovega modela pri parametrih, identificiranih pri različnih korakih časovnega okna, za oznake glej preglednico 3. Detajl desete pozitivne amplitude.  
 Fig. 7. Measured acceleration (thick line) and simulated responses of Duffing's model for the parameters identified at different time-window shifts, for labels see Table 3. Details of the tenth positive amplitude.

Preglednica 3. Ocenjene vrednosti parametrov Duffingovega modela pri različnih korakih časovnega okna  
 Table 3. Estimated values of the parameters of Duffing's model at different time-window shifts

Korak časovnega okna Time-window shift	Krivulja na sliki 7 Curve in figure 7	$a$	$b$	$c$
1/100 nihaja/cycle	(a)	$1.029 \cdot 10^{-2}$	36.690	-496.632
1/10 nihaja/cycle	(b)	$1.209 \cdot 10^{-2}$	36.283	-162.403
1 nihaj/cycle	(c)	$1.055 \cdot 10^{-2}$	36.169	-95.593

parametru  $b$ , manj ko 1 odstotek srednje vrednosti. Raztros parametra  $c$  je približno 4,4% srednje vrednosti. Parameter  $a$  ima največji raztros glede na svojo srednjo vrednost, približno 18%, kar je posledica modeliranja strukturnega dušenja vzmeti in zračnega upora z ekvivalentnim viskozno dušenjem in tudi zaradi majhne količine raztrosa energije na nihaj.

#### Duffingov ali linearni model?

Primerjajmo obnašanje Duffingovega modela z linearnim. Identificirane parametre obeh modelov najdemo v preglednici 5. Na sliki 8 je prikazan detajl 32. pozitivne amplitude. Merjeni pospešek je narisani z debelo črto. Odziva Duffingovega in linearnega modela sta narisana s tankimi črtama. Oznaki grafov odzivov modelov sta opisani v preglednici 5. Na sliki 8 lahko vidimo, da Duffingov model bolje popiše amplitudo in predvsem frekvenco merjene časovne vrste v primerjavi z linearnim modelom. Vendar tudi odziv Duffingovega modela zaostaja za merjenim odzivom. Proti koncu merjene časovne vrste se razlike še povečujejo. Na tem mestu poudarimo, da se te

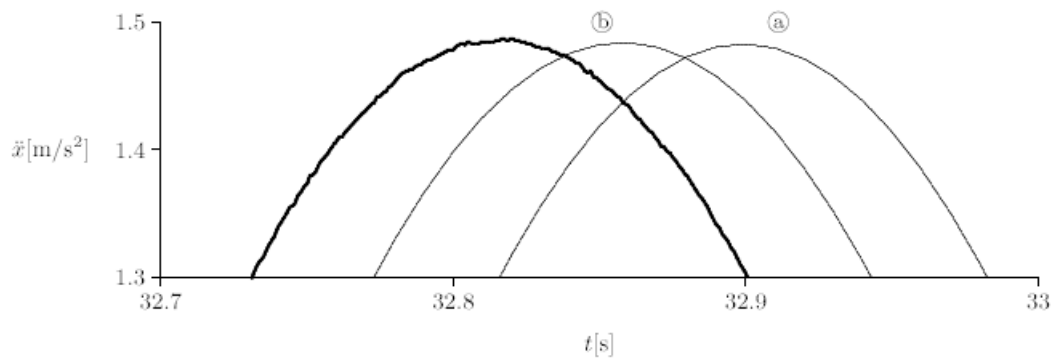
see that the deviations relative to the average value are the smallest with parameter  $b$ , less than 1%. Parameter  $c$  experiences greater deviations, approximately 4%. The greatest deviations relative to the average value are experienced by parameter  $a$ , due to the modelling of the structural damping and the air resistance with the equivalent viscous damping and also due to the small amount of the dissipated energy over a cycle.

#### Duffing's or linear model?

Let us compare the dynamical behavior of the Duffing's and the linear models. The identified values of the parameters can be found in Table 5. A detail of the 32<sup>nd</sup> positive amplitude is shown in Fig. 8. The measured acceleration is drawn with a thick line and the acceleration responses of Duffing's and the linear models are drawn with a thin line. The labels of the responses correspond to the labels in Table 5. In Fig. 8 we can see that the Duffing's model is better at describing the amplitude as well as the frequency of the measured time series in comparison to the linear model. We can also see that the Duffing's model response is also lagging the measured response. The differences are increasing

Preglednica 4. Primerjava ocen parametrov Duffingovega modela enajstih neodvisnih meritev  
 Table 4. Comparison of the estimated values of the Duffing's model parameters for eleven independent measurements

Meritev Measurement	$a$	$b$	$c$
01	$1.067 \cdot 10^{-2}$	36.780	-444.702
02	$1.099 \cdot 10^{-2}$	36.787	-441.901
03	$0.964 \cdot 10^{-2}$	36.870	-403.251
04	$1.197 \cdot 10^{-2}$	36.540	-468.860
05	$0.931 \cdot 10^{-2}$	36.763	-451.457
06	$1.036 \cdot 10^{-2}$	36.298	-415.578
07	$0.947 \cdot 10^{-2}$	36.196	-424.219
08	$1.486 \cdot 10^{-2}$	36.162	-424.179
09	$0.997 \cdot 10^{-2}$	36.057	-427.190
10	$0.857 \cdot 10^{-2}$	35.980	-423.418
11	$1.170 \cdot 10^{-2}$	36.136	-415.392
povprečje average	$1.068 \cdot 10^{-2}$	36.415	-430.923
std. deviacija std. deviation	$0.172 \cdot 10^{-2}$	0.337	18.906



Sl. 8. Merjeni pospešek (debela črta) in simulirana odziva Duffingovega in linearnega modela, za oznake glej preglednico 5. Detajl 32. pozitivne amplitude.

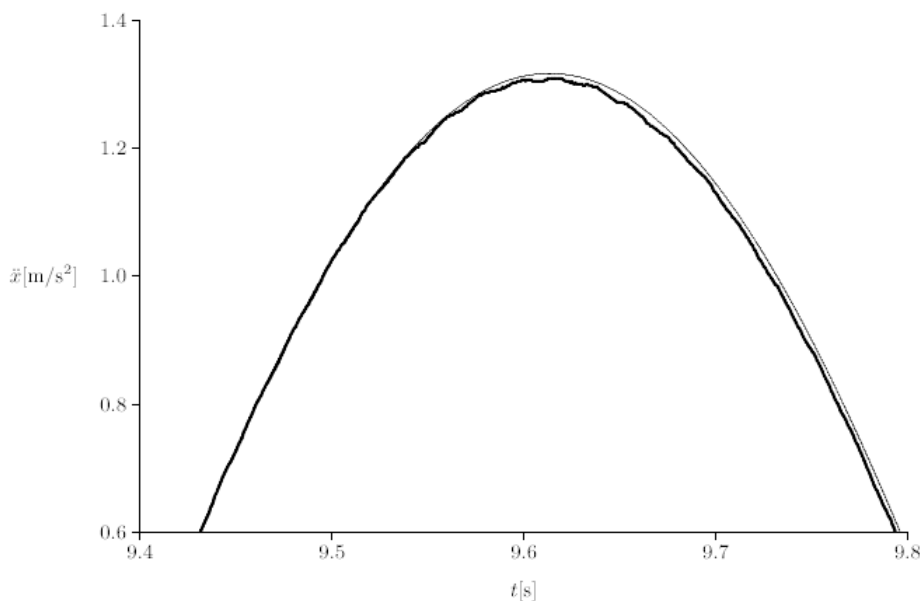
Fig. 8. Measured acceleration (thick line) and simulated responses of the Duffing's and the linear model, for labels see Table 5. Details of the 32<sup>nd</sup> positive amplitude.

razlike pokažejo zunaj območja identifikacije in zato spadajo v področje napovedi obnašanja dinamičnih sistemov. Naš namen pa ni poiskati najprimernejši model eksperimentalne naprave, ampak predstaviti metodo parametrične identifikacije.

with the time. Let us stress here that these differences appeared outside the identification interval. Hence, this is a subject of the prediction rather than the identification. Our aim is to present the method of parametric identification and not to derive the most adequate model of the experimental device.

Preglednica 5. Primerjava ocen parametrov Duffingovega in linearnega modela  
 Table 5. Comparison of the estimated values of the Duffing's and linear models

Model	Krivulja na sliki 8	$a$	$b$	$c$
Model	Curve in figure 8			
Linearni	Ⓐ	$1.116 \cdot 10^{-2}$	36.012	
Linear				
Duffingov	Ⓑ	$1.067 \cdot 10^{-2}$	36.780	-444.702
Duffing's				



Sl. 9. Merjeni pospešek (debela črta) in simulirana odziva Duffingovega modela (tanko črta). Detajl 10. pozitivne amplitude.

Fig. 9. Measured acceleration (thick line) and simulated responses of the Duffing's model (thin line). Details of the 10<sup>th</sup> positive amplitude.

### 3.4 Identifikacija parametrov - grabljice v vodi

V vodo smo pomočili le grabljice, ki so pritrjene na vztrajnostno maso. S tem smo povečali raztros energije sistema.

Meritve v vodi smo izvedli enako kakor pri identifikaciji parametrov v zraku. Tudi spreminjanja parametrov identifikacije (frekvenca vzorčenja, dolžina in korak časovnega okna) postrežejo s podobnimi ugotovitvami kakor pri identifikaciji parametrov v zraku.

Parametre Duffingovega modela smo identificirali z najboljšo mogočo kombinacijo frekvence vzorčenja (1000 Hz), dolžine časovnega okna (1 nihaj) in koraka časovnega okna (1/1000 nihaja) na pospešku preskusne naprave in dobili naslednje vrednosti parametrov:  $a = 3,599 \cdot 10^{-2}$ ,  $b = 36,911$  in  $c = -355,038$ .

Na sliki 9 je prikazan detajl desete pozitivne amplitude. Merjeni pospešek je narisano z debelo črto, odziv Duffingovega modela pa s tanko črto. Na tej

### 3.4 Parameter identification: the rake in the water

Only the rake was partially submerged in the case of the identification of the parameters in the water. In this way the energy dissipation was increased.

The experiment in water was conducted in the same way as the experiment in the air. The variations of the identification parameters (the sampling rate, the length and the shift of the time window) gives similar results to the experiment in air.

The best possible combination of sampling rate (1000 Hz), time-window length (1 cycle) and time-window shift (1/1000 cycle) applied to the identification procedure on the measured acceleration of the experimental set-up yield results for Duffing's model parameters of  $a = 3.599 \cdot 10^{-2}$ ,  $b = 36.911$  and  $c = -355.038$ .

In Fig. 9 a detail of the tenth positive amplitude is shown. The measured acceleration is drawn with a thick line and the acceleration response of Duffing's



Preglednica 6. Primerjava ocen parametrov Duffingovega modela pri različnih postopkih identifikacije  
 Table 6. Comparison of the estimated values of the Duffing's model for different approaches of the identification

Analiza Analysis	$a$	$b$	$c$
Statični test Static test		39.610	-1253.427
Logaritmski dekrement Logarithmic decrement	$1.094 \cdot 10^{-2}$		
Identifikacija parametrov v zraku Parameter identification in the air	$1.067 \cdot 10^{-2}$	36.780	-444.702
Identifikacija parametrov v vodi Parameter identification in the water	$3.599 \cdot 10^{-2}$	36.911	-355.038

sliki lahko vidimo odlično ujemanje merjenega in simuliranega odziva, kar govori v prid predpostavljene linearni upornosti tekočine.

model is drawn with a thin line. In Fig. 9 we can see that there is very good agreement between the measured and the simulated responses, which is in favour of the assumption of the linearity of the fluid resistance.

#### 4 ANALIZA REZULTATOV

#### 4 ANALYSES OF THE RESULTS

Vrednosti identificiranih parametrov Duffingovega modela, dobljene z različnimi postopki, so zbrane v preglednici 6. Posebej se bomo osredotočili na primerjavi med ločenimi testi in identifikacijo parametrov v zraku ter med identifikacijo parametrov v zraku in v vodi.

The identified values of the parameters of the Duffing's model, obtained by different approaches, are presented in Table 6. The focus was given to a comparison between the separate tests and the parameter identification in the air as well as between the parameter identification in the air and in the water.

##### 4.1 Primerjava med ločenimi testi in identifikacijo parametrov v zraku

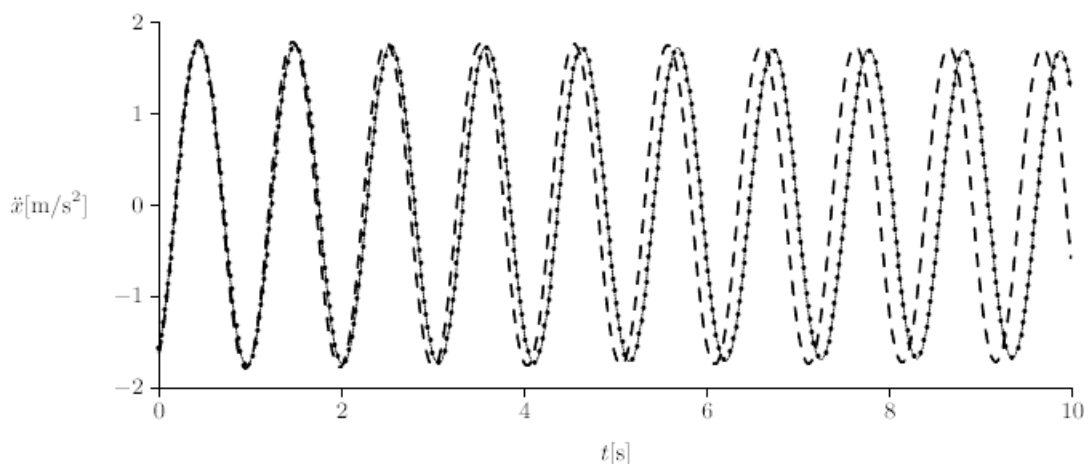
##### 4.1 Comparison between the separate tests and the parameter identification in the air

Primerjavo med parametri Duffingovega modela najdemo v preglednici 6. Vidimo lahko, da se najmanj razlikuje vrednost parametra  $a$  (-2,5 %). Obe vrednosti parametra  $a$  smo določili iz merjenega odziva sistema, torej dinamično. Nekaj večjo razliko med vrednostima parametrov najdemo pri parametru  $b$  (-7,7 %). Ocenili smo negativno vrednost parametra  $c$ , kar je konsistentno in opisuje regresivno karakteristiko vzmeti. Tako velika razlika, kakršno opazimo pri parametru  $c$ , je posledica majhne občutljivost Duffingovega modela na ta parameter in tudi s frekvenco povezanih vplivov pri dinamičnem testiranju, ki jih pri statičnem testu ni.

The comparison of the parameters of Duffing's model is shown in Table 6. We can see that the values of parameter  $a$  differ the least (-2.5 %). Both values of parameter  $a$  were estimated from a measured system response, i.e. dynamically. A somewhat larger difference in values can be found with the parameter  $b$  (-7.7 %). The parameter  $c$  is identified to be negative, which is consistent and describes the degressive spring characteristic. Such a big difference as seen with parameter  $c$  is due to the lower sensitivity of Duffing's model to that particular parameter and due to the frequency-dependent effects during dynamical testing, which are not present during static testing.

Primerjavo med merjenim pospeškom, simuliranim pospeškom, dobljenim na podlagi identificiranih parametrov Duffingovega modela, in simuliranim pospeškom, dobljenim na temelju parametrov Duffingovega modela, ocenjenih z ločenimi testi, prikazuje slika 10. Povsem jasno lahko vidimo, da ni bistvene razlike med merjenim odzivom

The comparison of the measured acceleration, the simulated acceleration based on identified parameters of Duffing's model and the simulated acceleration based on the separate tests of the parameters of Duffing's model are shown in Fig. 10. We can see clearly that there is no major difference between the measured response and the response



Sl. 10. Primerjava med merjenim pospeškom (—) z odzivom Duffingovega modela, dobljenega na podlagi ocenjenih parametrov, dobljenih z identifikacijo v zraku (· · · · ·), in parametrov, dobljenih z ločenimi testi (---).  
 Fig. 10. The comparison of the measured acceleration (—) with the Duffing's model response based on identified parameters from the approach in this paper (· · · · ·) and based on the static test and logarithmic decrement (---).

in z odzivom Duffingovega modela z identificiranimi parametri. Razlika pa je očitna med merjenim odzivom in odzivom Duffingovega modela, dobljenim s parametri in ocenjenimi z ločenimi testi.

#### 4.2 Primerjava med identifikacijo parametrov v zraku in v vodi

Primerjavo med parametri Duffingovega modela najdemo v preglednici 6. Vidimo lahko, da se najmanj razlikuje vrednost parametra  $b$  (0,4 %). Večjo razliko najdemo pri parametru  $c$  (-25,3 %). Razliko lahko pripišemo majhni občutljivosti Duffingovega modela na ta parameter. Opazimo lahko, da je vrednost parametra  $a$  več ko trikrat večja v vodi kakor v zraku.

#### 5 SKLEPI

V prispevku predstavljamo postopek parametrske identifikacije mehanskih sistemov z eno prostostno stopnjo na podlagi merjenega pospeška. Za prikaz metode smo uporabili Duffingov sistem. Postopek sledi diferencialni enačbi gibanja, ki jo lahko predstavimo kot algebrsko enačbo, če štejemo parametre za neznanke.

Eksperimentalno delo smo razdelili na tri sklope. V prvem delu smo statično določili vzmetno karakteristiko, v drugem pa smo določili vzmetno karakteristiko dinamično z uporabo predstavljene metode. Ekvivalentno viskozno dušenje, ki ga popisuje parameter  $a$ , smo prav tako določili na dva načina: najprej z uporabo logaritemskega dekrementa in v drugem delu z našim postopkom. Pokazali smo, da je težko razlikovati med merjenim odzivom in odzivom, dobljenim z uporabo našega postopka. Na drugi strani pa se odziv, dobljen na podlagi ločenih testov, vidno razlikuje od

based on the identification procedure. The difference between the measured response and the response based on parameters that have been determined by separate tests is clearly visible in Fig. 10.

#### 4.2 Comparison between the parameter identification in the air and in the water

The comparison of the identified parameters of Duffing's model are shown in Table 6. We can see that the values of parameter  $b$  differ the least (0.4 %). A larger difference in values can be found for parameter  $c$  (-25.3 %). Such a difference, as seen with parameter  $c$ , is due to the lower sensitivity of Duffing's model to that particular parameter. We can also see that the value of parameter  $a$  increases three times in the water in comparison to the air.

#### 5 CONCLUSIONS

In this paper an approach to parameter identification for the s.d.o.f mechanical system based on measured acceleration is presented. Duffing's system was taken into consideration. The approach follows the idea of computing the parameters of the differential equation of motion, which can be represented as an algebraic equation if the parameters are considered to be unknowns.

The experimental work was divided into three parts. In the first part the spring characteristic was determined statically and in the second part the spring characteristic was determined dynamically using our approach. The equivalent viscous damping described by parameter  $a$  was also estimated by two different methods, firstly by logarithmic decrement and secondly by our approach. It was shown that it is difficult to draw a distinction between the measured response and the response gained by our approach and that the response simulated on the basis of the static test and the logarithmic decrement significantly differs from the measured time history. In the third part the

merjenega. V tretjem delu preskusa smo dodali vodo in tako povečali raztros energije. Pokazali smo, da dobimo dobro ujemanje parametrov  $b$  in  $c$  pri identifikaciji v zraku in v vodi.

Rezultati kažejo, da predstavljena metoda identifikacije parametrov omogoča kakovostno oceno parametrov na kratkih časovnih vrstah (nekaj nihajev). Potrebuje tudi razmeroma skromno število točk in je uspešna na različnih sistemih z eno prostostno stopnjo. Omogoča preprosto določevanje parametrov in začetnih pogojev iz merjenega pospeška pri lastnem nihanju sistema. Metoda je neobčutljiva na začetne pogoje in poznati moramo le tip gibalne enačbe.

water is added and thus the energy dissipation of the system increased. It was shown that there is a good agreement with the identification in the air concerning the parameters  $b$  and  $c$ .

The results show that our approach offers parameter identification with good quality for short time series (a few cycles) using only a modest number of data points for a wide range of s.d.o.f. systems. It offers easy ways for computing the parameters and initial conditions from the free-acceleration-response data of the s.d.o.f. system. The approach is insensitive to initial conditions and only the type of equation of motion needs to be known.

## 6 LITERATURA 6 REFERENCES

- [1] Badrakhn, F. (1985) Separation and determination of combined dampings from free vibrations. *Journal of Sound and Vibration*, 100(2):243–255.
- [2] Natke, H.G. and M. Zamirowski (1990) On methods of structure identification for the class of polynomials within mechanical systems. *ZAMM - Z. angew. Math. Mech.*, 70(10):415–420.
- [3] Ying, C.-M. and B. Joseph (1999) Identification of stable linear systems using polynomial kernels. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 38:4712–4728.
- [4] Sekavčnik, M. (2000) Analysis of turbocharger impeller vibrations. *Journal of Mechanical Engineering - Strojniški vestnik*, 46(11/12):750–761.
- [5] Chen, Q. and G.R. Tomlinson (1996) Parametric identification of systems with dry friction and nonlinear stiffness using a time series model. *Transactions of the ASME - Journal of Vibration and Acoustic*, 118:252–263.
- [6] Boukhris, A., G. Mourot, and J. Ragot (1999) Non-linear dynamic system identification: a multi-model approach. *International Journal of Control*, 72(7/8):591–604.
- [7] Moustafa, K.A.F., and H.E. Emara-Shabaik (2000) Recursive parameter identification of a class of nonlinear systems from noisy measurements. *Journal of Acoustic and Control*, 6:49–60.
- [8] Rice, H.J. (1995) Identification of weakly non-linear systems using equivalent linearization. *Journal of Sound and Vibration*, 185(3):473–481.
- [9] Lee, G.-M. (1997) Estimation of non-linear system parameters using higher-order frequency response function. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11(2):219–228.
- [10] Feldman, M. (1994) Non-linear system vibration analysis using Hilbert transform - i. free vibration analysis method 'freevib'. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 8(2):119–127.
- [11] Feldman, M. (1994) Non-linear system vibration analysis using Hilbert transform - ii. forced vibration analysis method 'forcevib'. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 8(3):309–318.
- [12] Staszewski, W.J. (1998) Identification of non-linear systems using multi-scale ridges and skeletons of the wavelet transform. *Journal of Sound and Vibration*, 214(4):639–658.
- [13] Masri, S.F., A.G. Chassiakos, and T.K. Caughey (1993) Identification of nonlinear dynamic system using neural networks. *Transactions of the ASME - Journal of Applied Mechanics*, 60:123–133.
- [14] Chassiakos, A.G. and S.F. Masri (1996) Identification of structural systems by neural network. *Mathematic and Computers in Simulation*, 40:637–656.
- [15] Yadaiah, N., N. Sivakumar, and B.L. Deekshatulu (2000) Parameter identification via neural networks with fast convergence. *Mathematics and Computer in Simulation*, 51:157–167.
- [16] Yar, M. and J.K. Hammond (1987) Parameter estimation for hysteretic systems. *Journal of Sound and Vibration*, 117(1):161–172.
- [17] Ni, Y.Q., J.M. Ko, and C.W. Wong (1998) Identification of non-linear hysteretic isolators from periodic vibration tests. *Journal of Sound and Vibration*, 217(4):737–756.
- [18] Chassiakos, A.G., S.F. Masri, A.W. Smyth, and T.K. Caughey (1998) On-line identification of hysteretic systems. *Transactions of the ASME - Journal of Applied Mechanics*, 65:194–2038.
- [19] Smyth, A.W., S.F. Masri, A.G. Chassiakos, and T.K. Caughey (1999) On-line parametric identification of mdof nonlinear hysteretic systems. *Journal of Engineering Mechanics - ASCE*, 125(2):133–142.

- [20] Jakšič, N., M. Boltežar, and A. Kuhelj (2000) Parameter identification of a single degree of freedom dynamical system based on phase space variables. In N.S. Ferguson, H.F. Wolfe, M.A. Ferman, and S.A. Rizzi, editors, Seventh International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics, volume 2, pages 951–964, Southampton: University of Southampton, 24-27 July 2000., *Institute of Sound and Vibration Research*.
- [21] Jakšič, N., M. Boltežar, and A. Kuhelj (2000) Identifikacija parametrov lastnega nihanja mehanskih sistemov z eno prostostno stopnjo. In L. Škerget, editor, *Slovensko društvo za mehaniko*, Kuhljevi dnevi 2000, Zbornik del, strani 199–206, Maribor, 21.-22. September 2000. Slovensko društvo za mehaniko. (Parameter identification of natural vibrations of s.d.o.f. systems).
- [22] Jakšič, N., M. Boltežar, and A. Kuhelj (2001) Parameter identification of a single-degree-of-freedom system with spline interpolation and approximation. *Z. angew. Math. Mech.*, 81(suppl. 4):S895-S896.
- [23] Jakšič, N. and M. Boltežar (2001) An approach to parameter identification for the s.d.o.f. dynamical system based on short free acceleration response. *Journal of Sound and Vibration*, 250(3):465-483.
- [24] Jakšič, N. (2002) Identifikacija parametrov avtonomnih dinamičnih sistemov drugega reda. Doktorska teza (Parameter identification of the second-order autonomous dynamical system. PhD thesis) *Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo*.
- [25] Thompson, J.M.T. and H.B. Stewart (1986) Nonlinear dynamics nad chaos. *John Wiley and Sons Ltd.*, 6th reprint edition.

Naslov atvorjev: dr. Nikola Jakšič  
 doc.dr. Miha Boltežar  
 Fakulteta za strojništvo  
 Univerza v Ljubljani  
 Aškerčeva 6  
 1000 Ljubljana  
 nikola.jaksic@fs.uni-lj.si  
 miha.boltezar@fs.uni-lj.si

Authors' Address: Dr. Nikola Jakšič  
 Doc.Dr. Miha Boltežar  
 Faculty of Mechanical Eng.  
 University of Ljubljana  
 Aškerčeva 6  
 1000 Ljubljana, Slovenia  
 nikola.jaksic@fs.uni-lj.si  
 miha.boltezar@fs.uni-lj.si

Prejeto: 17.9.2001  
 Received:

Sprejeto: 20.9.2002  
 Accepted:

# Prostorska porazdelitev faktorja ugodja na temelju numeričnega modeliranja naravne konvekcije

## A Three-Dimensional Factor-of-Comfort Distribution Based on Numerical Modeling of Natural Convection

Aleš Glavnik - Matjaž Hriberšek - Leopold Škerget

*Prispevek obravnava prikaz načrtovanja notranjega ugodja v sistemih ogrevanja in klimatizacije. S predstavljenim algoritmom lahko že v fazi načrtovanja notranjega okolja napovemo delež ljudi, ki bodo v območju bivalne cone izražali zadovoljstvo s toplotnim okoljem ter s tem napovemo kakovost notranjega udobja v načrtovani bivalni coni. Takšen način načrtovanja ugodja je pomemben predvsem za inženirsko prakso, saj nam omogoča zagotovitev udobnega notranjega okolja ob majhnem zdravstvenem tveganju ljudi ob hkratnem upoštevanju porabe energije za doseganje tega udobja.*

© 2002 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: klimatizacija, prenos toplote, prenos snovi, konvekcija naravna, dinamika tekočin)**

*This paper discusses the problem of providing a comfortable indoor environment with heating and air-conditioning systems. With the use of an algorithm the thermal sensation and the degree of discomfort of people can be presented and acceptable thermal environmental conditions for comfort can be specified. The presented method for designing the thermal comfort is important for engineering practise and shows how to provide a comfortable indoor environment with a low health risk for the occupants.*

© 2002 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: air-conditioning, heat transfer, materials transfer, natural convection, fluid dynamics)**

### 0 UVOD

Načrtovanje ugodja v bivalni coni je z razvojem računalniške tehnologije, krmilnih sistemov in številnih raziskav o vplivu parametrov zraka na človeka v zadnjih letih doživelo silovit napredek. Z računalniškimi simuliranjmi se razvijajo novi načini prezračevanja z namenom, da bi se po eni strani povečalo ugodje ljudi v prostorih in se s tem zvečala učinkovitost na delovnem mestu, po drugi strani pa se z optimiranjem količine vpihovanega zraka v prostore le-ta zmanjšuje, kar vpliva na izbiro manjših elektromotorjev za pogon ventilatorjev ter skupaj s kakovostno rekuperacijo na zmanjšanje porabe električne energije in toplotnih izgub zaradi prezračevanja.

Namen načrtovanja ogrevanja, hlajenja, prezračevanja in klimatizacije je zagotoviti udobno notranje okolje ob majhnem zdravstvenem tveganju za ljudi, ki so v teh prostorih. Pri tem moramo upoštevati predvsem porabo energije za doseganje tega udobja, saj je bolj priporočljivo zmanjšati vire, ki onesnažujejo zrak, kakor pa povečati izmenjavo zraka v prostoru.

### 0 INTRODUCTION

Designing to provide comfort in an occupied zone has made a lot of progress with the development of computer design, control systems and considerable research on the influence of air quality. New ways to design a ventilation system with computer-aided design can be developed to increase people's comfort and their efficiency at work. It can have an influence on optimising the quantity of the air inlet, on reducing air consumption, and the use of smaller electric motors for ventilators, which together with recycling can reduce the consumption of electrical energy and heat resulting from ventilation.

The purpose of heating, cooling, ventilating and air-conditioning is to provide a comfortable indoor environment with a low health risk for the occupants. This environment should be achieved in such a way that the energy consumption is low. As a consequence, the best route is to reduce indoor pollution sources rather than increase the ventilation rate.



Pri načrtovanju se opiramo na standarde, ki določajo, kako kakovost notranjega okolja vpliva na obliko, delovanje in nadzor prezračevanja ter klimatizacijskih sistemov. Tako je za uspešno načrtovanje notranjega okolja treba določiti kriterije in območja, v katerih ti kriteriji še ustrezajo neki odločitvi. Treba je definirati kakovost notranjega okolja in jo primerjalno vrednotiti z raziskanimi vplivi na človekovo počutje. Da pa bi dobili natančne odgovore, je treba določiti kakovost okolja v vseh točkah bivalnega okolja, saj bomo le tako lahko zagotovo že v fazi načrtovanja zagotovili udobje v bivalni coni.

Standardni načini analize primernosti klimatizacije za izbrani prostor in delovne razmere uporabljajo integralni postopek, ki temelji na povprečnih vrednostih vplivnih parametrov. Zaradi resnice, da na počutje ljudi v prostoru v glavnem vplivajo lokalne vrednosti vplivnih parametrov (hitrost in temperatura zraka v določenem delu prostora, kjer se oseba zadržuje), lahko takšen način obravnave problema kaj hitro postane nezadosten.

Pomembno novost pri projektiranju notranjega okolja so v zadnjih letih prinesle metode računalniške dinamike tekočin ([1] in [9]), ki temeljijo na numeričnem reševanju vodilnih enačb toka tekočin in prenosa toplote, katerih rezultat so lokalne vrednosti vplivnih parametrov. Z numerično analizo [7] lahko tako določimo območje v prostoru, kjer se bo določen odstotek ljudi zagotovo počutil udobno, kar je tudi cilj projektiranja klimatizacije prostorov. Prispevek tako podaja nov postopek neposrednega določanja vrednosti parametrov za vrednotenje toplotnega okolja, ki temelji na metodah računalniške dinamike tekočin.

## 1 OPIS POSTOPKOV OCENITVE PRIMERNOSTI KLIMATIZACIJE

Preden se posvetimo osnovnemu cilju prispevka, si oglejmo na kratko opis parametrov in postopkov ocenitve primernosti klimatizacije. Najpomembnejši dejavnik, dejavnik ugodja, je definiran kot numerična vrednost, ki napoveduje toplotni občutek skupine ljudi na večstopenjski skali ob hkratni napovedi odstotka nezadovoljnih ljudi, ki niso v toplotnem ravnovesju z okolico. Če lahko torej s sistemom ogrevanja in klimatizacije že v fazi načrtovanja zagotovimo ustrezno toplotno okolje za predvideni odstotek zadovoljnih ljudi, lahko govorimo, da tudi dejansko "načrtujemo ugodje" v prostoru. Parametre, ki vplivajo na določitev dejavnika ugodja, podajajo standardi ([3] do [5]). Ti ponujajo v večini primerov tri kategorije kakovosti okolja, ki ga je treba prezračevati: kategorije A, B in C. Za vsak prostor ali stavbo si lahko izberemo različno kategorijo za toplotno okolje, kakovost zraka in akustično okolje.

We use standards to specify how the quality of the indoor environment can be expressed for the design, commissioning, operation and control of ventilation and air-conditioning systems. For the successful design of indoor environment criteria and of occupied zones these standards should be defined to get the appropriate solutions for designing the comfort. The quality of the indoor environment should be defined and compared with researched influences on the human body. To get useful answers the quality of the indoor environment should be defined for every point of the occupied zone and after that we can say that we design the indoor environment.

The standard's access to analyse appropriate air-conditioning systems for a defined room and working conditions uses an integral approach which is based on the average values of influential parameters. Because most influences on indoor comfort have local values of influential parameters (the velocity and temperature of the air in a defined part of the room where people can be expected) standard access can very quickly become insufficient.

In recent years an important novelty in the design of the indoor environment has been introduction of computational fluid dynamics ([1] and [9]), which are based on the numerical solutions of the governing equations of fluid flow and heat transfer, the solutions of which are local values of the influential parameters. With a numerical analysis [7] we can define a zone in the space where a certain percentage of the occupants feel satisfied, and this is the essence of designing air-conditioning. This paper gives us a new approach to define the values of parameters in order to evaluate the indoor environment, which is based on the methods of computational fluid dynamics.

## 1 DESCRIPTION OF THE PROCEDURES USED TO ESTIMATE THE APPROPRIATE AIR-CONDITION

Before we focus on the main aim of the paper, let us have a look at a description of the parameters and procedures for estimating the appropriate air-condition. The most important index, the factor of comfort, is defined as the numerical mean value of the votes of a large group of people on a many-point scale at the predicted percentage of dissatisfied people, who are not in thermal balance with the surrounding environment. If we can ensure the appropriate indoor environment for a known percentage of satisfied people with the heating and air-conditioning system early in the design phase we can say that we actually "design the comfort" in a room. The parameters that influence and determine the comfort factor are presented in standards ([3] to [5]), which offer, in most cases, three categories of environment quality to be ventilated: categories A, B and C. For each room or building we can choose a different category for the thermal environment, the air quality and the acoustic environment.

Pri načrtovanju klimatizacije prostora je treba vključiti tudi toplotno ravnovesje človeškega telesa, kar pomeni, da moramo zagotoviti takšno toplotno okolje, da bo nastajanje toplote znotraj človekovega telesa ves čas v ravnovesju z izgubami toplote v okolico.

Kakovost notranjega okolja se izraža kot stopnja, do katere ljudje v prostoru še izražajo zadovoljstvo. Kakovost okolja izražamo z odstotkom ljudi, ki v danih razmerah niso zadovoljni z okoljem (gre torej za odstotek nezadovoljnih). Če je delež nezadovoljnih majhen, je kakovost okolja velika in nasprotno.

Za vrednotenje toplotnega okolja je treba definirati naslednje pojme in enote :

- **NSO (napovedana srednja ocena - PMV):** vrednost, ki napoveduje toplotni občutek skupine ljudi na večstopenjski lestvici
- **NON (napovedan odstotek nezadovoljnih - NON):** to je vrednost, ki napove odstotek nezadovoljnih ljudi z notranjim okoljem (prostorom), ki niso v toplotnem ravnovesju z okolico;
- **standardna oseba:** oseba s telesno površino  $A=1,8 \text{ m}^2$  pri metabolizmu 1 met ( $58,2 \text{ W/m}^2$ ) (človek, ki počiva).

Odziv ljudi na toplotno okolje se izraža z napovedano srednjo oceno (NSO) in napovedanim odstotkom nezadovoljnih (NON). Prav tako se odziv ljudi na toplotno okolje izraža v napovedanem odstotku nezadovoljnih ob različnih vrstah lokalnega toplotnega neugodja, ki je lahko posledica prepriha (gibanja zraka), prevelike navpične temperaturne razlike v bivalni coni (gleženj - glava), pretoplih ali premrzlih tal ter prevelike sevalne temperaturne nesimetrije [7].

Za kolikostno določanje dejavnika ugodja uporabimo indeks NSO - napovedano srednjo oceno, to je vrednost, ki napoveduje toplotni občutek skupine ljudi na sedemstopenjski lestvici, podani v Preglednici 1.

NSO je odvisen od šestih parametrov: a) stopnje dejavnosti ljudi, b) toplotnih vrednosti oblačil, c) temperature zraka, d) povprečne sevalne temperature, e) hitrosti zraka in f) vlažnosti zraka. Indeks NSO temelji na toplotnem ravnovesju človeškega telesa, kar pomeni, da je proizvodnja toplote znotraj človeškega telesa v ravnovesju z izgubami (oddajo) toplote v okolico. Izračuna se lahko za različne kombinacije stopenj metabolizma, oblačil, temperature prostora, srednje sevalne temperature, hitrosti zraka in vlažnosti zraka.

Preglednica 1. Vrednosti parametra NSO

Table 1. Values of parameter PMV

+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
vroče hot	toplo warm	prijetno toplo slightly warm	nevtravno neutral	prijetno hladno slightly cool	hladno cool	mrzlo cold

When we design the air-condition in an indoor space we should also include the thermal balance of the human body, which means that we should ensure an indoor thermal environment such that the internal heat production in the human body is equal to the loss of heat to the environment.

The quality of the indoor environment is expressed as the degree until people in the space still express satisfaction. The quality of the environment is expressed as the percentage of people who are not satisfied with the environment. If the percentage of dissatisfied people is low, the quality of the environment is high and vice versa.

The following notions and units should be defined to evaluate the thermal environment:

- **PMV (predicted mean vote):** an index that predicts the mean value of the thermal sensation votes of a large group of people on a many-point scale;
- **PPD (predicted percentage of dissatisfied):** an index that predicts the percentage of a large group of people that is likely to feel thermally dissatisfied for the body as a whole;
- **standard person:** a person with a surface area  $A=1.8 \text{ m}^2$  and metabolic rate 1 met ( $58.2 \text{ W/m}^2$ ) (person at rest)

The human response to the thermal environment is expressed by the predicted mean vote (PMV) and the predicted percentage of dissatisfied (PPD). The human response is also expressed by the percentages of occupants predicted to feel dissatisfied due to different types of local thermal discomfort, which can be caused by a draught, by an abnormally high vertical temperature difference, by a too warm or too cool floor or too high a radiant temperature asymmetry [7].

To determine the quantity of the factor of comfort we use the PMV index – the predicted mean vote – which predicts the mean value of the thermal sensation votes of a large group of people on a seven-point scale, given in table 1.

The PMV depends on six parameters: a) the occupants' physical activity, b) the thermal resistance of their clothing, c) the air temperature, d) the mean radiant temperature, e) the air velocity and f) air humidity. The PMV index is based on the heat balance of the human body, which means that the internal heat production in the body is equal to the loss of heat to the environment. The PMV can be calculated for different combinations of metabolic rate, clothing, air temperature, mean radiant temperature, air velocity and air humidity.

Kakovost notranjega toplotnega okolja opisuje NON in pomeni vrednost, ki napove odstotek nezadovoljnih ljudi z notranjim toplotnim okoljem (prostorom), ki niso v toplotnem ravnovesju z okolico. Določimo ga po predhodnem izračunu NSO z izkustvenim izrazom 1 [4]:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (1)$$

Odstotek ljudi z napovedano oceno toplotnega ugodja se za določene vrednosti lahko prikaže tudi s preglednico 2, v kateri izračunamo vrednosti faktorjev NSO in NON z uporabo enačbe 1.

The quality of the indoor thermal environment describes the PPD and represents a value that predicts the percentage of people dissatisfied with the indoor thermal environment, who are not balanced with the environment. It can be defined after previously calculating the PMV with the empirical expression 1 [4]:

The percentage of persons predicted to vote on thermal comfort for some values can be expressed with table 2., in which we calculate the values of factors PMV and PPD with the use of equation 1.

Preglednica 2. Odstotek ljudi z napovedano oceno toplotnega ugodja

Table 2. Percentage of persons predicted to vote

NSO PMV	NON PPD	Odstotek ljudi z napovedano oceno Percentage of persons predicted to vote		
		0	-1, 0 ali/or +1	-2, -1, 0, +1, +2
+2	75	5	25	70
+1	25	27	75	95
0	5	55	95	100
-1	25	27	75	95
-2	75	5	25	70

## 2 FIZIKALNO-MATEMATIČNI MODEL

Za numerično reševanje toka realne tekočine je treba postaviti ustrezen fizikalno-matematični model, ki skupaj s predpostavkami in poenostavitvami pomeni temelj za diskretizacijo problema. Dejanske tekočine so viskozne in stisljive ter se gibljejo neustaljeno. Naloga inženirja je, da ob poznavanju teorije in na podlagi praktičnih izkušenj izbere ustrezen fizikalno matematični model, s katerim dosega zadovoljive rezultate v praktičnih preračunih.

Vodilne enačbe so Navier-Stokesove enačbe neustaljenega gibanja newtonske viskozne tekočine [9], pri čemer pa moramo zaradi naravne konvekcije upoštevati še vzgonske sile, ki so v teh primerih mnogo večje od vztrajnostnih. V primeru naravne konvekcije obravnavamo tekočino kot nestisljivo, razen pri spremembi gostote, ki povzroča nastanek vzgonskih sil. Ta poenostavitev se nanaša na znan Boussinesqueov približek:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 - \beta(T - T_0) \quad (2)$$

kjer je  $\beta$  prostorninski termični razteznostni koeficient. Boussinesqueov približek je uporaben v veliki večini primerov, pri katerih temperaturne razlike niso prevelike. Če poleg tega lahko štejemo, da so lastnosti tekočine nespremenljive znotraj obravnavanega območja, se sistem enačb za laminarni tok tekočine poenostavi v obliko:

– kontinuitetna enačba:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (3)$$

## 2 PHYSICAL MATHEMATICAL MODEL

For numerical calculations of the actual fluid flow an appropriate physical mathematical model should be built, and together with assumptions and simplifications the basis should be defined for the discretisation of the problem. Actual fluids are viscous and compressible, and the flow is unsteady. The engineer's job is to choose the appropriate physical mathematical model with a knowledge of theory and on the basis of experience, which helps him to achieve appropriate sufficient results in practical calculations.

The governing equations are the Navier-Stokes equations for unsteady flow for Newtonian viscous fluid [9], where due to the natural convection, buoyancy forces should be taken into consideration, and in many cases these forces can be much greater than the inertial forces. In the case of natural convection the fluid is treated as incompressible, except for the change of density, which causes the body force. This simplification refers to the well-known Boussinesq approximation

where  $\beta$  is the coefficient of thermal expansion. The Boussinesq approximation can be used in most cases where the temperature differences are not too big. And if we can also assume that the properties of the fluid are constant inside the treated domain, the system of equations for laminar flow can be simplified in the following form:

– continuity equation:

– gibalna enačba:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = \eta \nabla^2 \vec{v} - \nabla(p - p_o) - \rho \beta (T - T_o) \vec{g} \quad (4)$$

– momentum equation

– energijska enačba:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \rho c_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) T \right] = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + I = \lambda \nabla^2 T + I \quad (5)$$

– energy equation

Te enačbe so osnovne enačbe za obravnavo naravne konvekcije v zaprtih prostorih. Pri reševanju teh enačb za določene začetne in robne pogoje je treba uporabiti numerični način oziroma metode računalniške dinamike tekočin. Za numerično analizo je bil uporabljen programski paket CFX 4.3, ki uporablja metodo končnih prostornin. Problem kontinuuma z neskončno prostostnimi stopnjami se spremeni v diskreten problem s končnim številom prostostnih stopenj, opisan s sistemom algebrskih enačb ([2] in [6]).

These equations are the basic equations for the treatment of natural convection in closed domains. To solve these equations for a defined start and boundary conditions a numerical treatment should be used or methods of computational fluid dynamics. For the numerical analysis the CFX4.3 program was used, this program uses the method of finite control volumes. The problem of continuum with an infinite degrees of freedom is converted into a discretised problem with a finite number of degrees of freedom, described with a system of algebraic equations ([2] and [6]).

Za numerični izračun faktorja ugodja NSO in odstotka nezadovoljnih NON v vsaki točki prostora je treba uporabiti rešitve modela sistema Navier-Stokesovih enačb ter dodatno uporabiti enačbe, ki podajajo odvisnost faktorja ugodja od določenih parametrov, ti temeljijo na vzpostavitvi toplotnega ravnovesja človeškega telesa. V primeru upoštevanja notranjih toplotnih virov in virov vlage je treba sistem Navier-Stokesovih enačb dopolniti še s toplotnimi in snovskimi viri in dodatno prenosno enačbo vlage.

For numerical calculations of the factor of comfort (PMV) and the predicted percentage of dissatisfied (PPD) at each point in space we use the solutions of the model of the system of Navier-Stokes equations, and we additionally use equations that give us the dependence of the factor of comfort and defined parameters which are based on the thermal balance of the human body. In the case of the use of internal thermal sources and sources of humidity, the system of Navier-Stokes equations should be completed with heat and material sources as well as the transfer equation of humidity.

Po razrešitvi sistema Navier-Stokesovih enačb nadaljnji izračun faktorja ugodja v vozliščnih točkah diskretiziranega modela prostora omogoči enačba [4]:

After obtaining solutions for the system of Navier-Stokes equations we calculate the factor of comfort in the nodes of the discretisation model with the use of equation [4]:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - \\ - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99(M - W) - p_a] - \\ - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - \\ - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - \\ - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - \\ - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [t_{cl} + 273]^4 - (t_r + 273)^4 \\ - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\} \quad (6)$$

ter enačbe [4]:

and equations [4]:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ \begin{array}{l} 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [t_{cl} + 273]^4 - (t_r + 273)^4 \\ + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} \rightarrow 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \rightarrow 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (8)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} \rightarrow I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{ W} \\ 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} \rightarrow I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \text{ K} / \text{ W} \end{cases} \quad (9)$$

iz katerih je razvidno, da je treba poprej podati še vrednosti nekaterih spremenljivk, od katerih je določene možno dobiti šele z iteracijo teh enačb. Posamezne

from which we can see that some values are needed and some of them we do not obtain before the iteration of these equations. The variables used in equation



spremenljivke v enačbah (6) do (8) imajo naslednji pomen:

- $M$  - stopnja metabolizma [ $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$ ]  
 $W$  - zunanje delo (za večino dejavnosti ima vrednost 0) [ $\text{W/m}^2$ ]  
 $I_{cl}$  - toplotna izolacija (toplotni upor), dosežena z oblačilom [ $\text{clo}$ ][ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]  
 $f_{cl}$  - razmerje površine oblečenega in slečenega človeškega telesa  
 $t_a$  - temperatura zraka [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\bar{t}_r$  - srednja sevalna temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $t_{cl}$  - površinska temperatura obleke [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $v_{ar}$  - relativna hitrost zraka (glede na človeško telo) [ $\text{m/s}$ ]  
 $p_a$  - delni tlak vodne pare [ $\text{Pa}$ ]  
 $h_c$  - toplotna prestopnost [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]

V splošnem lahko celoten postopek numeričnega določanja faktorja ugodja strnemo v:

Algoritem 1: Numerično določanje faktorja ugodja

1. izbira obravnavanega območja in projektnih parametrov prostora,
2. določitev načina ogrevanja in/ali klimatizacije,
3. določitev robnih in začetnih pogojev za numerični izračun,
4. reševanje sistema enačb (3) do (5) z ustreznim programskim paketom RDT,
5. določitev vrednosti spremenljivk iz enačb (6) do (9),
6. določitev vrednosti faktorja NSO,
7. določitev vrednosti faktorja NON.

### 3 TESTNI PRIMER

Za računalniško simuliranje testnega primera smo izbrali kombinacijo talnega ogrevanja za ustaljeno pokrivanje toplotnih izgub in klimatizacijo za doseganje optimalnih pogojev udobja v prostoru. Testni primer je zasnovan za zimski režim obratovanja, kjer je mogoče vključiti tudi talno ogrevanje. Klimatizacija je izvedena z izpodravnim načinom prezračevanja, pri katerem je dovod zraka pri tleh ob zunanji steni, odvod pa v notranjosti prostora v stropnem delu. V praksi se takšen način ogrevanja in klimatizacije uporablja v novejših poslovnih stavbah in stanovanjskih hišah, kjer želi investitor zagotavljati veliko ugodje ob majhni porabi energije. Investicija v takšne sisteme je nekoliko večja kakor na primer pri radiatorjem ogrevanju, se pa kmalu povrne zaradi nižjih temperatur ogrevalnega medija (kondenzacijski kotli) in nadzorovane ventilacije, ki praktično več ne ustvarjata toplotnih izgub.

Kot testni prostor je rabil običajni pisarniški prostor z izmerami širina/dolžina/višina = 3,0/5,0/3,0 metrov, z enim oknom (sl. 1). V prostoru zaradi poenostavitve geometrijskega modela ni zajeto pisarniško pohištvo, vsekakor pa je moč v pisarniškem prostoru dodatno modelirati tako pasivne ovire (pisarniško pohištvo) kakor grelne elemente (generacija toplote pri električnih napravah, npr. računalnikih in monitorjih).

(6) to (8) are as follows:

- $M$  - the metabolic rate [ $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$ ]  
 $W$  - the external work (equal to 0 for most activities) [ $\text{W/m}^2$ ]  
 $I_{cl}$  - the thermal resistance of clothing [ $\text{clo}$ ][ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]  
 $f_{cl}$  - the ratio of a man's surface area while clothed, to a man's surface area while naked  
 $t_a$  - the air temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\bar{t}_r$  - the mean radiant temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $t_{cl}$  - the surface temperature of clothing [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $v_{ar}$  - the relative air velocity (relative to the human body) [ $\text{m/s}$ ]  
 $p_a$  - the partial water-vapour pressure [ $\text{Pa}$ ]  
 $h_c$  - the convective heat-transfer coefficient [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]

The whole procedure to numerically define a factor of comfort we can generally merge in:

Algorithm 1: Numerically defining the factor of comfort

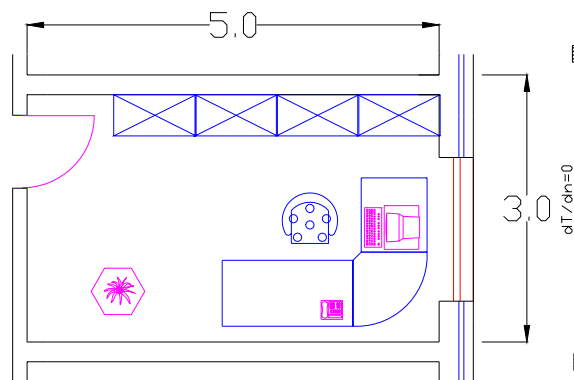
1. Selection of the treated area and the project parameters of the space,
2. defining the system of heating and/or air-conditioning,
3. defining boundary and start conditions for numerical calculations,
4. solving the system of equations (3) to (5) with an appropriate computer program,
5. defining values of the variables from equations (6) to (9),
6. defining the values of the index PMV,
7. defining the values of the index PPD.

### 3 TEST EXAMPLE

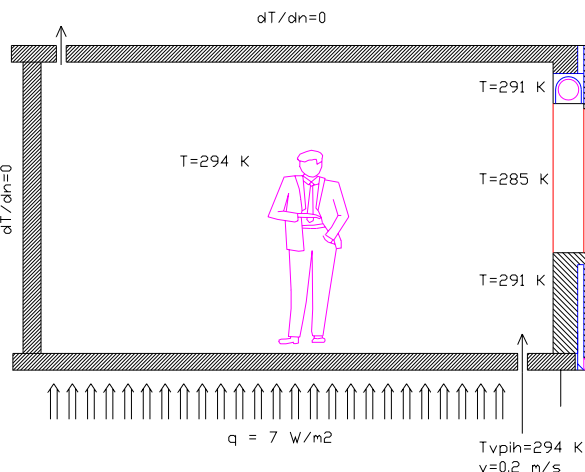
For numerical simulations of the test example we selected the combination of floor heating to cover the steady heating losses and an air-conditioning system to reach the optimum conditions for the comfort in the space. The test example is designed for a winter mode of work, where we can include floor heating. Air-conditioning is executed in the mode of under-pushing ventilation, where the air inlet is at the floor of an outer wall, but the air outlet is in the inside of the space in the part of the ceiling. In practice we use such heating and air-conditioning systems in new business or residential buildings, where investors want to have comfort with a low consumption of energy. The investment in such systems is higher than, for example, just heating with radiators, but it is repaid early because of the lower temperatures of the heating medium (condense boilers) and controlled ventilation, which does not present any practical heating loss.

As the test example we have used a typical office space with dimensions width/length/height = 3.0/5.0/3.0 meters, with one window, as shown in Figure 1. Because of rationalizing the geometry model of the space we did not include office furniture, but it can be added in any case to moderate as passive obstructions (office furniture) or active elements (heating with electrical devices, i.e. computers, monitors).





Sl. 1. Gradbeni tloris testnega primera  
Fig. 1. Architectural plane of test example



Sl. 2. Robni pogoji testnega primera  
Fig. 2. Boundary conditions of test example

Sredstvo v prostoru je zrak s fizikalnimi lastnostmi pri projektni temperaturi v prostoru  $T=294\text{ K}$ , atmosferskem tlaku v prostoru  $p_{\text{atm}} = 101,325\text{ kPa}$ , gostoto  $\rho = 1,1774\text{ kg/m}^3$ , specifično toploto  $c_p = 1005,7\text{ J/kgK}$ , toplotno prevodnostjo  $\lambda = 0,02624\text{ W/mK}$ , dinamično viskoznostjo  $\eta = 1,846 \cdot 10^{-5}\text{ kg/ms}$  in koeficientom prostorninskega temperaturnega raztezka  $\beta = 1/T = 1/294\text{ K}$ .

Robni pogoji za numerični izračun so bili (grafično predstavljeni na sliki 2): toplotni tok iz tal  $q_{\text{TLA}} = 7\text{ W/m}^2$ , notranja površinska temperatura okna  $T_{\text{OK}} = 285\text{ K} = 12^\circ\text{C}$ , notranja površinska temperatura zunanega zidu  $T_{\text{ZZ}} = 291\text{ K} = 18^\circ\text{C}$ , potreben dovod svežega zraka  $\dot{V}_{\text{DOVOD}} = 400\text{ m}^3/\text{h}$  ter vpihovna hitrost iz talnega elementa  $v_N = 0,2\text{ m/s}$  s temperaturo  $294\text{ K}$ . Pri izračunu faktorja udobja NSO v prostoru so bile upoštevane vrednosti parametrov, podanih v preglednici 3.

Na slikah 3 do 12 so za določene posamezne prostorske prereze prikazana hitrostna in temperaturna polja v izbranih prerezih skozi obravnavani prostor. Slike 10 do 16 prikazujejo prostorsko porazdelitev relativne vlažnosti, vrednosti faktorja udobja NSO in odstotka nezadovoljnih NON.

Analiza rezultatov osnovnega testnega primera temelji predvsem na preučevanju območja bivalne cone, ki je odločilna za počutje ljudi. Pri tem nismo dajali bistvenega poudarka območjem zunaj bivalne cone, torej nad višino  $180\text{ cm}$  in do  $20\text{ cm}$  od sten. Ne glede na to so rezultati predstavljeni za celotni prostor in razberemo lahko, da je zelo pomembno, kakšno območje si izberemo za bivalno cono, saj širitev tega območja neposredno vpliva na način porazdelitve zraka ter na način ogrevanja, kar lahko zelo hitro bistveno podraži celotni sistem klimatizacije in ogrevanja.

Iz rezultatov preračuna je razvidno, da so relativne hitrosti v bivalni coni med  $0,01$  in  $0,05\text{ m/s}$ , kar je daleč pod največjimi dopustnimi za namembnost pisarne in nimajo negativnega vpliva na počutje ljudi v prostoru. Razen v neposredni

The medium in the space is air, with physical properties at the project temperature in the space  $T = 294\text{ K}$ , atmospheric pressure in the space  $p_{\text{atm}} = 101.325\text{ kPa}$ , density  $\rho = 1.1774\text{ kg/m}^3$ , heat capacity  $c_p = 1005.7\text{ J/kgK}$ , heat conductivity  $\lambda = 0.02624\text{ W/mK}$ , dynamic viscosity  $\eta = 1.846 \cdot 10^{-5}\text{ kg/ms}$  and coefficient of thermal expansion  $\beta = 1/T = 1/294\text{ K}$ .

The boundary conditions for the numerical calculation were (graphically presented in Figure 2): heat flux from the floor  $q_{\text{TLA}} = 7\text{ W/m}^2$ , internal surface temperature of a window  $T_{\text{OK}} = 285\text{ K} = 12^\circ\text{C}$ , internal surface temperature of an outer wall  $T_{\text{ZZ}} = 291\text{ K} = 18^\circ\text{C}$ , required inlet of fresh air  $\dot{V}_{\text{DOVOD}} = 400\text{ m}^3/\text{h}$  and the inlet velocity from the floor element  $v_N = 0.2\text{ m/s}$  with temperature  $294\text{ K}$ . For calculating the factor of comfort (PMV) in the space the values presented in table 3 were used.

In Figures 3 to 12 are the speed and temperature fields for some specific space cross-sections in selected cross-sections through the treated space. Figures 10 to 16 show in the space divided relative humidity, the values of the factor of comfort (PMV) and the percentage of dissatisfied PPD.

The analysis of the results of the test example is based mainly on a study of the occupied zone, which is suitable for people's feeling. In the calculations we did not specially study unoccupied zones, that is the height over  $180\text{ cm}$  and distances up to  $20\text{ cm}$  from the walls. Nevertheless, the results are presented for the whole space and we can see how very important it is to choose where the occupied zone is, because extending that space has an influence on the way the air is distributed and on the heating system, which can significantly raise the price of heating and air-conditioning.

From the results of the calculations we can see that the relative speeds in the occupied zone are between  $0.01$  and  $0.05\text{ m/s}$ , which is much less than the maximum allowed for space use in offices, and does not have any negative influence on people's

Preglednica 3. Parametri za izračun ugodja  
 Tabel 3: Parameters for calculating the comfort

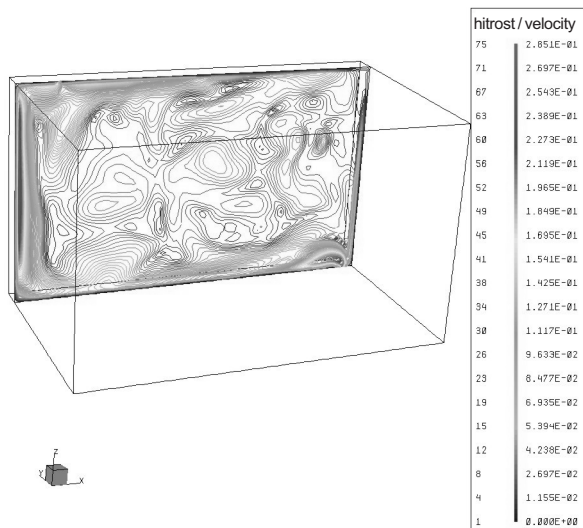
	Parameter	Oznaka Label	Vrednost Value	Enota Unit
1.	Stopnja metabolizma Metabolic rate	$M$	1,2 69,744	met W/m <sup>2</sup>
2.	Zunanje delo External work	$W$	0	met
3.	Toplotna izolacija, ki jo dosežemo z oblačilom Thermal resistance of clothing	$I_{cl}$	1,0 0,155	clo m <sup>2</sup> K/W
4.	Razmerje površine oblečenega in nepokritega človeškega telesa Ratio of person's surface area while clothed, to person's surface area while naked	$f_{cl}$	1,15	---
5.	Srednja sevalna temperatura Mean radiant temperature	$\bar{t}_r$	18	°C
6.	Prevodnostni koeficient obleke Convective heat-transfer coefficient	$h_c$	3,56	W/m <sup>2</sup> K
7.	Površinska temperatura obleke, dobljena z 2. iteracijo enačbe (7) Surface temperature of clothing from 2. iteration of equation (7)	$t_{cl}$	25	°C
8.	Temperatura zraka v prostoru Air temperature	$t_a$	<b>rezultati preračuna results of the calculation</b>	°C
9.	Relativna hitrost zraka (glede na človeško telo) Relative air velocity (relative to the human body)	$v_{ar}$	<b>rezultati preračuna results of the calculation</b>	m/s
10.	Delni tlak vodne pare [8] Partial water-vapour pressure [8]	$p_D$	<b>dobljeno iz rezultatov preračuna results from the calculation</b>	Pa
11.	Nasičeni parni tlak vode [8] Saturated water-vapour pressure [8]	$p^*_D$	<b>dobljeno iz rezultatov preračuna results from the calculation</b>	Pa
12.	Relativna vlažnost [8] Relative humidity [8]	$\varphi$	<b>dobljeno iz rezultatov preračuna results from the calculation</b>	%
13.	NSO - napovedana srednja ocena PMV – predicted mean vote	PMV	<b>dobljeno iz rezultatov preračuna results from the calculation</b>	---
14.	NON - napovedan odstotek nezadovoljnih PPD - predicted percentage of dissatisfied  $PPD = 100 - 95 \cdot e^{-\left(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2\right)}$	PPD	<b>dobljeno iz rezultatov preračuna results from the calculation</b>	%

bližini vpihovanja oz. sesanja zraka, so relativne hitrosti ugodne.

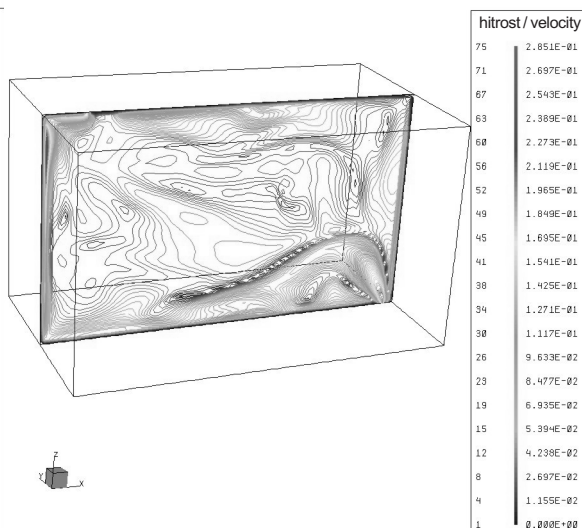
Temperatura in občutena temperatura sta zelo bistveni pri pojmovanju udobja, saj večina ljudi izraža nezadovoljstvo prav z izrazi, ki so povezani s temperaturo v prostoru : prevroče, premrzlo, prenizka temperatura in podobno. S slike 9 so razvidne izoterme med 21°C in 21.5°C. Vidimo lahko, da so v bivalni coni višje temperature opazne v območjih, kjer so manjše hitrosti zraka, kar seveda vpliva na končni izračun faktorja ugodja oz. na počutje ljudi, saj nekoliko višje temperature ob manjših hitrostih zraka in nasprotno ugodno vplivajo na počutje.

feelings in the space. Except for areas very close to the air inlet or air outlet, they are very suitable.

Temperature and extensive temperature are very important for an understanding of comfort because most people express dissatisfaction with words connected with a temperature in the space: too hot, too cold, too low a temperature, and so on. In Fig. 9 are the isotherms between 21°C and 21.5°C, and we can see that the space over the occupied zone has higher temperatures and a lower speed of air, which has an influence on calculating the factor of comfort on people's feelings, because a slightly higher temperature at a lower speed of air and vice versa have a positive influence on people's feelings.



Sl. 3. Absolutne hitrosti v prerezu  $y = 270$  cm  
 Fig. 3. Absolute speed in section  $y = 270$  cm



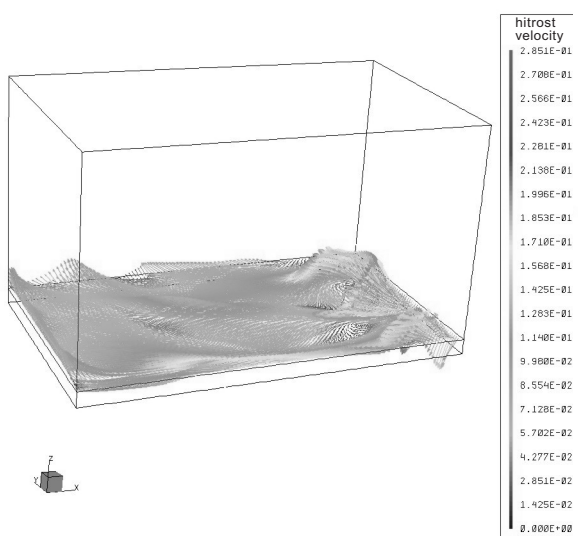
Sl. 4. Absolutne hitrosti v prerezu  $y = 150$  cm  
 Fig. 4. Absolute speed in section  $y = 150$  cm

Zaradi potrebnega izračunavanja delnega tlaka vodne pare in nasičenega parnega tlaka je mogoče vzporedno z izračunavanjem faktorja ugodja izračunati še relativno vlažnost v prostoru. Iz rezultatov razberemo, da je relativna vlažnost skoraj povsod po prostoru enakomerna in se giblje v testnem primeru med 48% in 49% v bivalni coni. V mejni plasti zunanega zidu in okna je opazno povečanje relativne vlažnosti celo do 85%, vendar do kondenzacije ne prihaja.

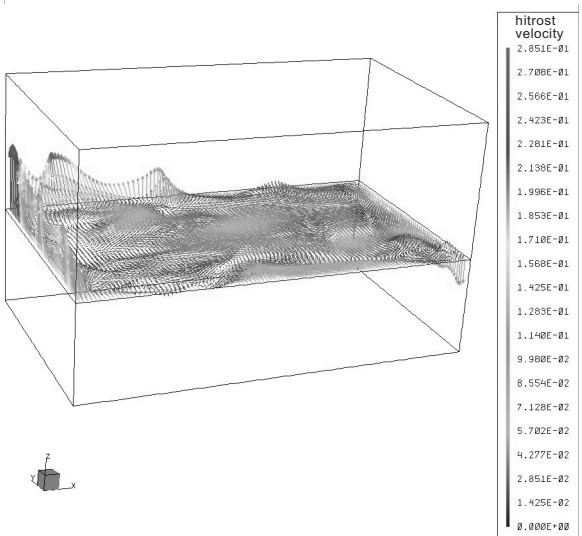
Glavni del analize je analiza faktorja ugodja in njegova prostorska porazdelitev. Največje vrednosti so skoraj povsod v prostoru v mejah med  $-0,8$  in  $-0,5$ , kar pomeni, da je testni primer prikaz velikega ugodja v prostoru. Zelo zanimiva je slika 11, ki prikazuje območje faktorja ugodja NSO za ozko območje  $-0,7$  do  $-0,6$  in v večini zapolnjuje prostor v bivalni coni. Prostor je torej projektiran za ljudi

Because we have to calculate partial water-vapour pressure and saturated water-vapour pressure we can, in parallel with calculating the factor of comfort, also calculate the relative humidity in the space. From the results we can see that the relative humidity is uniform almost everywhere in the space and reaches values in the test example between 48% and 49% in the occupied zone. In the border zone of the outer wall and the window an increase in the relative humidity can be seen, up to 85%, but there is still no condensation.

The main part of the analysis is the analysis of the factor of comfort in this space distribution. The maximum values almost everywhere in the space are between  $-0.8$  and  $-0.5$ , which means that the test example is an example of high comfort in the space. Figure 11 is very interesting, it shows the range of the factor of comfort (PMV) between  $-0.7$  and  $-0.6$  and almost everywhere fills the space in the occupied zone. The space is designed



Sl. 5. Vektorji hitrosti v prerezu  $z = 20$  cm  
 Fig. 5. Velocity vectors in section  $z = 20$  cm



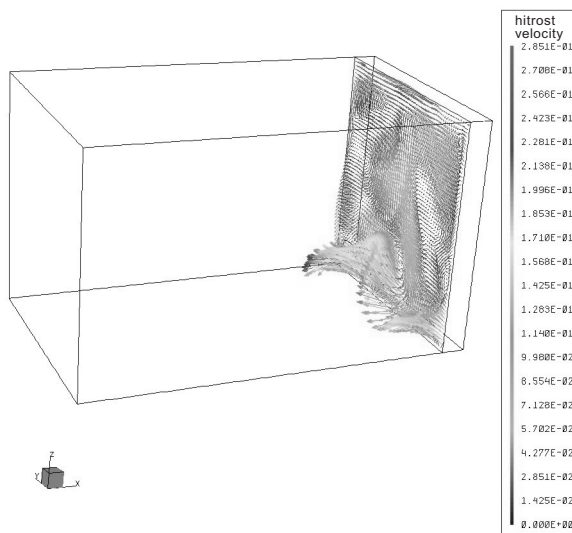
Sl. 6. Vektorji hitrosti v prerezu  $z = 150$  cm  
 Fig. 6. Velocity vectors in section  $z = 150$  cm

kategorije B. V primeru, da bi želeli doseči udobje za skupino ljudi A, bi moral biti faktor ugodja NSO v bivalni coni v mejah med  $-0,2 < NSO < +0,2$ , kar pa je v praksi povezano z visokimi stroški izvedbe.

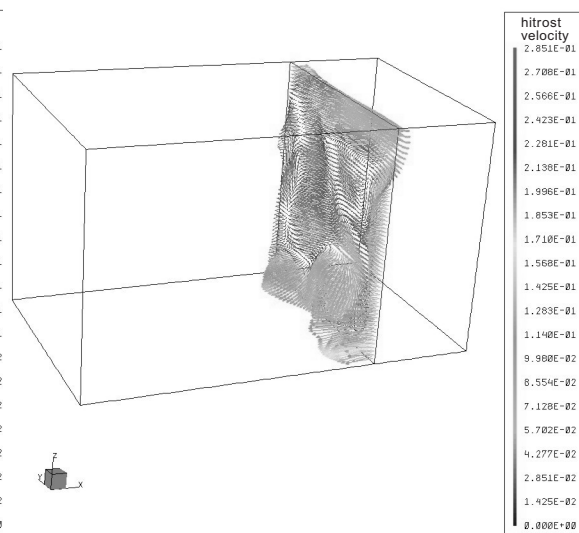
Z uporabo enačbe (1) lahko ob znanem faktorju ugodja v vsaki točki prostora dobimo tudi napovedan odstotek nezadovoljnih NON. Iz rezultatov je razvidno, da ni bistvenih razlik v celotnem območju bivalne cone in da je napovedan odstotek nezadovoljnih NON povsod nekje med 12% do 17%. V celotnem območju bivalne cone torej lahko napovedujemo, da bo vedno nekje med 83% in 88% ljudi s projektiranimi pogoji zadovoljnih, drugi bodo nezadovoljni.

for B-category people. If we want to reach the comfort for the A group of people, the values of the factor of comfort should be between  $-0,2 < PMV < +0,2$ , but this means more expensive systems and higher costs.

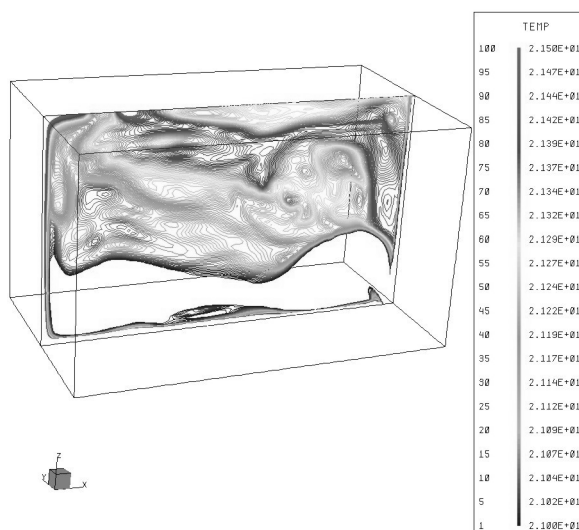
With the use of equation (1) and known values of the factor of comfort we can calculate the index PPD for each point in the space. We can see from the results that there are no essential differences in the whole space of the occupied zone and that the values of the predicted percentage of dissatisfied PPD is always between 12% and 17%. In the whole space of the occupied zone we can predict that there will always be between 83% and 88% of people satisfied with the designed conditions, the rest will be dissatisfied.



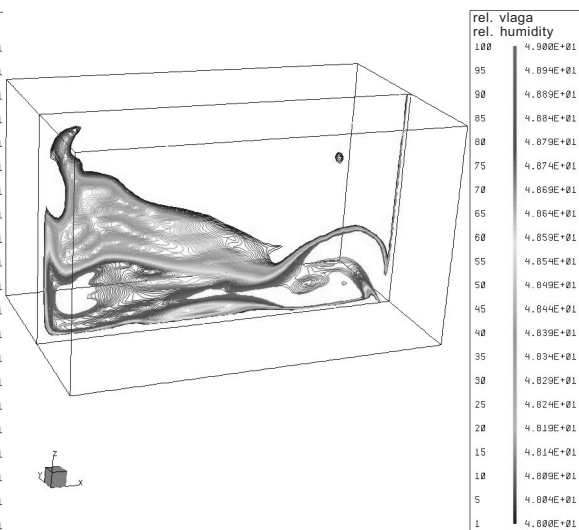
Sl. 7. Vektorji hitrosti v prerezu  $x = 450$  cm  
Fig. 7. Velocity vectors in section  $x = 450$  cm



Sl. 8. Vektorji hitrosti v prerezu  $x = 350$  cm  
Fig. 8. Velocity vectors in section  $x = 350$  cm

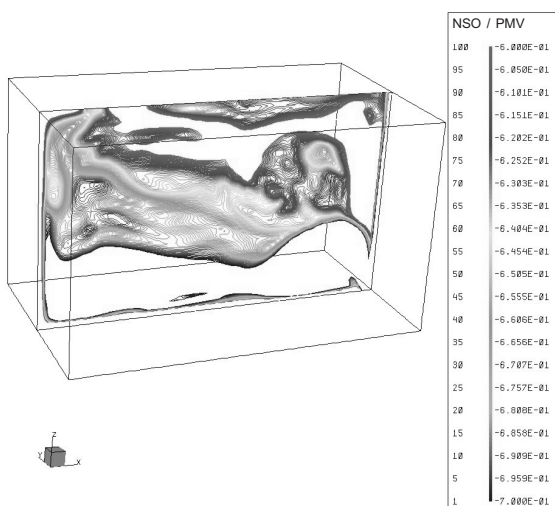


Sl. 9. Izoterme med  $21^{\circ}\text{C}$  in  $21,5^{\circ}\text{C}$   
Fig. 9. Isotherms between  $21^{\circ}\text{C}$  and  $21,5^{\circ}\text{C}$

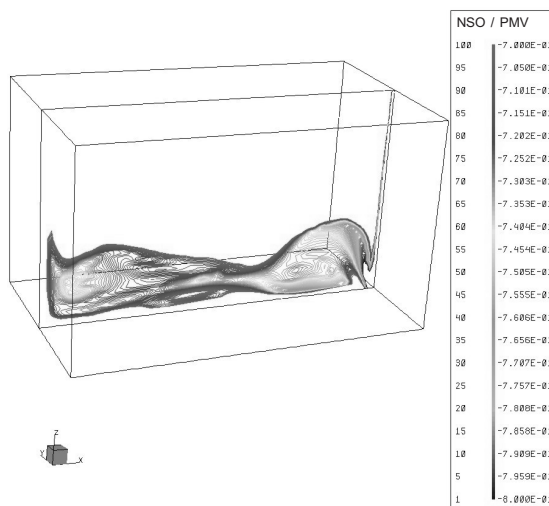


Sl. 10. Izolinije relativne vlage od 48% do 49%  
Fig. 10. Isolines of relative humidity from 48% to 49%

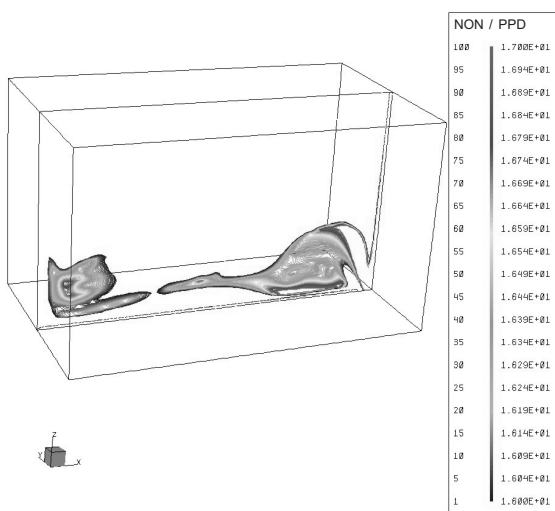




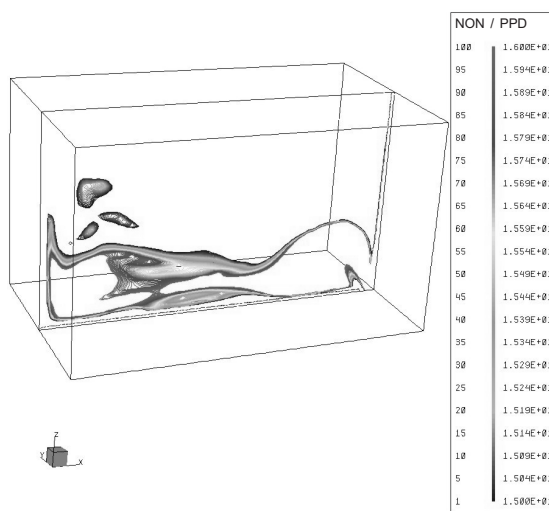
Slika 11. Izolinije faktorja NSO od  $-0,7$  do  $-0,6$   
 Fig. 11. Isolines of factor PMV from  $-0.7$  to  $-0.6$



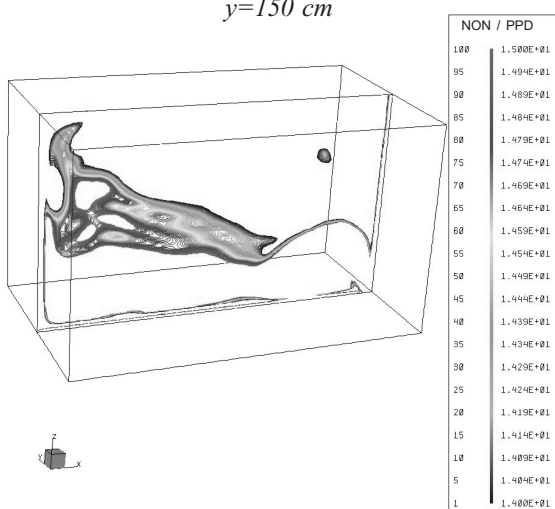
Slika 12. Izolinije faktorja NSO od  $-0,8$  do  $-0,7$   
 Fig. 12. Isolines of factor PMV from  $-0.8$  to  $-0.7$



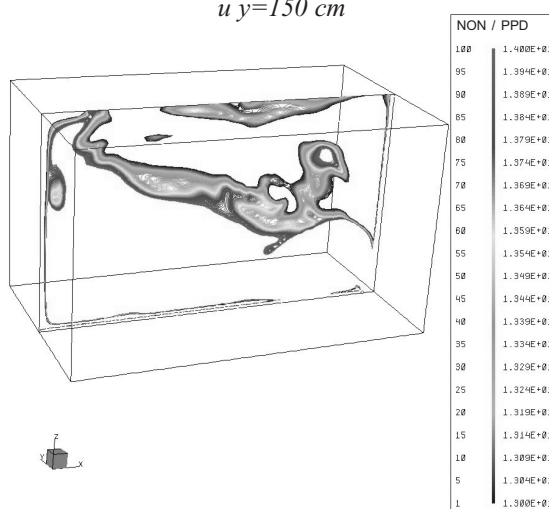
Sl. 13. NON = 16% do 17% nezadovoljnih v  
 prerezu  $y=150$  cm  
 Fig. 13. PPD = 16% to 17% dissatisfied in section  
 $y=150$  cm



Sl. 14. NON = 15% do 16% nezadovoljnih v  
 prerezu  $y=150$  cm  
 Fig. 14. PPD = 15% to 16% dissatisfied in section  
 $u$   $y=150$  cm



Sl. 15. NON = 14% do 15% nezadovoljnih v  
 prerezu  $y=150$  cm  
 Fig. 15. PPD = 14% to 15% dissatisfied in section  
 $y=150$  cm



Sl. 16. NON = 13% do 14% nezadovoljnih v  
 prerezu  $y=150$  cm  
 Fig. 16. PPD = 13% to 14% dissatisfied in section  
 $y=150$  cm



4 PRIKAZ VPLIVA SPREMEMB ROBNIH POGOJEV

4 PRESENTATION OF THE INFLUENCE OF CHANGES TO THE BOUNDARY CONDITIONS

Za prikaz vpliva sprememb robnih pogojev na rezultate in s tem na udobje ter odstotek nezadovoljnih smo uporabili dodatno k osnovnemu primeru še dve kombinaciji robnih pogojev, prikazanih v preglednici 4.

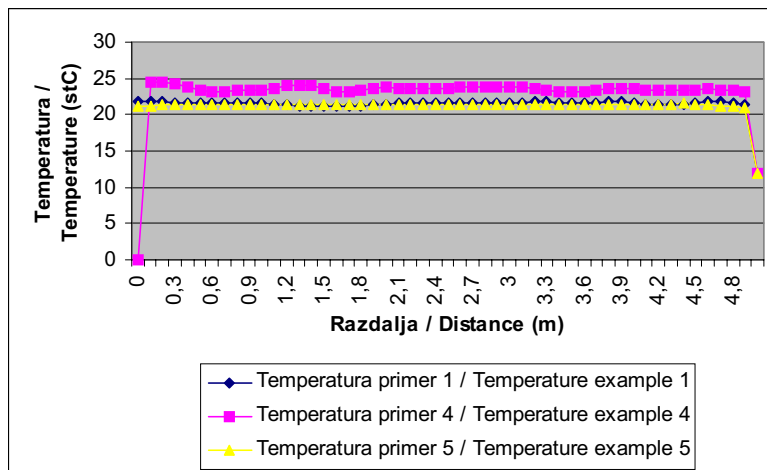
To present the influence of changes to the boundary conditions on results, and consequently on comfort, and the percentage of dissatisfied, we have, in addition to the base example, used two more combinations of boundary conditions, presented in table 4.

Preglednica 4. Tri kombinacije robnih pogojev za numerično analizo faktorja ugodja  
Table 4. Three combinations of boundary conditions for the numerical analysis of the factor of comfort

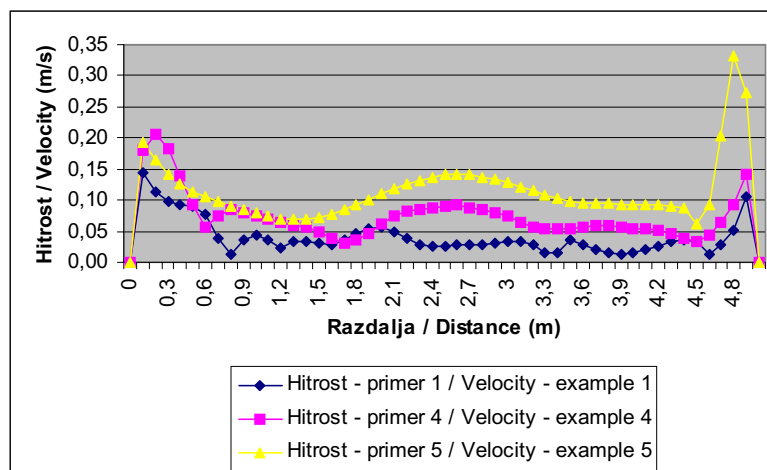
Primer numerične analize Example of numerical analysis	Toplotni tok iz tal Heat flux from the floor W/m <sup>2</sup>	Hitrost vpihovanega zraka Speed of inlet air m/s	Temperatura vpihovanega zraka Temperature of inlet air °C
Primer 1 / Example 1	7	0,2	21
Primer 4 / Example 4	20	0,2	21
Primer 5 / Example 5	7	0,6	21

Spreminjali smo moč toplotnega toka v kombinaciji s hitrostjo vpihovanega zraka, medtem ko je temperatura vpihovanega zraka ostajala ves čas nespremenjena, saj v klimatizaciji lahko temperaturo krmilimo centralno v klimatizirani napravi.

The heat flux in combination with the speed of the inlet air were varied, but the temperature of the inlet air was constant in all examples, because the temperature in an air-conditioning system can be easily controlled in the central air-conditioning device.



Sl. 17. Primerjava rešitev temperature za primere 1, 4 in 5 glede na vpliv sprememb robnih pogojev  
Fig. 17. Comparison of results for temperature for examples 1, 4 and 5 because of the changing boundary conditions



Sl. 18. Primerjava rešitev absolutne hitrosti za primere 1, 4 in 5 glede na vpliv sprememb robnih pogojev  
Fig. 18. Comparison of results for absolute speed for examples 1, 4 and 5 because of the changing boundary conditions

Na slikah 17 do 19 je prikazan vpliv spremembe robnih pogojev na temperaturno polje v prerezu po sredini dolžine prostora na višini 1,5 metra od tal.

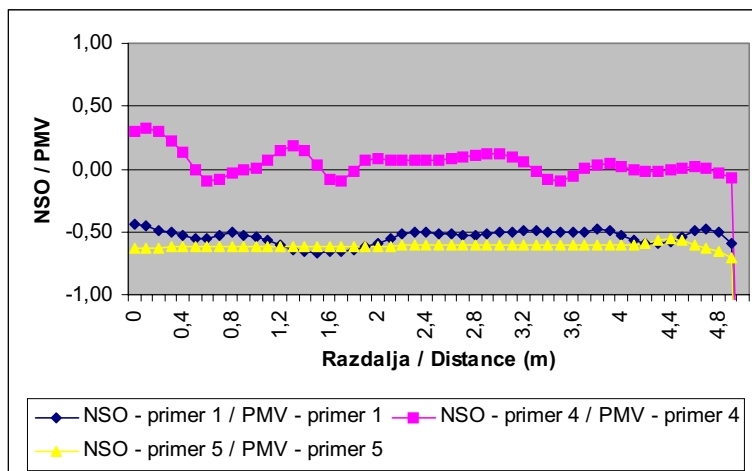
Spremeni se tudi hitrostno polje, kar je razvidno iz slike 18.

Največjo spremembo opazimo v spremembi faktorja ugodja NSO, razvidno s slike 19.

In Figures 17 to 19 the influence on the temperature field because of the changing boundary conditions is shown in the cross-section in the middle of the length of the room at a height 1.5 metres from the floor.

Also, the speed field has changed, presented in Figure 18.

The biggest change can be seen in the change of the factor of comfort (PMV), presented in Figure 19.



Sl. 19. Primerjava rešitev NSO za primere 1, 4 in 5 glede na vpliv sprememb robnih pogojev  
 Fig. 19. Comparison of results for PMV for examples 1, 4 and 5 because of the changing boundary conditions

## 5 SKLEP

Iz predstavitve rezultatov testnih primerov je razvidna praktična uporabnost novega postopka načrtovanja notranjega okolja.

Prikazani način novega načrtovanja notranjega okolja tako omogoča, da že v fazi načrtovanja napovemo delež ljudi, ki bodo v območju bivalne cone izražali zadovoljstvo s toplotnim okoljem ter s tem podati doseženo kakovost notranjega udobja v načrtovani bivalni coni.

## 5 CONCLUSION

From the presented results of the test examples the practical use of a new approach to the design of an indoor environment has been demonstrated.

The presented method of the new approach to designing an indoor environment allows us to predict early in the design phase the percentage of people who will be satisfied with the thermal environment in the space of the occupied zone and with the use of this approach it enables us to reach the desired quality of indoor environment in the occupied zone.

## 6 LITERATURA 6 REFERENCES

- [1] Alujevič, A., L. Škerget, L. (1990) Prenos toplote, Univerza v Mariboru, Tehniška fakulteta.
- [2] CFX 4.3, General purpose control-volumes program, AEA Technology (2000).
- [3] DIN 1946 Teil 2 : RAUMLUFTTECHNIK - Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI - Lüftungsregeln), Januar 1994.
- [4] EN ISO 7730, MODERATE THERMAL ENVIRONMENTS - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort (1994).
- [5] EUROPEAN PREDSTANDARD prENV 1752 / Prevzet po metodi razglasitve PSIST prENV 1752, maj 1996.
- [6] FIDAP 8.5, General purpose finite-element program, Fluent Inc. (1998).
- [7] Glavnik, A. (2001) Prostorska porazdelitev faktorja ugodja na osnovi numeričnega modeliranja naravne konvekcije, Magistrsko delo, Fakulteta za strojništvo Maribor.
- [8] Jones, W.P. (1994) Air conditioning engineering / London: British Library Cataloguing in Publication Data.
- [9] Škerget, L. (1994) Mehanika tekočin. Univerza v Mariboru, Tehniška fakulteta in Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo.

Naslov avtorjev: mag. Aleš Glavnik  
prof.dr. Leopold Škerget  
prof.dr. Matjaž Hriberšek  
Univerza v Mariboru  
Fakulteta za strojništvo  
Smetanova 17  
2000 Maribor  
leo@uni-mb.si  
matjaz.hribersek@uni-mb.si

Authors' Address: Mag. Aleš Glavnik  
Prof.Dr. Leopold Škerget  
Prof.Dr. Matjaž Hriberšek  
University of Maribor  
Faculty of Mechanical Eng.  
Smetanova 17  
2000 Maribor, Slovenia  
leo@uni-mb.si  
matjaz.hribersek@uni-mb.si

Prejeto: 27.2.2002  
Received:

Sprejeto: 20.9.2002  
Accepted:

# Naprava s pnevmatično aktivno površino: Tehnike krmiljenja gibljivih predmetov

## A Pneumatic Active-Surface Device: Control Techniques for Flexible Objects

Suzana Uran - Riko Šafarič

*Pomanjkanje proizvodnih tehnik za rokovanje z velikim številom majhnih predmetov pomeni tehnološko oviro za tržni uspeh na različnih področjih mikroelektromehanskih sistemov (MEMS). V prispevku je predstavljen bistveno nov postopek avtomatizacije množičnega hkratnega rokovanja z majhnimi predmeti. Raziskana je naprava s pnevmatično aktivno površino (NPAP), ki omogoča veliko gibljivost in hkratno krmiljenje velikega števila predmetov. Pihanje ali sesanje zračnega toka skozi cevke naprave z aktivno pnevmatično površino povzroča želeno premikanje predmetov na aktivni površini naprave. Ta prispevek opisuje eksperimentalno delo, opravljeno na prototipu naprave s pnevmatično aktivno površino. V njem obravnavamo tehnike krmiljenja brez povratne zveze za premik in vrtenje gibljivih predmetov. Zaradi motenj, ki povzročajo odstopanja od želenega gibanja, smo razvili tudi krmiljenje premika gibljivih predmetov brez povratne zveze ob hkratnem krmiljenju vrtenja s povratno zvezo.*

© 2002 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: deli mali, rokovanje s predmeti, naprave pnevmatične, zaznavanje predmetov, krmiljenje)**

*The current lack of manufacturing techniques for very-high-volume handling of small objects presents a technology barrier to commercial success in various fields like micro-electro-mechanical systems (MEMS). A fundamentally new approach to the automated, massive, parallel manipulation of small-sized parts is explored in this paper. We have investigated a pneumatic active-surface device (PASD) that offers great flexibility and simultaneous control of several objects. By either blowing or sucking air through the tubes of the PASD we can cause objects placed on the array to be moved in useful ways. This paper describes our experimental work on a prototype PASD. Open-loop control techniques for translation in two degrees of freedom and the rotation of flexible objects on a PASD are considered. Due to disturbances that cause deviations to the desired motion, open-loop translation control with closed-loop rotation control was also developed.*

© 2002 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: small parts, objects manipulation, pneumatic control equipment, object sensing, control techniques)**

### 0 UVOD

Množična proizvodnja miniaturnih komponent, kakršna so integrirana vezja, mikroelektromehanski sistemi (MEMS) ipd. zahtevajo bistvene izboljšave na področju rokovanja s predmeti. Te komponente so izdelane na temelju postopka mikroproizvodnje, ki izvira iz tehnologije VLSI. Le ta omogoča proizvodnjo tisoč ali milijon komponent hkrati. Naprava s pnevmatično aktivno površino (NPAP) uporablja nov postopek avtomatiziranega rokovanja predmetov. Namesto rokovanja s posameznimi predmeti (npr. z robotskim prijematlom [12]) z napravo s pnevmatično aktivno površino premikamo mnoge predmete hkrati. Naprava s

### 0 INTRODUCTION

The mass production of miniature components such as integrated circuits, micro-electro-mechanical systems (MEMS), etc. requires fundamental innovations in parts handling. These components are built using microfabrication processes derived from VLSI technology, which allows the manufacture of thousands or millions of components in parallel. A pneumatic active surface device (PASD) uses a new approach to automated object (part) manipulation. Instead of handling a single object directly, for example, with a robot gripper [12], a PASD can be used to move multiple objects simultaneously. This new au-

pnevmatično aktivno površino omogoča vzporedno in porazdeljeno zaznavanje in vzbujanje in je še posebno primerna za rokovanje s serijsko mikroproizvedenimi predmeti, katerih majhne izmere (manj kot milimeter) in veliko število ne omogočajo običajnega rokovanja (pick and place) z robotskimi prijematli. V zadnjem času so bile razvite mnoge podobne naprave:

1. Programljivo polje sil je matrika velikega števila programljivih točk mikrogibanja [1], [5]. Pri krmiljenju gibanja predmetov po programljivem polju sil je uporabljena strategija »ožajočih se vzorcev« [1], [2], [7] ob uporabi analize ravnotežnega stanja [1] do [3]. Naprava je opisana v [1], [2] in ima pomembne lastnosti, to so: občutljiva je na poškodbe in nima vgrajenih zaznaval. Zato za premikanje predmetov po njej ni mogoča izvedba krmiljenja s povratno zvezo. Naš postopek uporablja zaznavala tlaka, ki se uporabljajo za zaznavanje predmeta na NPAP, zato omogoča zaznavanje predmeta na podlagi njegove ploskve, s katero se dotika pnevmatično aktivne površine. Zato naš postopek omogoča izvedbo tehnik krmiljenja s povratno zvezo.
2. Navidežno vozilo [4] je zgrajeno iz celic, ki predstavljajo mehanizem z dvema prostostnima stopnjama. Za krmiljenje vsake izmed celic je uporabljen zapleten postopek krmiljenja, saj je za krmiljenje vsake celice potreben mikroprocesor (MC68HC11). Vsaka celica je informacijsko povezava s preostalimi celicami s serijsko povezavo RS232. Nemogoče si je predstavljati, koliko komunikacijske in računalniške pomoči bi bilo potrebno za izvedbo matrike z nekaj sto tisoč celicami, ki bi premikale mikroskopsko majhen predmet. Osnovna celica naše naprave (cevka in zaznavala tlaka), ki je načrtovana za premikanje mikroskopsko majhnih delcev, je izvedena preprosteje, zato bi bil potreben en mikroprocesor (MC68000) za vodenje prek deset tisoč celic.
3. Prve mikroproizvedene celice in matrike na podlagi zračnega toka so bile predstavljene v [6], toda o njih ni poročil o uporabljenih strategijah krmiljenja predmetov po matriki. Naše tehnike krmiljenja omogočajo od oblike predmeta neodvisno krmiljenje osnovnih premikov s povratno zvezo in brez nje in zavrtitev za toge in elastične predmete. Nekatera poročila o krmiljenju in rokovanju predmetov na programljivem polju sil so v [1] do [3] in [7] in so delno vplivala na razvoj naših tehnik krmiljenja.
4. Mnoge skupine raziskovalcev MEMS so zgradile aktuatorske matrike za mikrorokovanje, ki so običajno zgrajene iz 'gibalnih točk'. Naprave so zgradili prej omenjeni avtorji ([1], [4] do [6] in v [8] do [11]).

Opis celotnega prototipa NPAP in analiza stabilnosti togega objekta na površini naprave po Ljapunovovi metodi sta predstavljena v [13]. Tehnike za premikanje s povratno zvezo in brez nje,

tomation device permits parallel and distributed, sensing and actuation, and is particularly attractive for handling batch microfabricated objects, whose small dimensions (sub-millimeter) and large numbers do not allow conventional pick-and-place operations with robot grippers. Recently, several similar devices have been invented:

1. Programmable force field (massive, parallel array of programmable micromotion pixels [1], [5]) has a control strategy called "squeeze patterns" [1], [2], [7] using equilibrium analysis [1] to [3]. The device described in [1], [2] has an important disadvantage because it is susceptible to damage and has no integrated sensors. Therefore, closed-loop position-control methods cannot be used for moving objects on a surface with the programmable force fields. Our approach uses pressure sensors that are used to sense an object on the surface of the PASD, which allows the use of object-recognition from the footprint of the object sensed by pressure sensors as well as the use of closed-loop position techniques.
2. The Virtual Vehicle [4] uses a complicated control technique that requires a complete microprocessor (MC68HC11) to control a two-degree-of-freedom mechanical mechanism. Each cell is linked with the other cells via a RS232 serial link. It is impossible to imagine how much communication and computing power would be needed for an array of a few hundred thousand micromachined actuators (cells) for carrying near-microscopic objects. The basic cell (a tube and a pressure sensor) of our device, which is designed to carry near-microscopic objects is controlled in a simpler way, so that only one microprocessor (MC68000) is needed to control over ten thousand cells.
3. The first airflow-based micromachined cells and arrays were presented in [6], but no control strategy for moving objects on the array was published. Our control techniques allow basic open-loop and closed-loop rigid and flexible object movements (translation, rotation, flip) that are independent of the object's shape. Some reports of the control and manipulation of objects on programmable force fields are reported in [1] to [3] and [7], and these have been partly influential in the development of our control techniques.
4. Several groups of MEMS researchers have designed and built actuator arrays for micromanipulation, which usually consist of "motion pixels". These devices were built by the previously referred to authors ([1], [4] to [6], and also by [8] to [11]).

The complete prototype design of a PASD and a Lyapunov stability analysis of an object on the device has been presented in [13]. The open-loop and closed-loop position-control techniques for



vrtenje in preobračanje togih predmetov, manjših od 1 mm, so opisane v [14]. V tem prispevku, objavljenem v Strojniškem vestniku pa predstavljamo tehnike krmiljenja s povratno zvezo in brez nje za premikanje in vrtenje gibljivih predmetov na NPAP.

## 1 GIBANJE GIBLJIVIH PREDMETOV NA NAPRAVI S PNEVMATIČNO AKTIVNO POVRŠINO (NPAP)

Gibanje predmetov na napravi s pnevmatično aktivno površino (NPAP) je zelo zanimivo zaradi širokega razreda nalog pakiranja in zaradi tega, ker gibljivi predmeti, kakršni so polivinilasti trakovi, izboljšujejo gibanje togih predmetov na NPAP [14]. Za premikanje gibljivih predmetov v obliki tankih polivinilastih trakov so bile na NPAP razvite in preizkušene različne strategije krmiljenja. Različne materiale, kakor sta papir in polivinil, z različnimi debelinami smo preskusili v ta namen. Preskusi so pokazali, da je za sedanjo velikost NPAP (4 x 4 mm) običajen 75 g/m<sup>2</sup> papir pretog. Najbolje se je obnesla dovolj tanka, 0,5 mm debela, polivinilasta folija. Dolžina tipičnega traku, uporabljenega za preskuse, je bila enaka približno 5-kratni dolžini NPAP, medtem ko je bila širina tipičnega traku enaka približno 60 odstotkom širine NPAP.

Strategijo gibanja gibljivih predmetov, ki je obravnavana v tem poglavju, smo imenovali strategija 'gosenice'. Strategija 'gosenice' je koračen postopek krmiljenja. Gibanje gibljivega predmeta (traku) je gibanje z majhnimi diskretnimi koraki. Pri tem je en korak sestavljen iz zaporedja podkorakov, ki so določeni z značilnim zaporedom sesanja in pihanja cevki NPAP. Na začetku je obširna obravnava krmiljenja brez povratne zveze, na koncu prispevka pa je predstavljen primer krmiljenja s povratno zvezo gibljivega predmeta na NPAP.

### 1.1 Krmiljenje gibanja brez povratne zveze

Obravnavamo ravninsko gibanje na površini NPAP. Ravninsko gibanje ima tri prostostne stopnje gibanja in je v splošnem opisano s premikom vzdolž osi x, premikom vzdolž osi y in vrtenjem okoli osi z referenčnega koordinatnega sistema. Zato je v nadaljevanju predstavljeno krmiljenje brez povratne zveze vzdolžnega in vrtilnega gibanja.

#### 1.1.1 Gibanje vzdolž dolžine traku

Gibljivost predmeta, ki ga premikamo, je zelo pomembna za strategijo premikanja 'gosenice'. Za obliko traku je značilna majhna širina in velika dolžina. Zato je gibljivost traku največja vzdolž dolžine traku. Posledica tega je, da je strategija gibanja 'gosenice' najprimernejša za gibanje vzdolž dolžine traku. Na drugi strani pa je zaradi majhne

translation, rotation and flipping of a sub-millimeter rigid object has been described in [14]. And finally, the open-loop and closed-loop control techniques for the translation and rotation of flexible objects on the PASD are described in this paper, the third in a series published in the Journal of Mechanical Engineering.

## 1 THE MOTION OF FLEXIBLE OBJECTS ON THE PNEUMATIC ACTIVE-SURFACE DEVICE (PASD)

The motion of flexible objects on the PASD is of great interest in a wide range of packing tasks and because flexible objects, such as polyvinyl foil bands, improve the motion of rigid-body objects on the PASD [14]. Control strategies for the motion of flexible objects in the form of thin bands were developed and tested on the PASD. Different materials, such as paper and polyvinyl foil with different thickness were tested for this purpose. The experiments showed that for the existing size of the PASD (4 x 4 mm), normal 75 g/m<sup>2</sup> paper is too rigid. Sufficiently thin (0.5 mm) polyvinyl foil gave the best performance in the experiments. The length of a typical band used in the experiments was approximately five times the length of the PASD, while the width of a typical band used was approximately 60% of the PASD's width.

The motion-control for flexible objects on the surface of the PASD is considered in this section. The motion control strategy for flexible objects is called a "caterpillar" strategy. The caterpillar strategy is a step-by-step control procedure. The motion of the flexible object (the band) is a motion in small, discrete steps. One step is the result of a sequence of substeps. Substeps are defined by a characteristic pattern of blowing and sucking actions of the PASD. Open-loop motion control for flexible objects is extensively discussed at the beginning, and an attempt at a closed-loop motion control for flexible objects is presented at the end of the paper.

### 1.1 Open-Loop Control of Motion

Planar motion on the surface of the PASD is considered. Planar motion has three degrees of freedom (DoF) and is, in general, described by a translation along the x-axis, a translation along the y-axis and a rotation about the z-axis of a reference coordinate system. Therefore, translational and rotational open-loop control is presented in the following subsections.

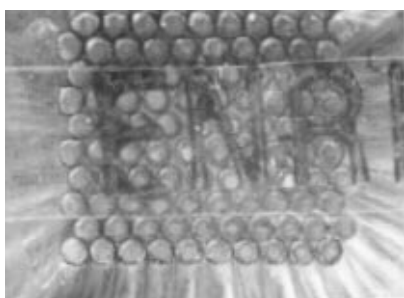
#### 1.1.1 Translational Motion Along the Length of the Band

The flexibility of the object to be moved is of great importance for the caterpillar control strategy. The shape of the band is characterized by a narrow width and a long length. Consequently, the flexibility of the band is the greatest along the length of the band. Therefore, the caterpillar motion control strategy is natural (the most suitable) for translational motion along the length of the

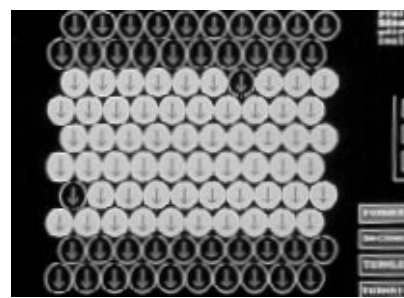
širine traku gibljivost traku vzdolž širine zelo majhna. Zato strategije gibanja 'gosenice' ne moremo uporabiti neposredno za gibanje vzdolž širine traku in zato neposredna uporaba strategije 'gosenice' vodi le do enoprostostnega vzdolžnega gibanja na NPAP. Manjkajoča prostostna stopnja gibanja je izvedena z bolj zapleteno uporabo strategije gibanja 'gosenice', ki je opisana v razdelku 1.1.3.

Referenčni koordinatni sistem je postavljen v levi spodnji vogal NPAP, tako da leži ravnina x-y koordinatnega sistema na površini NPAP in tako da leži os x referenčnega koordinatnega sistema vzdolž vrstic cevk NPAP. Lastni koordinatni sistem traku je pritrjen v levi spodnji vogal traku, tako da leži os x lastnega koordinatnega sistema vzdolž dolžine traku. Tako je gibanje traku vzdolž dolžine traku v lastnem koordinatnem sistemu traku definirano kot gibanje vzdolž osi x lastnega koordinatnega sistema. Po definiciji pomeni vzdolžno gibanje naprej gibanje v pozitivni smeri, medtem ko gibanje nazaj pomeni gibanje v negativno smer vzdolž osi gibanja.

Slika 1 prikazuje trak PVC na NPAP in zaznavanje traku na NPAP.



a.



b.

Sl. 1. a) Trak na NPAP in b) zaznavanje traku na NPAP  
Fig. 1. a) The band on the PASD and b) position detection of the band

En korak gibanja vzdolž dolžine traku je sestavljen iz zaporedja petih podkorakov. V nadaljevanju je en korak gibanja vzdolž dolžine traku predstavljen za primer, ko je usmerjenost lastnega koordinatnega sistema traku enaka usmeritvi referenčnega koordinatnega sistema.

Zaporedje podkorakov za gibanje naprej vzdolž dolžine traku je:

- **Podkorak 1:** Najprej sesajo vse cevke in s tem ustvarjajo negativni tlak.

V podkoraku 1 trak leži tesno pritisnjen na površino NPAP (slika 2). Črtkane črtice na sliki 3 označujejo smer sile, ki deluje na trak, zaradi sesanja NPAP. Zaradi sesanja vsake cevke se pojavi krajevna sila na trak. Celotna sila na trak je enaka vsoti vseh krajevnih sil, ki so

band. On the other hand, due to the narrow width the flexibility of the band along the width of the band is very low. Therefore, the caterpillar motion control strategy cannot be directly applied for translational motion along the width of the band and the direct application of a caterpillar strategy leads to only a one DoF translational motion on the PASD. The missing DoF of the translational motion is implemented by a more complex application of the caterpillar control strategy, which is described in section 1.1.3.

A reference coordinate system is attached to the left-hand bottom corner of the PASD so that the x-y plane of the reference coordinate system lies on the surface of the PASD and the x-axis of the reference coordinate system is directed along the rows of tubes of the PASD. An eigen-coordinate system is attached to the left-hand bottom corner of the band so that the x-axis of the eigen coordinate system is directed along the length of the band. So translational motion along the length of the band is in the eigen-coordinate system of the band defined as translational motion along the x-axis of the eigen-coordinate system. By definition, translational motion forward means motion in the positive direction while translational motion backward means motion in the negative direction of the motion axis.

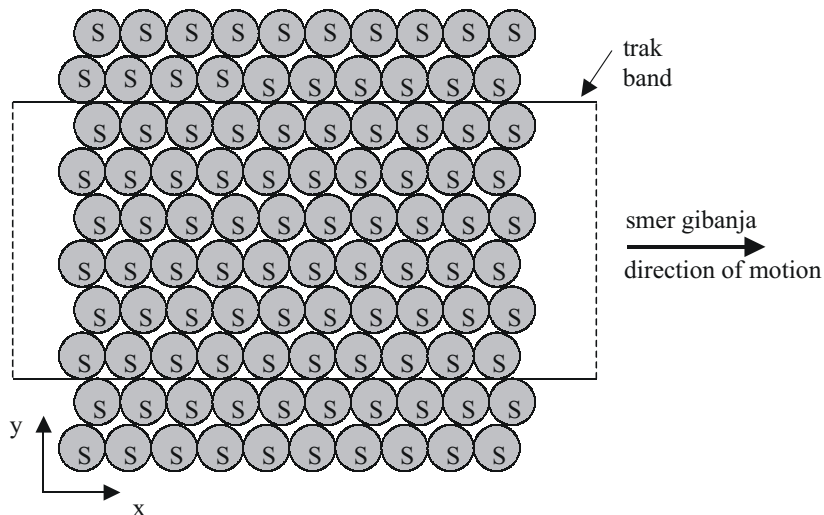
Fig. 1 shows the PVC band on the PASD, and its position detection.

One step of translational motion forward along the length of the band consists of a sequence of five substeps. In the following, one step of translational motion forward along the length of the band, for the case when the orientation of the band eigen-coordinate system is the same as the orientation of the reference coordinate system is presented.

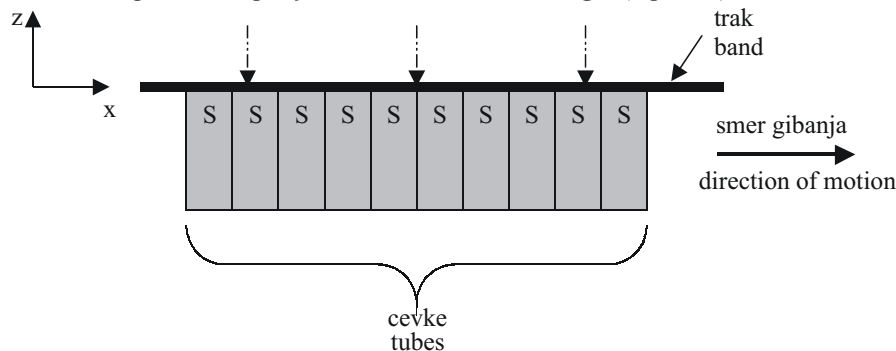
A sequence of substeps for translational motion forward along the length of the band is:

- **Substep 1:** Initially all the tubes are sucking, thereby producing a negative pressure.

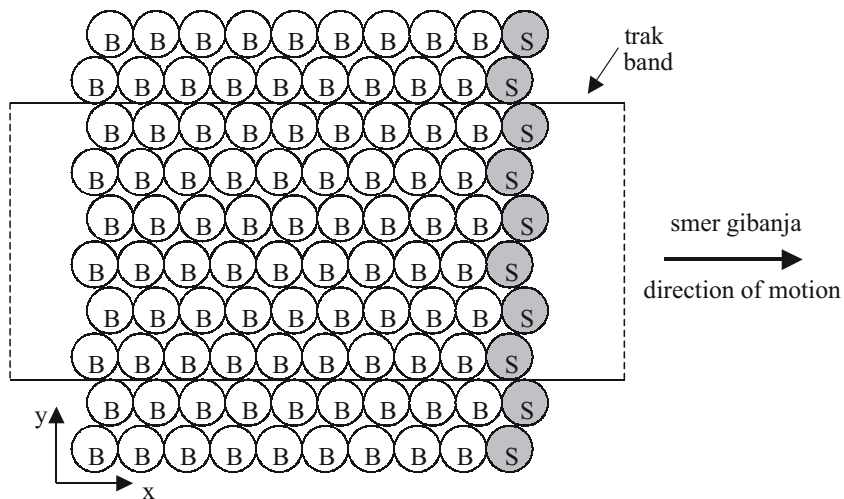
The band lies tightly pressed against the surface of the PASD in substep 1 (Fig. 2). Dashed arrows represent the direction of the force acting on the band due to the sucking action of the PASD in Figure 3. A local force on the band appears due to the sucking action of each tube. The total force acting on the band is a result of all



Sl. 2. Podkorak 1 za vzdolžno gibanje desno (pogled od zgoraj)  
 Fig. 2. Substep 1 for translational motion right (top view)



Sl. 3. Trak leži tesno pritisnjen na NPAP  
 Fig. 3. The band lies tightly pressed to the PASD



Sl. 4. Podkorak 2 za vzdolžno gibanje desno (pogled od zgoraj)  
 Fig. 4. Substep 2 for translational motion right (top view)

enakomerno porazdeljene po površini traku (polje sil).

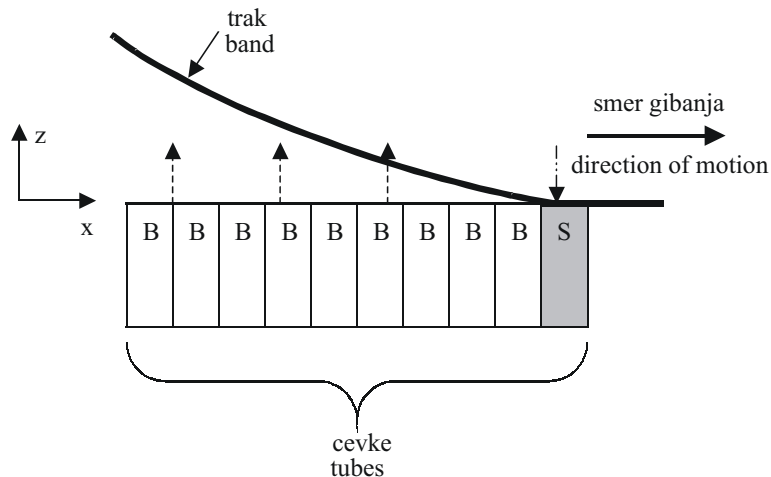
- **Podkorak 2:** Trak je prisen na NPAP samo na njenem desnem robu, medtem ko je prost drugod. Cevke na desnem navpičnem robu sesajo, medtem ko vse preostale cevke pihajo (slika 4).

V podkoraku 2 se leva stran traku odmakne od NPAP in se upogne navzgor (slika 5), zaradi

the local forces, which are equally distributed over the surface of the band (force field).

- **Substep 2:** the band is held on the PASD only by the right-hand edge, while it is released elsewhere. The tubes on the right vertical edge suck while all the other tubes blow (Fig. 4).

The left-hand side of the band is bent upwards from the PASD (Fig. 5) in substep 2 due to the blowing



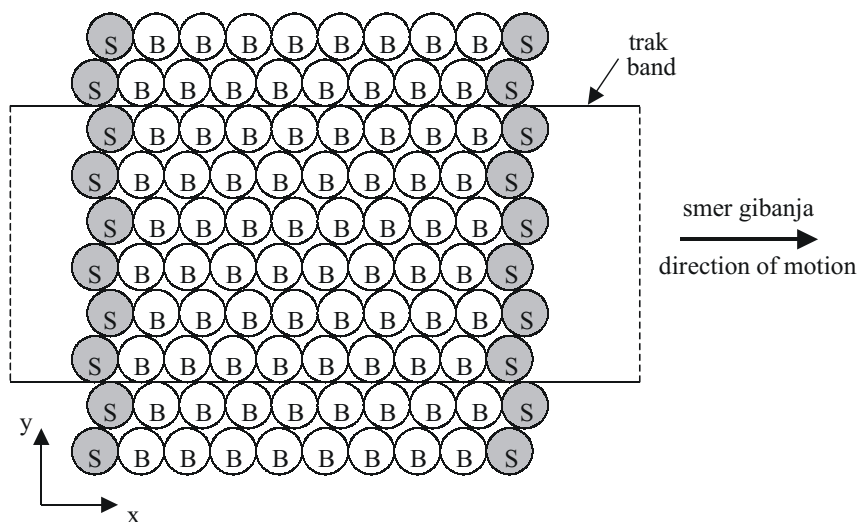
Sl. 5. Trak se na levi strani upogne navzgor  
 Fig. 5. The band is bent upwards on the left-hand side of the PASD

pihanja cevk na levi strani in v sredini NPAP. Črtkane črtice na sliki 5 označujejo zračni tok, ki teče iz cevk. Zračni tok povzroči sile na površino traku, ki odmakne trak od površine NPAP in ga upogne.

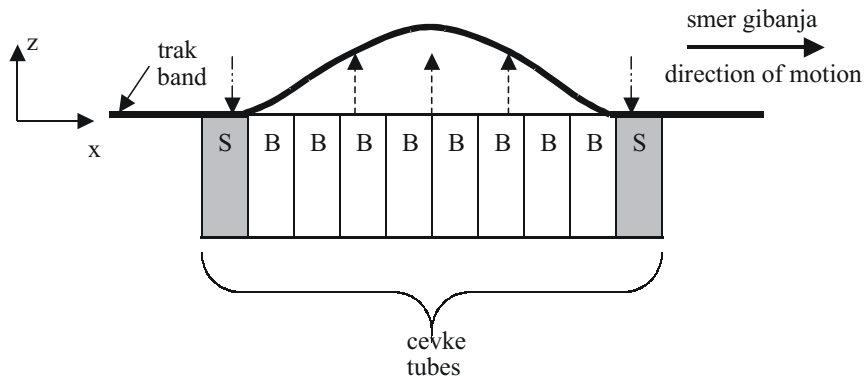
- **Podkorak 3:** Trak je pritisnjen na NPAP na njegovi levi in desni strani in ima obliko hribčka (slika 7) zaradi

action of the tubes on the left-hand side and in the middle of the PASD. The dashed arrows in Figure 5 represent the airflow from the tubes. The air flow produce forces on the surface of the band that lift the band from the surface of the PASD and twist it.

- **Substep 3:** The band is pressed to the PASD on its left-hand and right-hand sides and has the form of a



Sl. 6. Podkorak 3 za vzdolžno gibanje desno (pogled od zgoraj)  
 Fig. 6. Substep 3 for translational motion right (top view)



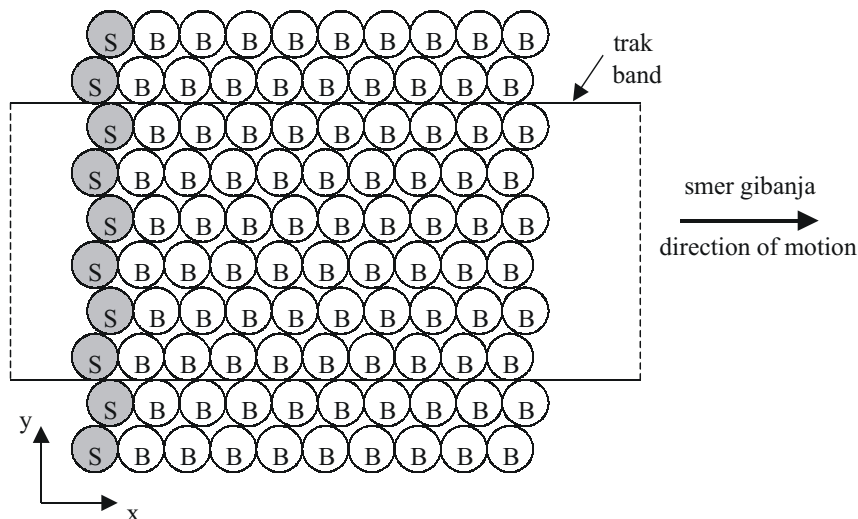
Sl.7. Trak ima obliko hribčka (stranski pogled)  
 Fig. 7. Band has the form of a hill (side view)

sesanja cevk na levi in desni strani NPAP in učinka pihanja v sredini (slika 6).

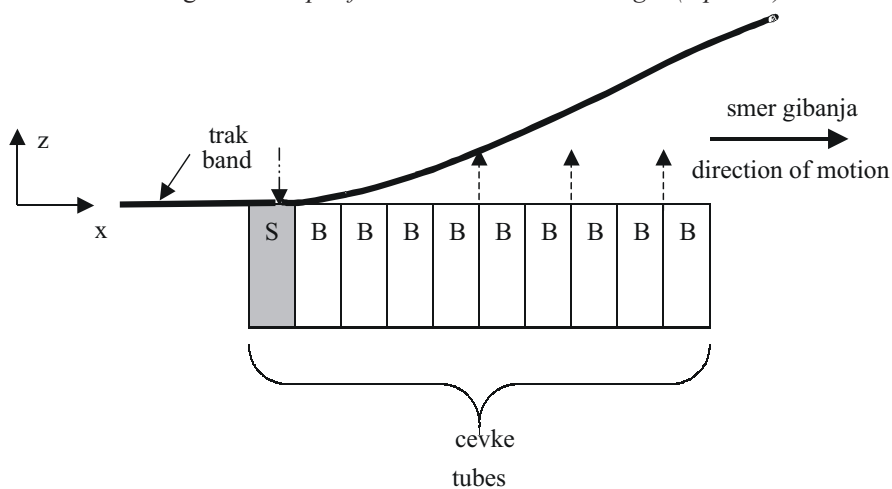
- **Podkorak 4:** Trak je pritisnjen na NPAP na levi strani NPAP in je prost drugod. Cevke na levem robu še sesajo, medtem ko cevke na desni strani NPAP pihajo.

hill (Fig. 7) due to the sucking action on both left-hand and right-hand sides of the PASD and the blowing action in the middle (Fig. 6).

- **Substep 4:** The band is pressed to the PASD on the left-hand edge of the PASD and released elsewhere. The left-hand edge of the PASD remains in suction action, while the tubes on the right-hand edge of the PASD blow.



Sl. 8. Podkorak 4 za vzdolžno gibanje desno (pogled od zgoraj)  
Fig. 8. Substep 4 for translational motion right (top view)



Sl. 9. Desni rob traku je prost  
Fig. 9. Right-hand edge of the band is free

- **Podkorak 5:** Trak se prične premikati na desno, ker se število stolpcev cevk NPAP, ki sesajo na levem vogalu v tem zadnjem koraku, poveča (slika 10).

Trak se prične premikati na desno (slika 11).

Med zaporednim izvajanjem korakov za vzdolžno gibanje podkoraku 5 sledi podkorak 1 iz naslednjega koraka. Če pa se bo gibanje ustavilo, tedaj se za podkorakom 5 izvede samo še podkorak 1, zato da se gibanje konča s trakom, tesno pritisnjenim na NPAP.

Gibanje traku za en korak je predstavljeno na sliki 12.

Dolžina traku v obliki hriba je večja od dolžine ravnega traku (sl.12). Trak naredi med gibanjem hribček in se premakne za razliko dolžin:

- **Substep 5:** The band is forced to move to the right because the number of columns of the PASD in suction action on its left-hand edge is increased in this last substep (Fig. 10).

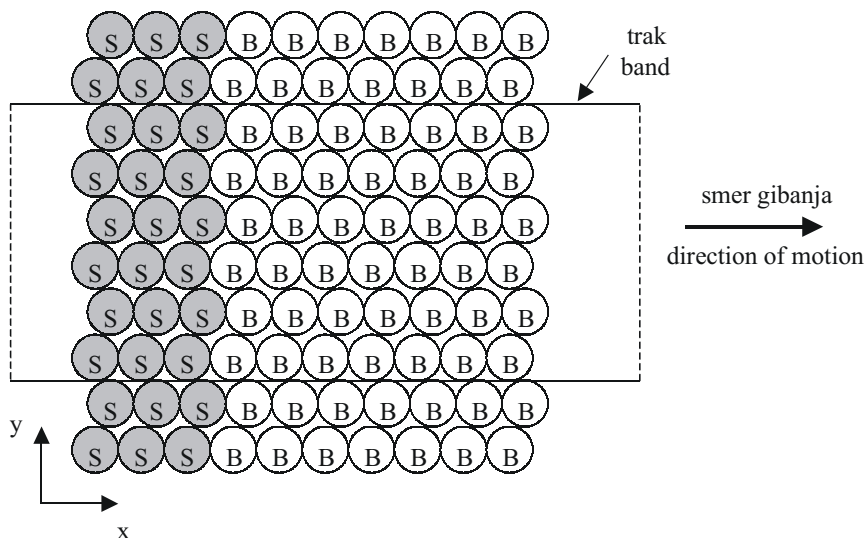
The band starts to move to the right (Fig. 11).

During the sequential execution of steps for translational motion substep 5 is followed by substep 1 of the following step. When the motion is going to stop after substep 5 only substep 1 is executed in order to finish with the band tightly pressed to the PASD.

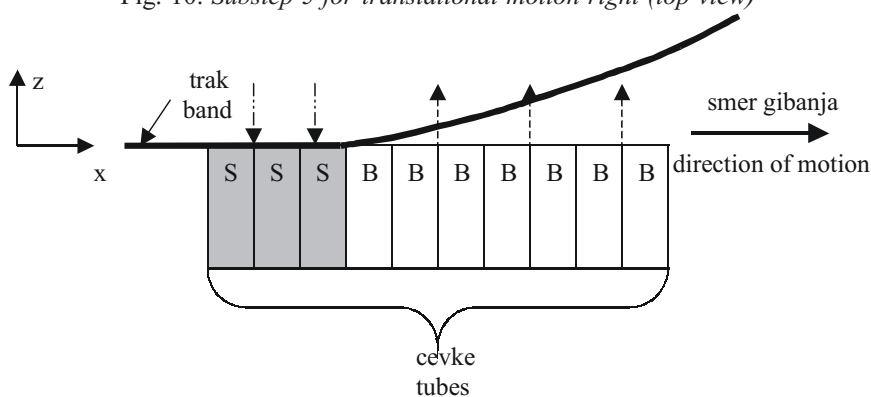
The translation of the band for one step is represented in Figure 12.

The length of the band in the form of a hill is greater than the length of the flat band (Fig. 12). The band makes a hill during the motion. The band has moved the difference of lengths:

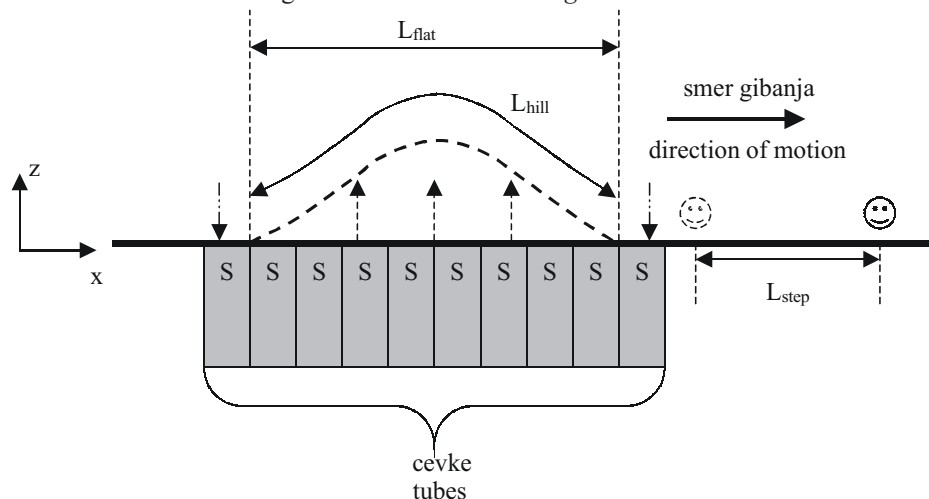




Sl. 10. Podkorak 5 za vzdolžno gibanje desno (pogled od zgoraj)  
 Fig. 10. Substep 5 for translational motion right (top view)



Sl. 11. Trak se premika na desno  
 Fig. 11. Band moves to the right



Sl. 12. Premik znaka »smejček« na traku za en korak  
 Fig. 12. Translation of a smile mark on the band for one step

$$L_{step} = L_{hill} - L_{flat} \quad (1),$$

ko se razširi prek matrike cevk in se spet zravna.  
 Dolžina enega vzdolžnega koraka traku je odvisna od sile pihanja, gibljivosti traku in dolžine  $L_{flat}$ . Če trak ni dovolj gibčen, ne bo

when the band spreads over the array of tubes again and becomes flat.  
 The length of one translational step of the band depends on the force of the blow pressure, the flexibility of

oblikoval hribčka. Namesto tega se bo trak zravnal prilepil nazaj na površino NPAP (kot togo telo). Najmanjši korak premikanja je določen z razmerjem med gibljivostjo traku in dolžino  $L_{\text{flat}}$  pri danem tlaku. Sila zaradi pihanja vpliva na dolžino vzdolžnega premika prek povečanja oziroma zmanjšanja višine hribčka, ki se ustvari v tretjem podkoraku vzdolžnega gibanja. Višji kot je pritisk pihanja, daljši bo  $L_{\text{hill}}$  in zaradi tega bo daljši tudi korak  $L_{\text{step}}$ . Seveda je zgornja vrednost tlaka pihanja omejena z vrednostjo, pri kateri trak odpihne s površine.

Vzdolžno gibanje nazaj ustvarimo z medsebojno zamenjavo podkorakov 2 in 4 ter ustrezno spremembo podkoraka 5.

Vzozčno gibanje traku lahko ustvarimo tudi za poljubno usmeritev traku na NPAP, ki ni enaka usmeritvi referenčnega koordinatnega sistema. V tem primeru je potrebno dejanska področja cevki sesanja in pihanja za en korak gibanja usmeriti v skladu z dejansko usmeritvijo traku na NPAP. Takšno gibanje smo izvedli in testirali za delitev kota usmeritve  $20^\circ$  do  $25^\circ$ , ki je določen z dejansko konstrukcijo (število cevki) NPAP in se lahko izboljša s povečanjem števila cevki na NPAP.

### 1.1.2 Vrtilno gibanje

Vrtilno gibanje traku na NPAP se pojavi le v kombinaciji z vzdolžnim gibanjem. Trak se vrtilno in premika hkrati. Vrtilno gibanje traku lahko izvedemo ob hkratnem vzdolžnem gibanju naprej ali nazaj.

Referenčni koordinatni sistem je pritrjen na NPAP, lastni koordinatni sistem pa je pritrjen na trak, kakor je opisano v razdelku 1.1.1. Za potrebe definiranja vrtilnega gibanja traku definiramo še en dodaten koordinatni sistem. Os z dodatnega koordinatnega sistema je usmerjena enako kakor os z referenčnega koordinatnega sistema. Izhodišče dodatnega koordinatnega sistema je v sečišču roba traku na zgornji strani traku in navpične vrste cevki, ki sesajo (sl. 16). Po definiciji je vrtilno gibanje desno vrtenje traku okoli osi z dodatnega koordinatnega sistema v smeri urnega kazalca, medtem ko je vrtilno gibanje levo vrtenje traku okoli osi z dodatnega koordinatnega sistema v nasprotni smeri urnega kazalca. Najprej je podrobno opisano vrtilno gibanje desno z gibanjem nazaj. Nato so kratko opisani vrtilno gibanje levo z gibanjem nazaj, vrtilno gibanje levo in desno z gibanjem naprej in vrtilno gibanje levo in desno z drugačno lego osi vrtenja.

the band and the length  $L_{\text{flat}}$ . If the band is not flexible enough it will not form the hill. The band will stick to the array in the flat form (like a rigid body) instead. The minimum translational step is determined by the ratio between the flexibility of the band and length  $L_{\text{flat}}$  at a given blow pressure. The force of the blow pressure influences the length of the translational step by increasing or decreasing the height of the hill created in the third substep of the translational motion. The higher the blow pressure the longer  $L_{\text{hill}}$  will be, and consequently, the longer  $L_{\text{step}}$  will be. Of course there are limits to how much the blow pressure can be increased without blowing the band off the array.

Translational motion backward is generated by the exchange of substeps 2 and 4 and a suitable modification to substep 5.

The translational motion of the band for the orientation of the band that is not equal to the orientation of the reference coordinate system is implemented so that the actual sucking and blowing zones of one step are oriented in accordance with the actual orientation of the band on the PASD. Such motion was implemented and tested for directions separated in a  $20^\circ$  to  $25^\circ$  raster. This direction raster is given by the actual construction (number of tubes) of the PASD and could be improved by an increased number of the tubes on the PASD.

### 1.1.2 Rotational Motion

Rotational motion of the band on the PASD appears only in combination with translational motion; the band rotates and translates at the same time. During rotational motion the translational motion forward or backward could be implemented.

A reference coordinate system is attached to the PASD and the eigen coordinate system is attached to the band as described in section 1.1.1. In order to define rotational motion of the band an additional coordinate system is defined. The z-axis of the additional coordinate system is oriented in the same way as the z-axis of the reference coordinate system. The origin of the additional coordinate system is at the intersection of the band edge on the upper side of the band and the vertical sucking line (see Figure 16). By definition the rotational motion to the right is rotation of the band around the z-axis of the additional coordinate system in a clockwise direction, while rotational motion to the left is rotation of the band around the z-axis of the additional coordinate system in a counter-clockwise direction. First, rotational motion to the right with translation backwards is described in detail. Then, rotational motion to the left with translation backwards, rotational motion to the left and right with translational motion forwards and rotational motion to the left and right with different location of axis of rotation are briefly described.

1.1.2.1 Vrtilno gibanje desno s premikom nazaj

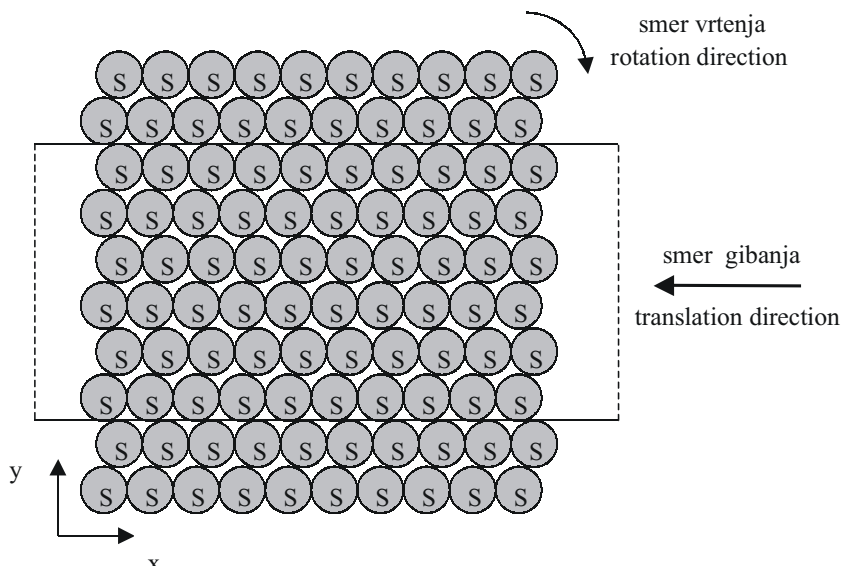
Predstavljeno je zaporedje podkorakov za vrtilno gibanje desno.

- **Podkorak 1:** Vse cevke sesajo in trak je pritisnjen na NPAP (slika 13).
- **Podkorak 2:** Trak je prisesan na NPAP v levem zgornjem vogalu in prost drugod. Cevke NPAP sesajo zrak v levem zgornjem kotu, medtem ko vse druge cevke pihajo zrak (sl. 14). Zato se trak dvigne na desni strani (sl. 15), vendar se trak ne dvigne na obeh straneh enako, ker ima levo področje cevk, ki sesajo, nagib proti vodoravnemu robu NPAP.
- **Podkorak 3:** Cevke na desni v navpični vrstici pričnejo sesati, tako da hkrati sesata dve področji

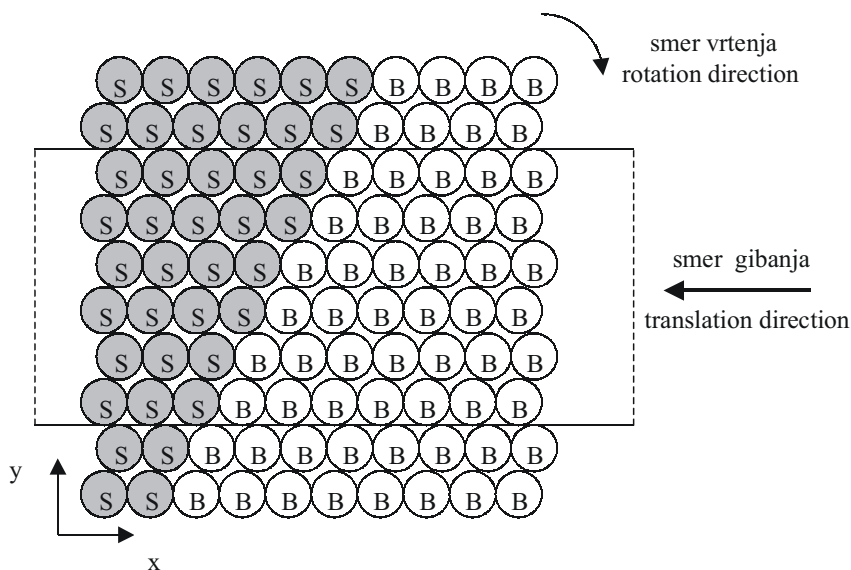
1.1.2.1. Rotational motion to the right with translation backwards

A sequence of substeps for one step of the rotational motion to the right is represented.

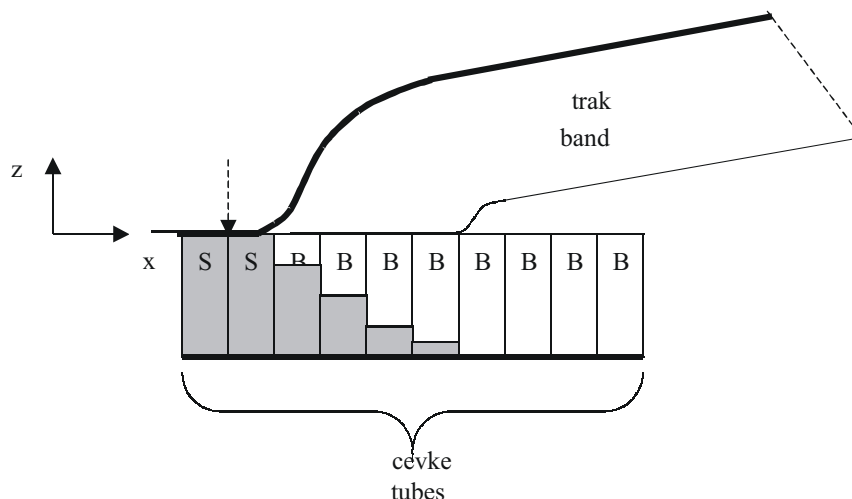
- **Substep 1:** Initially, all the tubes are sucking and the band is pressed to the PASD (Fig. 13).
- **Substep 2:** The band is pressed to the PASD at the left-hand upper corner and released elsewhere. The left-hand upper corner is in sucking action while the remainder of the PASD is in blowing action (Fig. 14). As a result, the band is lifted on the right-hand side (Fig. 15) but this lift is not equal on both sides of the band because the left sucking zone has an inclination towards the horizontal edge of the PASD.
- **Substep 3:** The right vertical sucking line appears, so there is a sucking zone on both sides of the array



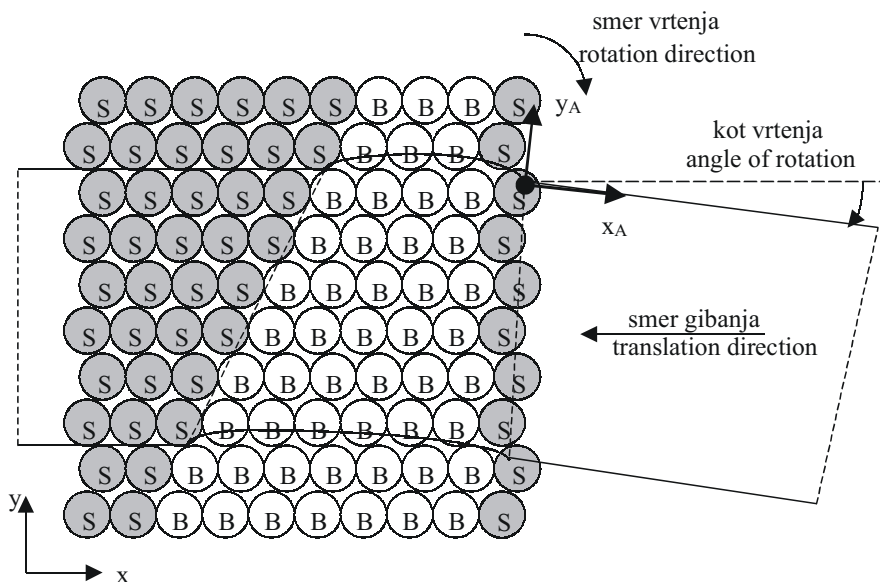
Sl. 13. Podkorak 1 za vrtilno gibanje (pogled od zgoraj)  
Fig. 13. Substep 1 for rotational motion (top view)



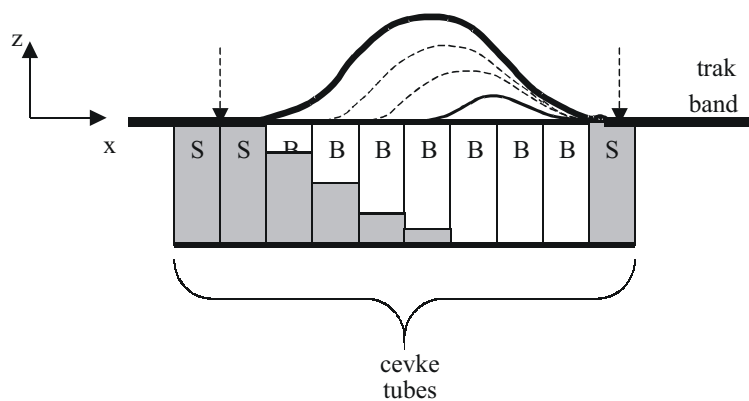
Sl. 14. Podkorak 2 vrtilnega gibanja desno  
Fig. 14. Substep 2 of rotational motion to the right



Sl. 15. Trak je dvignjen na desni strani  
 Fig. 15. The band is lifted on the right-hand side



Sl. 16. Podkorak 3 za vrtilno gibanje desno z gibanjem nazaj  
 Fig. 16. Substep 3 for rotational motion to the right with translation backward



Sl. 17. Hribček traku v podkoraku 3  
 Fig. 17. A hill of the band is created in substep 3

cevk - na vsaki strani matrice eno področje cevk (slika 16) in trak se zvije v obliko hribčka (slika 17). Dolžina hribčka ni enaka na obeh straneh traku. Razlika med dolžino hribčka na obeh straneh povzroča vrtenje traku. Os vrtenja je definirana glede na koordinatno izhodišče dodatnega koordinatnega sistema.

- **Podkorak 4:** Sesa samo področje cevk na desni – desni navpični rob (slika 18), medtem ko je trak na levi strani prost in vse področje cevk na levi piha (slika 19).

- **Podkorak 5:** Področje sesanja na desni strani NPAP se razširi (sl. 20), zato se trak prične premikati nazaj (slika 21).

Podkoraku 5 sledi podkorak 1 naslednjega koraka (slika 22).

(Fig. 16) and the band makes a hill (Fig. 17). The length of the hill is not equal on both sides of the band. The difference between the length of the hill on both sides of the band creates a rotation of the band. The axis of rotation is defined with respect to the origin of the additional coordinate system.

- **Substep 4:** Only the right-hand sucking zone (edge) remains in a sucking action (Fig. 18) and the left-hand side of the band is released due to the blowing action of all the other tubes (Fig. 19).

- **Substep 5:** More sucking action is applied to the right-hand side of the PASD (Fig. 20) and the band is forced to move backwards (Fig. 21).

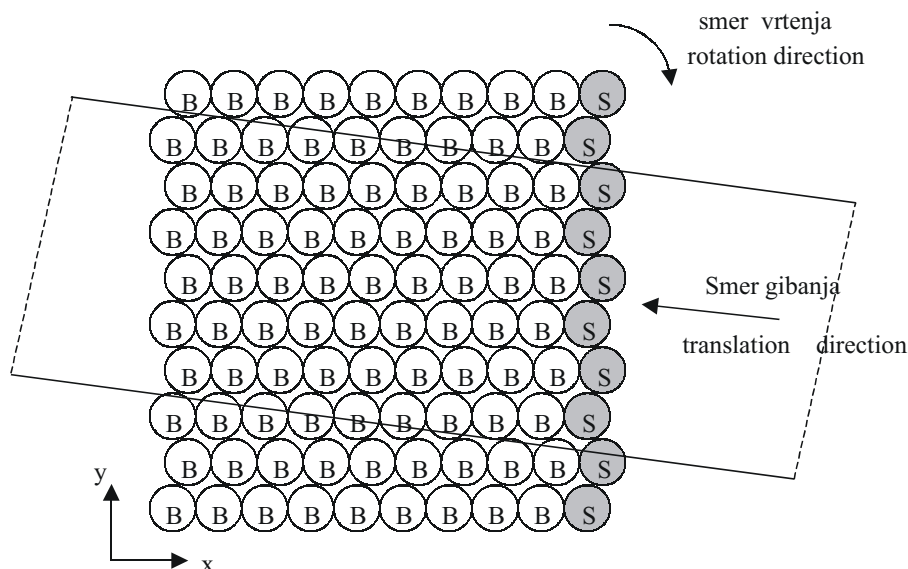
Substep 5 is followed by substep 1 of the next step (Fig. 22).

1.1.2.2 Vrtilno gibanje levo s premikom nazaj

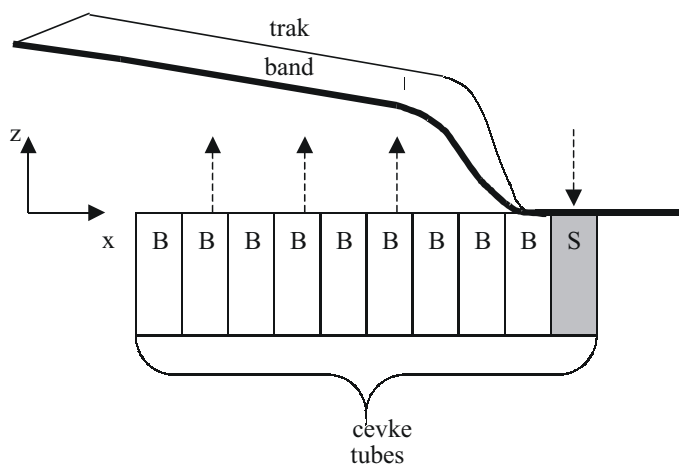
Vrtilno gibanje levo s premikom nazaj se razlikuje od vrtilnega gibanja desno s premikom

1.1.2.2 Rotational motion to the left with translation backwards

Rotational motion to the left with translation backwards is different from the rotational motion to

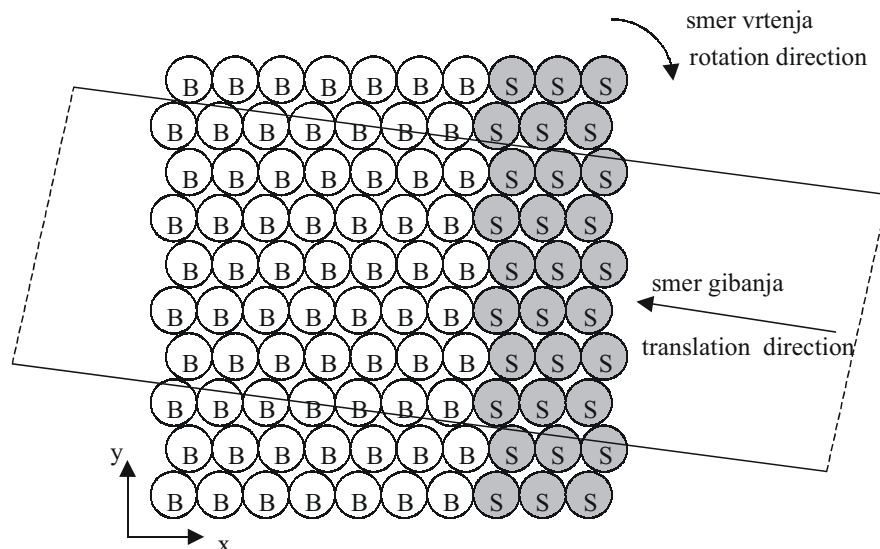


Sl. 18. Podkorak 4 za vrtilno gibanje desno  
Fig. 18. Substep 4 for rotational motion to the right

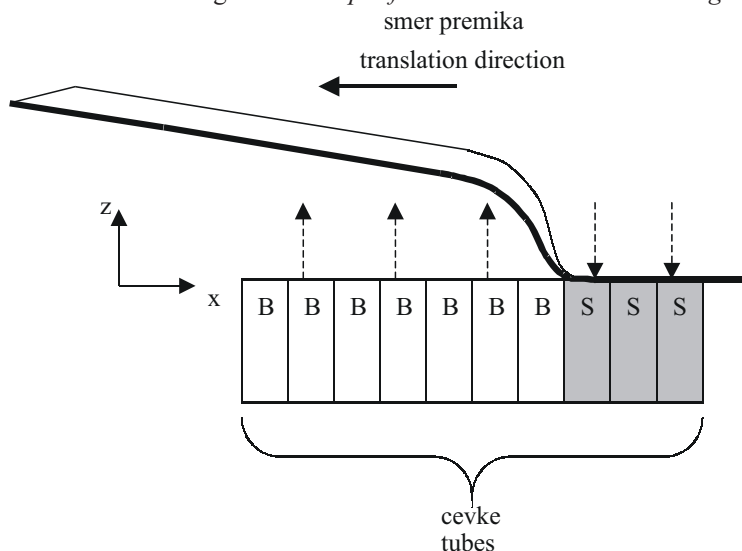


Sl. 19. Trak je dvignjen na levi strani NPAP  
Fig. 19. The band is lifted on the left-hand side of the PASD

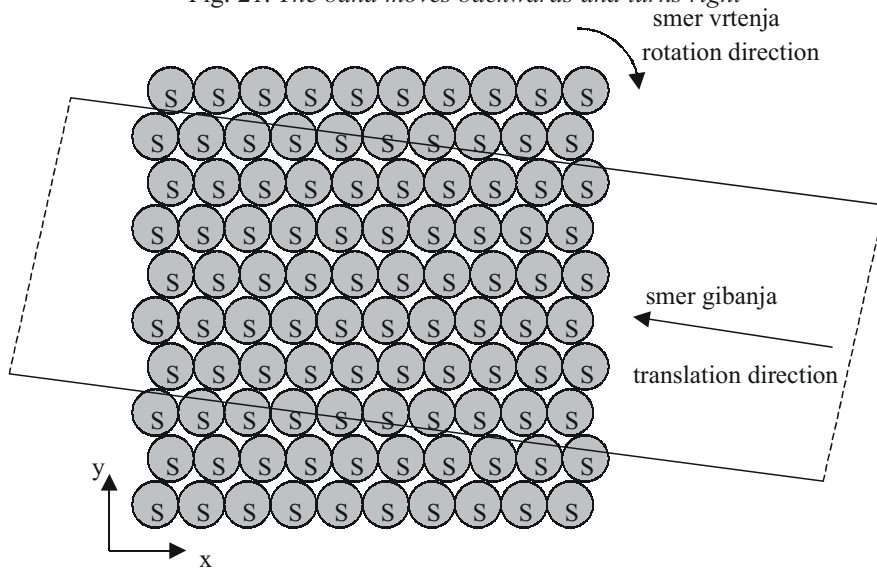




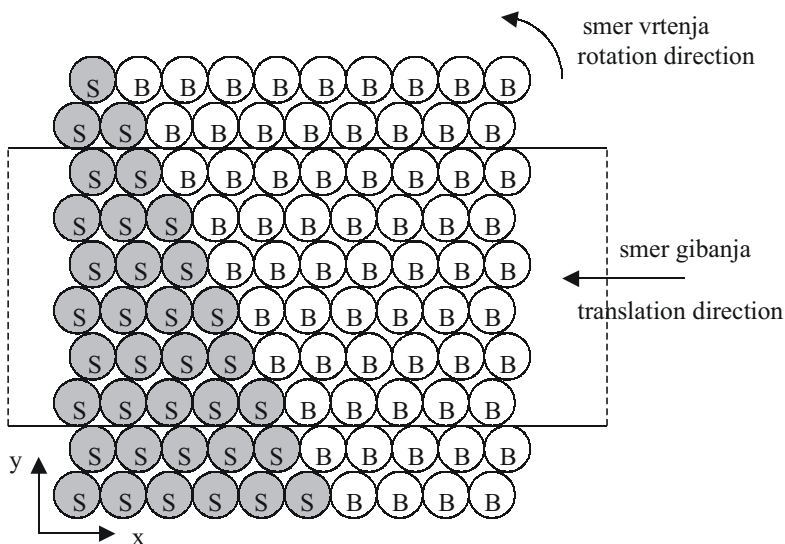
Sl. 20. Podkorak 5 za vrtilno gibanje desno  
 Fig. 20. Substep 5 for rotational motion to the right



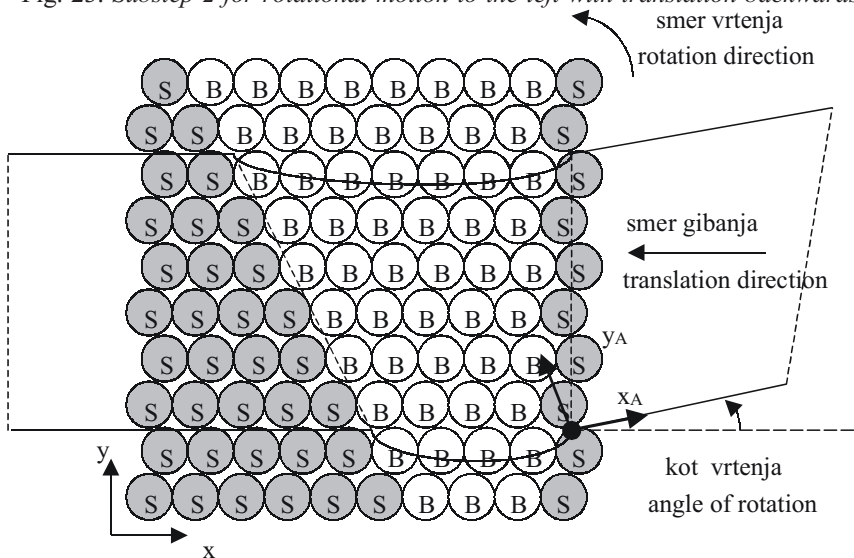
Sl. 21. Trak se premika nazaj in suče desno  
 Fig. 21. The band moves backwards and turns right



Sl. 22. Podkorak 1 naslednjega koraka vrtenja traku  
 Fig. 22. Substep 1 in the following step of rotation



Sl. 23. Podkorak 2 za vrtilno gibanje levo s premikom nazaj  
 Fig. 23. Substep 2 for rotational motion to the left with translation backwards



Sl. 24. Podkorak 3 za vrtilno gibanje levo s premikom nazaj  
 Fig. 24. Substep 3 for rotational motion to the left with translation backwards

nazaj samo po obliki levega področja sesanja cevk, ki se pojavi v podkorakih 2 in 3, znotraj zaporedja podkorakov. Podkorak 2 za vrtilno gibanje levo s premikom nazaj je prikazan na sliki 23.

the right with translation backward only in the inclination of the left-hand sucking zone, which appears in substeps 2 and 3 of the sequence for one step. Substeps 2 and 3 for rotational motion to the left with translation backwards are represented in Figures 23 and 24.

### 1.1.2.3 Vrtilno gibanje levo in desno s premikom naprej

Vrtilno gibanje levo oziroma desno s premikom naprej lahko obravnavamo kot modificirano vrtilno gibanje levo oziroma desno s premikom nazaj. Glavna razlika med obema postopkoma je v zaporedju, v katerem izvajamo levo področje sesanja in desno navpično področje sesanja. V nadaljevanju je prikazano le zaporedje podkorakov za vrtilno gibanje desno s premikom naprej. Zaporedje podkorakov za vrtenje levo s premikom naprej je zgrajeno podobno kakor vrtenje desno s premikom naprej (glej razdelek 1.1.2.2).

### 1.1.2.3. Rotational motion to the left and to the right with translation forwards

Rotational motion to the left/right with translation forwards could be considered as a modification of rotational motion to the left/right with translation backwards. The main difference between the two approaches is in the sequence in which the left-hand inclined sucking zone and the right-hand vertical sucking zone are applied. Only the sequence of substeps for rotation to the left with translational motion forwards is discussed in the following. The sequence of substeps for rotation to the left with translational motion forwards is built similar to the rotation to the right (see section 1.1.2.2).

Zaporedje podkorakov za vrtenje desno s premikom naprej je:

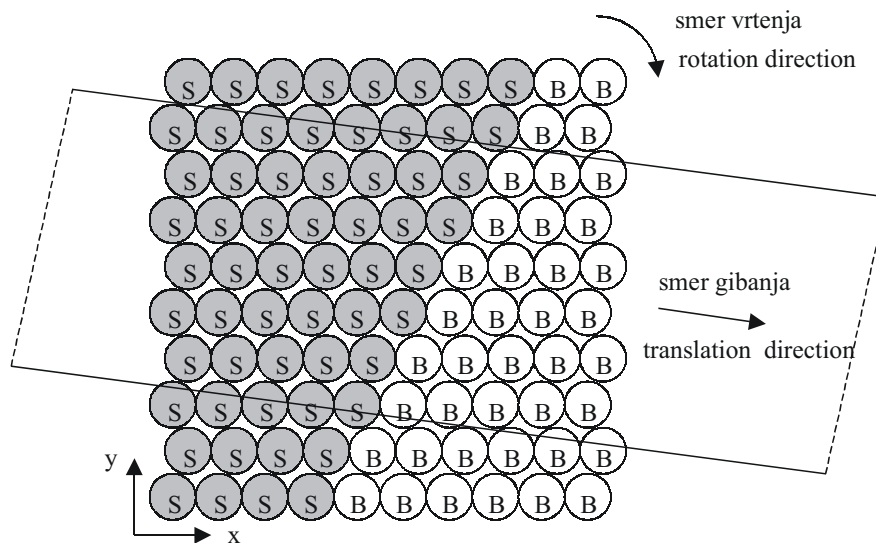
- podkorak 1 je enak podkoraku 1 za vrtenje desno s premikom nazaj (sl. 13),
- podkorak 2 je enak podkoraku 4 za vrtenje desno s premikom nazaj (sl. 18, 19),
- podkorak 3 je enak podkoraku 3 za vrtenje desno s premikom nazaj (sl. 16, 17),
- podkorak 4 je enak podkoraku 2 za vrtenje desno s premikom nazaj (sl. 14 in 15),
- podkorak 5: levo področje sesanja se razširi za dve dodatni vrstici (sl. 25, 26)

Dve dodatni vrstici sesanja na levi sprožita premikanje traku na desno.

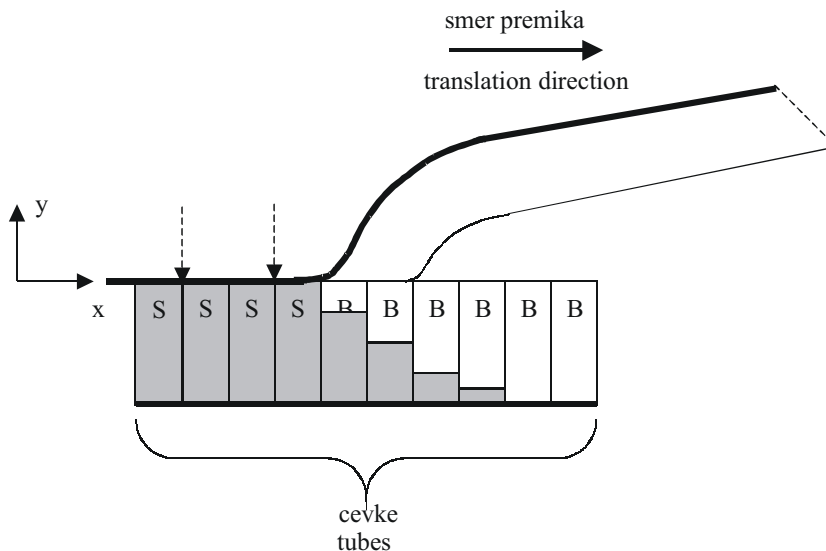
The sequence of substeps for rotation to the right with translational motion forwards are:

- substep 1 is equal to the substep 1 for rotation to the right with translational motion backwards (Fig. 13),
- substep 2 is equal to the substep 4 for rotation to the right with translational motion backwards (Figs. 18, 19),
- substep 3 is equal to the substep 3 for rotation to the right with translational motion backwards (Figs. 16, 17),
- substep 4 is equal to the substep 2 for rotation to the right with translational motion backwards (Figs. 14, 15),
- substep 5: two additional sucking lines are added to the inclined sucking zone (see Figures 25, 26).

Two additional sucking lines on the left force the band to move to the right.



Sl. 25. Podkorak 5 za vrtenje desno s premikom naprej  
 Fig. 25. Substep 5 for rotation to the right with translational motion forwards



Sl. 26. Trak se vrti desno in premika naprej  
 Fig. 26. The band rotates and translates forwards

1.1.2.4 Vrtilno gibanje desno in levo z drugačnimi legami vrtilne osi

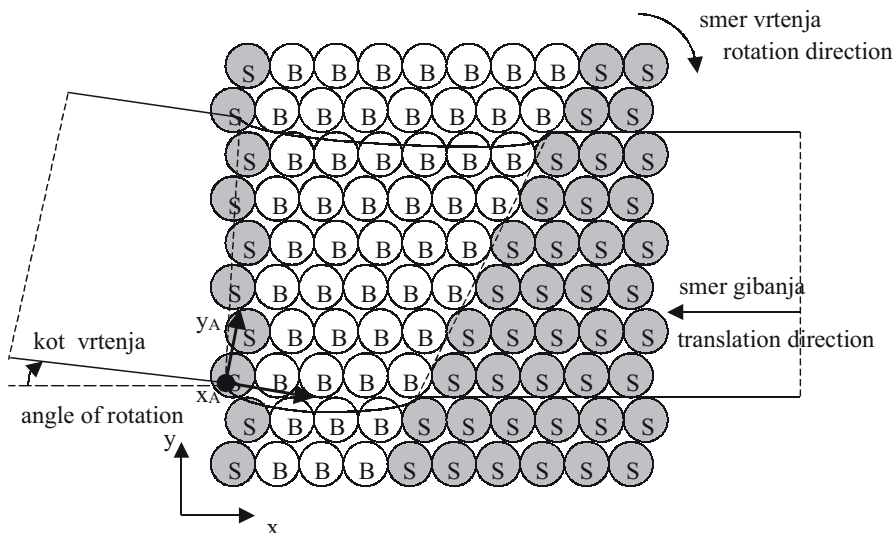
Vrtilna gibanja, opisana v prejšnjih razdelkih lahko izvedemo tudi z drugačno lego vrtilne osi. Dejanska lega vrtilne osi je podana z dodatnim koordinatnim sistemom. Sprememba lege vrtilne osi je posledica vrtenja karakterističnega vzorca pihanja in sesanja cevk na NPAP. Vrtenje karakterističnega vzorca pihanja in sesanja za 180° določa novo dodatno lego vrtilne osi za vrtilno gibanje desno s premikom nazaj (podkorak 3). Dodatna lega vrtilne osi za vrtilno gibanje desno s premikom nazaj je predstavljena na sliki 27.

Z vrtenjem karakterističnega vzorca pihanja in sesanja za 180° dobimo dodatno lego vrtilne osi za vrtilno gibanje levo s premikom nazaj (podkorak 3). Dodatna lega vrtilne osi za vrtilno gibanje levo s premikom nazaj je predstavljena na sliki 28.

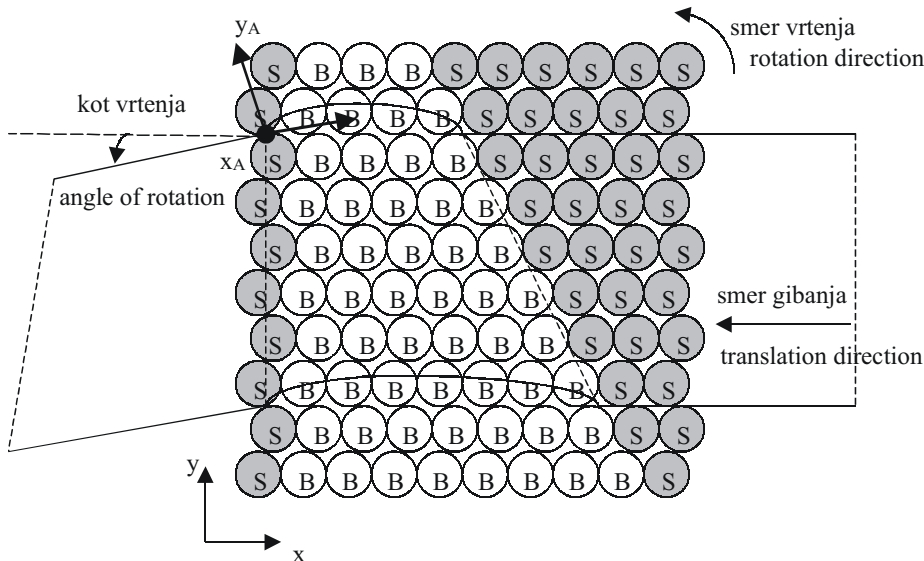
1.1.2.4 Rotational motion to the right and to the left with other locations of the rotation axis

The rotational motions described in the previous sections could also be implemented with other locations of the rotation axis. The actual location of the rotation axis is given by the additional coordinate system. A change in the location of the rotation axis is a result of a rotation of a characteristic pattern of blowing and sucking action on the PASD. A rotation of the characteristic pattern of blowing and sucking action for 180° gives a new location of the rotation axis for rotational motion to the right with translation backwards (substep 3) represented in Figure 27.

With a rotation of a characteristic pattern of blowing and sucking action for 180° another location of the rotation axis for rotational motion to the left with translation backwards (substep 3) is obtained. It is represented in Figure 28.



Sl. 27. Dodatna lega vrtilne osi za vrtenje desno s premikom nazaj  
 Fig. 27. Another location of rotation axis for rotation to the right with translation backwards



Sl. 28. Dodatna lega vrtilne osi za vrtenje levo s premikom nazaj  
 Fig. 28. Another location of the rotation axis for rotation to the left with translation backwards

1.1.3 Premikanje na temelju vrtilnega gibanja

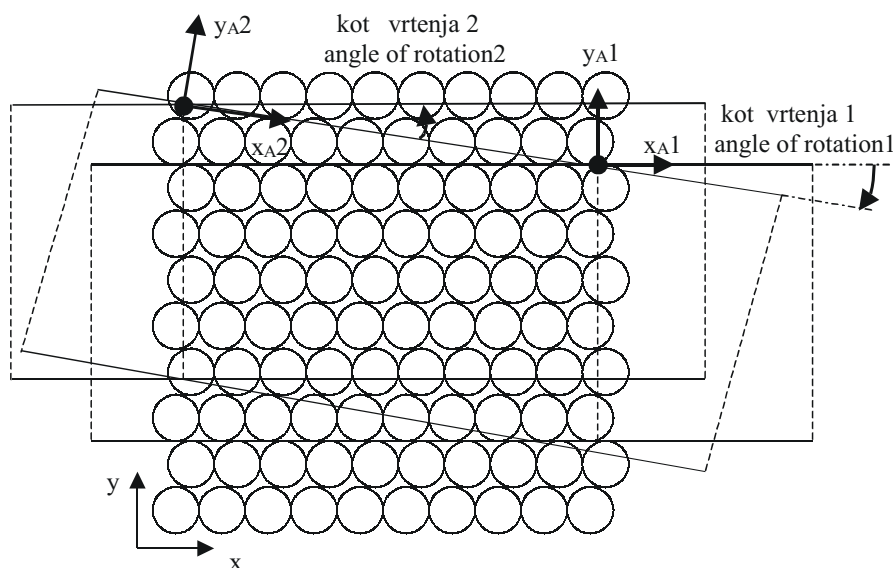
Poleg gibanja traku vzdolž dolžine traku je mogoče gibanje traku izvesti tudi s pomočjo dveh zaporednih vrtenj okoli različnih osi vrtenja. Gibanje vzdolž osi y referenčnega koordinatnega sistema se pojavi (sl. 29), če vrtilnemu gibanju desno s premikom nazaj in vrtilščem na desni strani NPAP (sl. 16) sledi vrtilno gibanje levo s premikom nazaj in vrtilščem na levi strani NPAP (sl. 28).

Vzdolžno gibanje na temelju vrtenj je gibanje pravokotno na gibanje vzdolž dolžine traku, je pravzaprav gibanje vzdolž širine traku. Zato lahko trak premikamo vzdolžno z dvema prostostnima stopnjama v ravnini. V primeru vzdolžnega gibanja na temelju vrtenj se trak giblje vzdolž dolžine in širine traku hkrati.

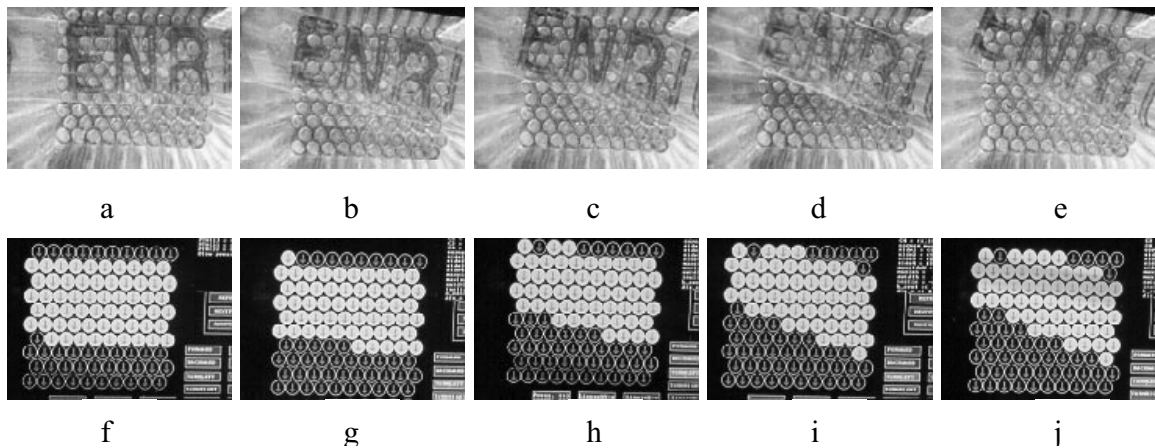
1.1.3 Translational Motion Based on Rotational Motion

Besides the translational motion along the length of the band the translational motion of the band is achieved by a subsequent implementation of two rotational motions around a different axis of rotation. Translational motion along the y-axis of the reference coordinate system appears (see Figure 29) if rotational motion to the right with translation backwards and rotation axis on the right-hand side of PASD (Figure 16) is followed by rotational motion to the left with translation backwards and the rotation axis on the left-hand side of the PASD (Figure 28).

Translational motion based on rotational motion is a motion perpendicular to the translational motion along the length of the band, i.e. translational motion along the width of the band. Therefore, the band could move translationally with two degrees of freedom in the plane. The band moves along the length and the width of the band at the same time during translational motion based on rotational motion.



Sl. 29. Premik traku na temelju vrtenj  
Fig. 29. Translation of the band based on rotations



Sl. 30. Vrtenje traku desno med izvajanjem na NPAP in zaznavanje traku  
Fig. 30. Actual rotation of the band to the right performed on the PASD with the band's detection



### 1.1.4 Eksperimentalni rezultati in povzetek

Zgornja vrsta slik na sliki 30 prikazuje izvedbo mnogih korakov vrtenja traku desno na NPAP. Spodnja vrsta slik na sliki 30 pa prikazuje zaznavanje traku na NPAP v istih časovnih trenutkih, kakor so prikazani v zgornji vrsti slik.

Preskusi krmiljenja gibanja brez povratne zveze na NPAP so pokazali, da se med gibanjem objekta pogosto pojavijo motnje. Te motnje povzročijo neželena odstopanja gibanja traku.

Preskusi so pokazali, da je zelo verjetno, da se trak med vzdolžnim gibanjem tudi zasučje. Najbolj verjetna razlaga za to je, da dolžina koraka traku ni enaka na zgornjem in spodnjem robu traku. Podobno je zelo verjetno, da se bo trak premikal med vrtilnim gibanjem, ker je os vrtenja, zaradi motenj, malo prestavila svojo lego. Motnje so lahko tudi posledica sprememb v zračnem tlaku, ki povzročajo pihanje oziroma sesanje zraka, majhnih sprememb gibljivosti traku, ločljivosti NPAP itd. Zato so potrebne (na osnovi povratne zveze) tehnike krmiljenja s povratno zvezo za izvedbo želenega gibanja gibljivega objekta na NPAP.

## 1.2 Krmiljenje gibanja s povratno zvezo

Tehnike krmiljenja s povratno zvezo temeljijo na povratni vezavi in za njihovo izvedbo je potrebna povratna informacija o gibanju traku. Za opazovanje gibanja predmeta na NPAP so mogoči različni postopki. Ena od možnosti je uporaba sistema videnja na podlagi kamere, druga možnost pa je uporaba vgrajenih zaznaval tlaka za določanje predmeta na NPAP. Mi smo izbrali zaznavanje gibanja predmeta na NPAP na temelju vgrajenih zaznaval tlaka.

Trenutni pogoji, pri katerih izvajamo gibanje traku na NPAP, so takšni, da je dolžina traku, ki ga premikamo bistveno daljša od izmere NPAP v smeri  $x$  in  $y$ . Zato koncev traku ne moremo zaznati z uporabo vgrajenih zaznaval tlaka. Ker na trakovih ni posebnih oznak po dolžini traku, ne moremo zaznavati premikanja traku po dolžini in zato tudi nismo izvedli krmiljenja za gibanje po dolžini traku s povratno zvezo. Preskusi gibanja brez povratne zveze so pokazali, da se zaradi motenj med gibanjem vzdolž dolžine traku pojavi neželena vrtenje traku. Zato je zaželeno izvedba krmiljenja usmeritve traku s povratno zvezo v kombinaciji premikov vzdolž dolžine traku brez povratne zveze. Za izvedbo želenega krmiljanja je potrebna povratna informacija o usmeritvi traku, ki jo nato uporabimo za kompenzacijo neželene zavrtitve traku med gibanjem vzdolž dolžine traku. Rezultati so prikazani v naslednjih razdelkih.

Za izvedbo kompenzacije neželenih vrtenj med gibanjem vzdolž dolžine traku je potrebna izvedba

### 1.1.4 Experimental Results and Summary

In the upper row of Figure 30 several steps of actual band rotation to the right on the PASD are shown. In the lower row of Figure 30 the band detection for the same time instants as in the upper row of Figure 30 are shown.

Experiments on open-loop control of motion on the PASD have shown that disturbances frequently occur during the motion of an object. These disturbances cause undesired deviations of the path.

For instance, experiments have shown that the band is very likely to rotate during the translation motion. The most likely explanation for this is that the length of the step on the lower and the upper side of the band is not the same due to disturbances. Similarly, the band is very likely to translate during rotation because the rotation axis moved slightly due to disturbances. The disturbances are a result of variations in the sucking and blowing pressure, a slight variation in the flexibility of the band, the resolution of the PASD, etc. Therefore, closed-loop control techniques (feedback based) are needed to achieve the desired motion of the flexible object on the PASD.

## 1.2 Closed-Loop Control of Motion

Closed-loop control techniques are feedback based and in order to implement them feedback information about the motion of the band is required. Different approaches are possible for observing the object motion on the PASD. One possibility is to use a camera-based vision system. Another possibility is to use built-in pressure sensors [13] to detect the object on the PASD. We chose built-in pressure sensors to detect the motion of the object on the PASD.

The current conditions for the motion of a band on the PASD are such that the band in motion is much longer than the  $x$  and  $y$  dimensions of the PASD. Therefore the ends of the band could not be detected by the built-in pressure sensors. Only a part of the longer sides of the band that is on the PASD could be detected. Since no special marks along the length of the band are used, the motion of the band along its length could not be detected and therefore no closed-loop control was implemented for the motion of the band along the length of the band. But the open-loop control experiments have shown that due to disturbances during translational motion along the length of the band, undesired rotation of the band often takes place. Therefore, closed-loop control of the band orientation in combination with open-loop translation along the length of the band is desirable. So, feedback information relating to the band's orientation was used to compensate for the undesired rotation of the band during translational motion along the length of the band. The results are presented in the next subsections.

Detection of the band's orientation on the PASD is needed for the implementation of the com-

zaznavanja usmeritve traku na NPAP. Zaznavanje trenutne lege in usmeritve traku na NPAP na osnovi zaznaval tlaka NPAP smo izvedli s preprostim algoritmom.

1.2.1 Zaznavanje lege in usmeritve traku

Zaznavanje lege in usmeritve traku je izvedeno ob predpostavki, da je dolžina traku daljša od širine in dolžine matrike cevok in da trak leži prek vse NPAP. Z namenom, da zaznamo lego in usmeritev traku, najprej poiščemo točke, kjer trak seka stranice NPAP. Te točke imenujemo vogali traku. Vogale traku iščemo le v robnih vrsticah na vseh štirih straneh NPAP in jih najdemo na podlagi spremembe stanja cevok (pokrita - nepokrita). Primer zaznavanja vogalov je predstavljen na sliki 31. Vogale imenujemo v enakem zaporedju, kakor jih najdemo, npr: C1, C2, C3, C4. Največje število vogalov je postavljeno na 16. Število najdenih vogalov je večje od 4, če motnje pri meritvi tlaka povzročijo, da se hitro spreminjajo stanja posameznih cevok (bliskanje cevok na zaslonu računalnika) ali če zaznavanje stanja cevok (pokrito - nepokrito) posameznih cevok ni pravilno. V takšnih primerih se stanje omenjenih posameznih cevok oceni na podlagi logične funkcije in stanj sosednjih cevok.

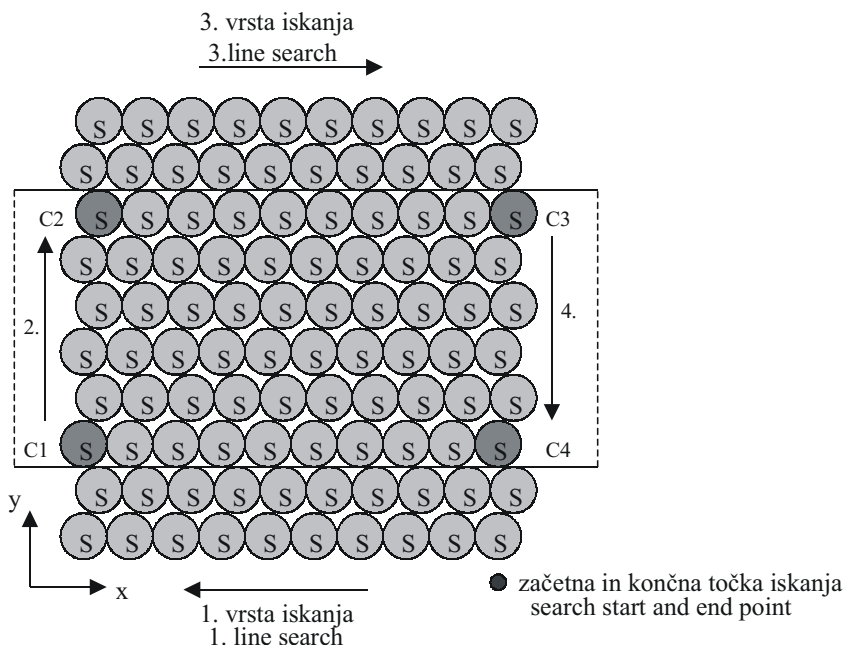
Med iskanjem vogalov se le ti štejejo v vsaki iskalni vrsti posebej. Če je lega traku takšna, da je najdenih manj ko 4 vogalov, tedaj se preveri, kateri vogali so pokriti s trakom. Po tej informaciji se dodajo manjkajoči vogali. Primer je prikazan na sliki 32.

compensation of undesired rotations during translational motion of the band. Therefore, a simple algorithm for detecting the position and orientation of the band with pressure sensors of the PASD was implemented.

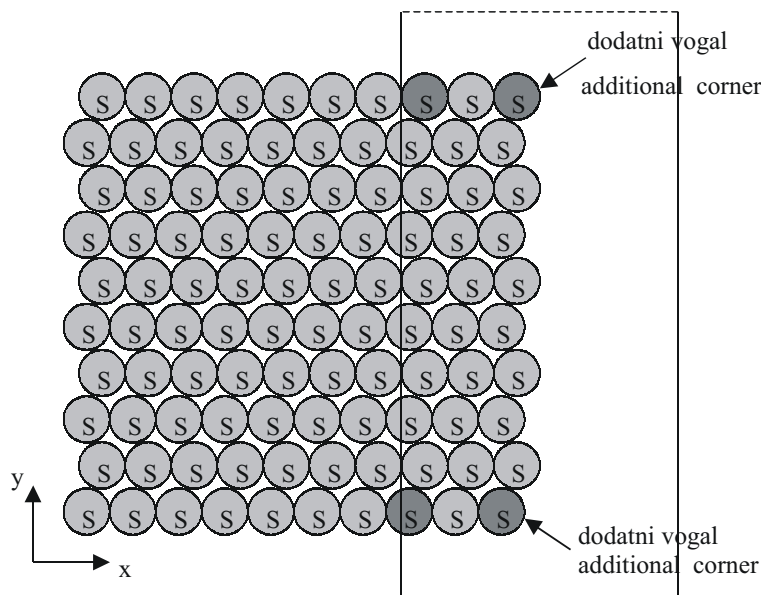
1.2.1 Detection of the position and orientation of the band

Position and orientation detection of the band is implemented assuming that the length of the band is longer than the width or the length of the array and that the band lies across the whole PASD. In order to detect the position and orientation of the band the points where the band intersects the sides of the PASD are first found. These points are called the corners of the band. The corners are searched only in the edge lines on all four sides of the PASD and are found on the basis of the change of the state (covered or uncovered) of the tubes. An example of corner detection is presented in Figure 31. Corners are always named in the same sequence as they are found, for instance: C1, C2, C3, C4. The maximum number of corners is set to 16. A number of corners greater than four can be found when disturbances in the measurement of the pressure cause the detected states of the singular tubes to change rapidly (on the screen some tubes are flashing) and when the detection of the state (covered or uncovered) of the isolated tubes is not correct. In such cases the state of these isolated tubes is estimated with a logical and function of the states of the neighboring tubes.

During the search the corners are counted on each search line separately as well as the total sum of the corners. If the position of the band is such that less than four corners are found, then which of the corners are covered is checked. On the basis of this information the missing corners are added. An example is shown in Figure 32.



Sl. 31. Zaznani vogali traku in iskalne vrste  
 Fig. 31. Detected corners of the band and the search lines

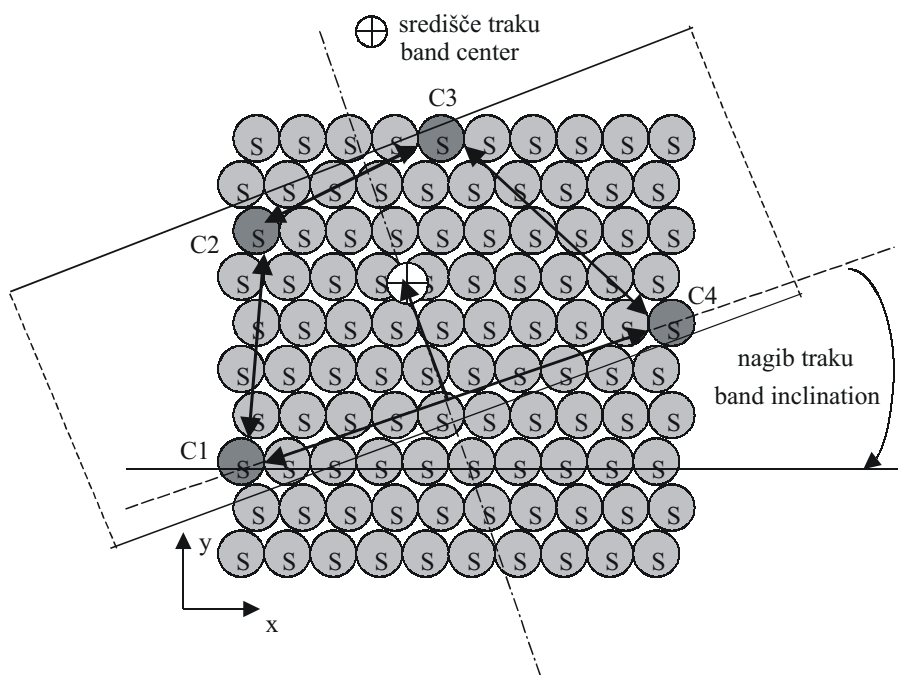


Sl. 32. Primer dodanih vogalov  
Fig. 32. An example of added corners

Na podlagi 4 poiskanih vogalov se izračunajo stranice četrkotnika. Stranica z največjo dolžino se uporabi za izračun nagiba traku. Takšno oceno nagiba traku lahko uporabimo pod predpostavko, da je širina traku približno enako dolga po vsej dolžini traku. Ob sedanjí konstrukciji in številu cevok NPAP je najmanjša ločljivost, s katero lahko določamo nagib traku  $\alpha$ , ocenjena z enačbo

On the basis of four found corners the sides of the quadrilateral are calculated. The side with the maximum length is used for the calculation of the inclination of the band. Such an estimation of the band inclination could be used assuming that the width of the band is approximately equal along its length. With the present construction and the number of tubes of the PASD [13] a minimum resolution for the determination of band inclination  $\alpha$  is estimated with the equation:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{9} = 0,11 \hat{=} \Rightarrow \alpha = 0,11 \text{ [rad]} \quad (2).$$



Sl. 33. Primer določitve središča in nagiba traku  
Fig. 33. An example of a band center and a band-inclination determination

Poleg nagiba traku ocenimo na podlagi 4 poiskanih vogalov tudi središče traku. Različne lege traku na NPAP določajo 4 različne oblike likov (pravokotnik, trapez, trapezoid, itn.). Primer lege traku na NPAP, ki tvori trapezno obliko lika, je prikazan na sliki 33. Središče traku je ocenjeno na podlagi stranice z največjo dolžino (med vogaloma C1 in C4) in njej levo (stranica med C1 in C2) ter njej desno (stranica med C4 in C3) sosednjo stranico. Nato izračunamo povprečno vrednost projekcij leve in desne najdaljši sosednje stranice na premico, pravokotno na stranico z največjo dolžino. Središče traku je določeno kot točka, ki leži na polovici povprečne vrednosti projekcij leve in desne sosednje stranice in stranice, ki je pravokotna na stranico z najdaljšo dolžino ter na sredini seka stranico z najdaljšo dolžino.

Če pa je število najdenih vogalov večje od 4, tedaj se ponovi iskanje vogalov. V primeru, da ne najdemo štirih vogalov niti v drugem iskanju, tedaj se iskalni postopek ustavi.

Probleme pri drugem iskanju vogalov običajno povzročijo motnje pri zaznavanju stanja cevki.

### 1.2.2 Gibanje vzdolž dolžine traku s krmiljenjem usmeritve traku s povratno zvezo

Kompenzacija neželenih vrtenj traku med vzdolžnim gibanjem je izvedena v tako imenovani sklenjeni zanki meritev in delovanj.

Krmiljenje usmeritve traku s povratno zvezo smo izvedli na primeru gibanja vzdolž dolžine traku nazaj. Najdaljša stranica traku leži vzdolž osi  $x$  NPAP v začetni legi. V tem primeru lahko uporabimo vrtilno gibanje v levo in v desno s premikom nazaj za kompenzacijo neželenih vrtenj med vzdolžnim gibanjem. Tako je sklenjena zanka sestavljena iz določanja središča traku in njegovega nagiba. Če je nagib traku večji od  $0,11$  v rad, tedaj izvajamo rotacijsko gibanje desno. Če pa je nagib traku manjši od  $-0,11$  v rad, tedaj izvajamo vrtilno gibanje levo. Po končnem zaporedju vrtilnega gibanja na levo in na desno se krmilna zanka ponovi s ponovnim določanjem središča traku in njegovega nagiba.

### 1.2.3 Povzetek

Eksploimentalni rezultati so pokazali izboljšano obnašanje usmeritve pri krmiljenju traku s povratno zvezo med gibanjem vzdolž dolžine traku v primerjavi z gibanjem vzdolž dolžine traku brez krmiljenja usmeritve s povratno zvezo. Usmeritev traku med gibanjem nazaj ima približno vrednost,

Besides the inclination the center of the band is also estimated. Different positions of the band on the PASD determine four different angular shapes – rectangle, trapeze, trapezoid, etc. An example of the band situation on the PASD forming a trapeze shape is shown in Figure 33. The center of the band is estimated on the basis of the side with maximum length (between corners C1 and C4) and its left-hand (side between C1 and C2) and right-hand (side between C4 and C3) neighboring sides. The average value of the projections of the left-hand and right-hand neighboring sides to the line orthogonal on the side with the maximum length is calculated. The center of the band is determined as a point that is placed at a half of the average value of the projections of the left-hand and right-hand neighboring sides on the line that is perpendicular to the side with the maximum length and crosses the maximum length side at its middle.

If the number of corners found is larger than four the corner searching is activated again. If four corners are not determined in the second search then the procedure is stopped.

Problems with the corner determination in the second search are usually caused by disturbances in the state detection of the tubes.

### 1.2.2 Translational Motion Along the Length of the Band with Closed-Loop Orientation Control

The compensation of undesired band rotations during band translational motion is achieved in a so-called closed loop of measurements and actions.

The closed-loop band-orientation control was implemented for the case of translational motion backward along the length of the band. The longest side of the band lies along the  $x$ -axis of the PASD in the initial situation. Rotational motion to the left and to the right with translational motion backward could be used for the compensation of undesired rotations during translational motion in this case. So, the closed loop consists of the detection of the center of the band and its inclination. If the inclination of the band is between the values  $-0.11$  and  $0.11$  [rad] then translational motion to the left is activated. If the inclination of the band is higher than  $0.11$  [rad] then rotational motion to the right is activated. And if the inclination of the band is lower than  $-0.11$  [rad] then rotational motion to the left is activated. After a finite sequence of rotational motion to the left and to the right the control loop repeats, beginning with the detection of the center of the band and its inclination.

### 1.2.3 Summary

Experimental results have shown improved band-orientation behavior during the translational motion along the length of the band with closed-loop orientation control in comparison to the orientation behavior during translational motion along the length of the band without orientation control. The angle of rotation of the band during

določeno z območjem kota zasuka med  $-0,11$  in  $0,11$  v rad. Vzdolžno gibanje traku nazaj se ne ustavi zaradi kompenzacije neželenih vrtenj, ker se med vrtenjem trak premika v isti smeri. Tako preklapljanje med vrtilnim gibanjem na levo in na desno z vzdolžnim gibanjem nazaj povzroča gibanje traku nazaj.

Žal se je med opisanim krmiljenjem usmeritve traku s povratno zvezo pojavilo neželjeno premikanje traku v smeri  $y$  referenčnega koordinatnega sistema NPAP. Za kompenzacijo traku, ki drsi v smeri  $y$  NPAP, moramo vključiti v krmiljenje s povratno zvezo vzdolžno gibanje na temelju vrtenj, opisano v razdelku 1.1.3.

## 2 SKLEP

V prispevku smo predstavili tri tehnike krmiljenja brez povratne zveze gibljivega predmeta (traku PVC) na ravni površini NPAP: gibanje vzdolž dolžine traku, gibanje vzdolž širine traku in vrtilno gibanje traku (okoli osi  $z$ ). Med vrtenjem traku in premikanjem traku vzdolž širine traku se hkrati izvaja tudi premikanje vzdolž dolžine traku. Preobračanja traku na NPAP nismo obravnavali.

Preskusi s krmiljenjem gibanja traku brez povratne zveze so pokazali, da se pojavljajo med krmiljenjem brez povratne zveze mnoge motnje, ki povzročajo odstopanje od želenega gibanja. Na primer, med gibanjem vzdolž dolžine traku se občasno pojavi vrtenje traku. Zato smo v naslednjem koraku uporabili informacijo o gibanju traku za izvedbo tehnike krmiljenja s povratno zvezo.

Izvedli smo krmiljenje usmeritve traku s povratno zvezo med gibanjem vzdolž dolžine traku. Eksperimentalni rezultati so pokazali izboljšano obnašanje usmeritve med gibanjem vzdolž dolžine traku pri uporabi krmiljenja s povratno zvezo usmeritve traku v primerjavi z obnašanjem usmeritve traku pri gibanju vzdolž dolžine traku krmiljenja s povratno zvezo usmeritve traku. Natančnost krmiljenja usmeritve traku s povratno zvezo je odvisna od ločljivosti, s katero lahko določimo usmeritev naklon traku na NPAP.

Nekateri problemi so ostali nerešeni in jih bo v prihodnosti treba razrešiti, npr.: neželen premik traku v smeri osi  $y$  referenčnega koordinatnega sistema med krmiljenjem usmeritve traku s povratno zvezo. Nato je treba še preveriti gibanje traku na NPAP s površinami velikih izmer, velikim številom cevk in manjšim premerom cevk ter raziskati možnosti povečanja hitrosti gibanja. In nazadnje želimo celotnemu sistemu krmiljenja NPAP dodati še inteligentne tehnike krmiljenja, sledenje tirom, izogibanje oviram ipd.

## Zahvala

Projekt razvoja prototipne naprave NPAP je bil med drugim financiran tudi v okviru programa Fulbright-

translational motion backwards is around the value determined with inclination values  $-0.11$  and  $0.11$  (rad). The translational motion backwards of the band does not stop because of the band-rotation compensation since during the rotation the band moves in the same direction. So, only switching between rotational motion to the left and to the right with translational motion backwards produces translational motion backwards of the band.

Unfortunately, the sliding of the band in the  $y$  direction of PASD appeared during the described closed-loop control experiment. For the compensation of the band sliding in the  $y$  direction of the PASD the translational motion based on the rotations described in section 1.1.3 had to be incorporated into the closed-loop control algorithm.

## 2 CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH

Three open-loop control techniques for the motion of a flexible object (PVC band) on the flat surface of PASD are presented in this paper: the translation along the length of the band, the translation along the width of the band and the rotation (around  $z$ -axis). Translation of the band along the length of the band takes place during rotation of the band and translation along the width of the band. Flipping of the band was not considered.

Experiments with open-loop control of band motion have shown that during the open-loop control several disturbances appear causing deviations from the desired motion. For instance, during translational motion the length of the band occasionally rotates. Therefore, in the next step feedback information about band orientation is used to implement closed-loop control.

Closed-loop control was applied to the orientation of the band during translational motion along the length of the band. Experimental results showed improved orientation behavior during translational motion along the length of the band with closed-loop band-orientation control in comparison to the translational motion without orientation control. The accuracy of the closed-loop orientation control of the band depends on the resolution with which the orientation and inclination of the band is determined.

Some problems were not solved and remain to be solved in the future, for instance: undesired band motion in the  $y$  direction of the reference coordinate system during closed-loop band-orientation control. Next, the motion of the band on the surface of the PASD with bigger  $x$  and  $y$  dimensions, a larger number of smaller tubes and an increase of the motion speed still has to be considered. And finally, intelligent control techniques, trajectory tracking, obstacle avoidance are desirable for the complete PASD system.

## Acknowledgment

The prototype PASD development project was funded by the Fulbright Scholar Program and



ovih štipendij in je bil izveden v Laboratorijih Centra za tehniko avtomatizacije Središča za napredne tehnologije države New York na Politehničnem inštitutu v Rensselaer-u. Avtorji članka bi se radi posebej zahvalili vsemu osebju, ki je karkoli prispevalo k razvoju NPAP v Centru za tehniko avtomatizacije, posebej prof. Harryju Stephanou, Tobiasu Winther-ju in Ben-u Potsaid-u.

was carried out at the Laboratories of the Center for Automation Technologies, A New York State Center for Advanced Technology, Rensselaer Polytechnic Institute. The authors would like to thank to all the personnel involved at the Center for Automation Technologies, especially to Harry Stephanou, Tobias Winther and Ben Potsaid.

### 3 LITERATURA 3 REFERENCES

- [1] Böhringer, K.-F., B.R. Donald, N.C. MacDonald (1999) Programmable force fields for distributed manipulation, with applications to MEMS actuator arrays and vibratory parts feeders, *The International Journal of Robotics Research*, vol. 18, No. 2, 168-200.
- [2] Böhringer, K.-F., K. Goldberg, M. Cohn, R. Howe (1998) Parallel microassembly with electrostatic force fields, *Proceedings of the 1998 IEEE, International Conference on Robotics & Automation*, Lueven, Belgium, 1204-1211.
- [3] Kavraki, L. E. (1997) Part orientation with programmable vector fields: two stable equilibria for most parts, *Proceedings of the 1997 IEEE, International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, 2446-2451.
- [4] Luntz, J. E., W. Messner, H. Choset (1997) Parcel manipulation and dynamics with a distributed actuator array: the virtual vehicle, *Proceedings of the 1997 IEEE, International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, 2446-2451.
- [5] Akiyama, T., D. Collard, H. Fujita (1997) Scratch drive actuator with mechanical links for self-assembly of three-dimensional MEMS, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 6, No. 1, 10-17.
- [6] Konishi, S., H. Fujita (1994) A conveyance system using air flow based on the concept of distributed micro motion system, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 3, No. 2, 54-58.
- [7] Wenheng, L., P. Will (1995) Parts manipulation on an intelligent motion surface, *Proceeding of IROS'95*, 399-404.
- [8] Pister, K. S. J., R. Fearing, R. Howe (1990) A planar air levitated electrostatic actuator system, *Proceedings IEEE Workshop on MEMS*, Napa Valley, California, 67-71.
- [9] Fujita, H. (1993) Group work of microactuators, *International advanced robot program workshop on micromachined technologies and systems*, Tokyo, Japan, 24-31.
- [10] Storment, C. W., D.A. Borkholder, V. Westerlind, J.W. Suh, N.I. Maluf, G.T.A. Kovacs (1994) Flexible, dry-released process for aluminum electrostatic actuators, *Journals of Microelectromechanical Systems*, 3(3), 90-96.
- [11] Liu, C., T. Tsao, P. Will, Y. Tai, W. Liu (1995) A micro-machined magnetic actuator array for micro-robotics assembly systems, *Transducers-Digest Int. Conf. On Solid-State Sensors and Actuators, Stockholm, Sweden*, 34-38.
- [12] Vikramaditya, B., B.J. Nelson (1999) visually servoed micropositioning for robotics micromanipulation, *Microcomputer Application*, Vol. 18, No. 1, 64-72.
- [13] Uran, S., R. Šafarič, T. Winther (2002) pneumatic active surface device: prototype design and Lyapunov stability analysis, *Strojniški vestnik*, Vol. 48 (2002)4, str. 218-233.
- [14] Uran, S., R. Šafarič (2002) Pneumatic active surface device: open and closed loop control positioning techniques for rigid objects, *Strojniški vestnik*, Vol. 48 (2002)5, str. 267-282.

Naslov avtorjev: dr. Suzana Uran  
 prof. dr. Riko Šafarič  
 Fakulteta za elektrotehniko,  
 računalništvo in informatiko  
 Univerza v Mariboru  
 Smetanova 17  
 2000 Maribor  
 suzana.uran@uni-mb.si  
 riko.safaric@uni-mb.si

Authors' Address: Dr. Suzana Uran  
 Prof. Dr. Riko Šafarič  
 Faculty of Electrical Engineering  
 and Computer Sciences  
 University of Maribor  
 Smetanova 17  
 2000 Maribor, Slovenia  
 suzana.uran@uni-mb.si  
 riko.safaric@uni-mb.si

Prejeto:  
 Received: 3.4.2002

Sprejeto:  
 Accepted: 20.9.2002

## Energijska bilanca občine Tolmin

### The Energy Balance of the Tolmin Municipality

Miran Drole - Mihael Sekavčnik - Matija Tuma

*V članku je obravnavana energijska bilanca v občini Tolmin. Podrobneje so raziskane vse vrste energij, obnovljivih in neobnovljivih, ki so v občini ali prestopajo njene meje. Oskrba občine z energijo je razčlenjena glede na energijski vir, glede na sektorje porabe in napravljena je primerjava s celotno Republiko Slovenijo.*

© 2002 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: bilance energijske, vrste energije, oskrba z energijo, poraba energije)**

*The energy balance of the Tolmin municipality Tolmin is presented in this paper. All types of energy coming from renewable and nonrenewable sources, which are within or crossing the borders of the municipality, are precisely analyzed. The energy supply is studied in terms of the type of energy source and consumer. A comparison is made with the data that applies to the whole Slovenia.*

© 2002 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: energy balance, types of energy, energy supply, energy consumption)**

#### OUVOD

Vlada Republike Slovenije je leta 1996 sprejela Resolucijo o strategiji rabe in oskrbe Slovenije z energijo [1] in leta 1999 Energetski zakon [2]. Glede na ta osnovna dokumenta je razvoj energetike v precejšnji meri prepuščen lokalnim skupnostim, ki morajo med drugim pripraviti tudi ustrezne energijske osnove: ugotoviti trenutno stanje, določiti pripravo ukrepov za učinkovito rabo energije, urediti oskrbo in napovedati prihodnji razvoj energetike v občini. V ta namen je treba izdelati podrobno energijsko bilanco, razčleniti porabo po vrstah energije, po sektorjih in po posameznih skupinah porabnikov. V tem duhu je bila izdelana energijska bilanca za občino Tolmin [3], ki je v nadaljevanju prikazana podrobneje. Bilanca rabi lahko za vzorec drugim občinam. V preglednici 1 so zbrani nekateri značilni demografski podatki občine Tolmin v letu 1999 [4]. Najpomembnejše gospodarske panoge v občini so proizvodnja električne energije in

strojne opreme, proizvodnja kovin in kovinskih izdelkov, obdelava in predelava lesa, najpomembnejše dejavnosti pa gostinstvo in turizem, prevoznništvo in gradbeništvo.

#### 1 PREGLED ENERGIJSKIH TOKOV

##### 1.1 Energija sončnega sevanja

Energijo sončnega sevanja, ki doseže določeno površino zemlje, je mogoče oceniti na podlagi metod, opisanih v literaturi [5]. Ozemlje občine prejme letno 440.000 GWh energije. Manjši del te primarne energije je mogoče spremeniti v sekundarno energijo, del ostane akumuliran kot kemično vezana energija v obliki biomase. V preglednici 2 so navedene vrste površin v občini, delež sončnega sevanja, ki so ga deležne, in ocenjena energija biomase.

Preglednica 1. Nekateri značilni podatki občine Tolmin in primerjava s Slovenijo v letu 1999

Podatki	Občina Tolmin	Slovenija
površina v km <sup>2</sup>	382	20.254
število prebivalcev	12.324	1.965.986
gostota poselitve v preb/km <sup>2</sup>	32	97
indeks števila prebivalcev 1999/1996	99,36	100,04
indeks staranja	115,7	73,3
stopnja zaposlenosti	51,2	55,0

Preglednica 2. Deleži površin v občini in energija sončnega sevanja

Vrsta površin	Delež površin %	Letna energija sončnega sevanja GWh	Teoretična energija biomase GWh
neploдне površine	4,6	20.240	0
kmetijske površine	14,2	62.480	625
gozdne površine	67,5	297.000	2.970
površine v zaraščanju	13,7	60.280	603
skupaj	100,0	440.000	4.198

**Spremembe sončne energije na neplodnih površinah.** Delež neplodnih površin v občini je 4,6%. Pod izrazom neplodne površine so mišljena naselja in posamezne hiše, poti in ceste, golo skalovje itn. Te površine prejmejo letno 20.240 GWh energije sončnega sevanja. Ta energija se porablja za naravne dogodke, kakor je ogrevanje zemlje, izhlapevanja vode, gibanja zračnih mas itn. Energija sončnega sevanja ostaja znotraj občine.

**Spremembe sončne energije na kmetijskih površinah.** Delež kmetijskih površin v občini je 14,2%, te površine prejmejo letno 62.480 GWh energije sončnega sevanja. Če je izkoristek fotosinteze približno 1%, potem se je 625 GWh energije spremenilo v kemično vezano energijo biomase, 99% energije sončnega sevanja pa se porablja za naravne dogodke in ostaja znotraj občine.

Biomasa, pridobljena na kmetijskih površinah, ne pomeni uporabnega energijskega vira. Pojavlja se kot energija komunalnih odpadkov in energija odpadkov iz kmetijske proizvodnje. Zaradi premajhnih količin teh odpadkov energija tržno ni zanimiva, ostaja znotraj občine. Energija biomase se znotraj občine nekoliko povečuje.

**Spremembe sončne energije na gozdnih površinah.** Delež gozdnih površin v občini je 67,5%, te površine prejmejo letno 297.000 GWh energije sončnega sevanja. Če je izkoristek fotosinteze približno 1%, potem se je 2.970 GWh energije spremenilo v kemično vezano energijo biomase. Delež energije, ki se akumulira v vejah in deblih, je 20%, torej 594 GWh, delež energije, ki se akumulira v energetske neuporabnih delih dreves - v listih in koreninah, je 29%, torej 861 GWh, ostanek 51%, torej 1515 GWh pomeni energijo, ki je oddana v okolico pri dihanju rastlin [6]. Tudi v tem primeru se 99% energije sončnega sevanja porablja za naravne dogodke in ostaja znotraj občine.

Gospodarjenje z gozdovi narekuje prepoved sečnje na varovanih in drugih področjih in opredeljuje največji mogoči posek. Po oceni količine lesa, ki ga je v občini dovoljeno posekati letno, v energijo znaša ta energija biomase 136 GWh. Razlika 458 GWh

pomeni približno letno povečanja zalog biomase v gozdu, ki je ni mogoče izkoristiti. Ocenjena količina lesne biomase, ki je letno dosegljiva kot biomasa za kurjenje, znaša 78 GWh. Dejanska izraba v letu 1999 je bila 36 GWh. Razlika energij v višini 42 GWh je energija v lesu, ki je namenjen za nadaljnjo industrijsko predelavo. Del te energije v višini 18,4 GWh se pojavi kot energija biomase iz žagarskih obratov. Dejanska izraba v letu 1999 je bila 0,8 GWh.

**Spremembe sončne energije na površinah, ki se zaraščajo.** Delež površin v občini v zaraščanju je 13,7%, te površine prejmejo letno 60.280 GWh energije sončnega sevanja. Če je izkoristek fotosinteze 1%, potem se je 603 GWh energije spremenilo v energijo biomase. Tudi v tem primeru znaša delež energije, ki se akumulira v vejah in deblih, 20%, torej 121 GWh.

Ocenjena količina lesne biomase, ki se letno poseka na teh zaraščajočih se površinah, znaša 30 GWh. Razlika 91 GWh pomeni približno letno povečanje zalog biomase v zaraščajočih se površinah. Načrtno gospodarjenje bi verjetno pripeljalo do drugačne ocene. Ker pa je interes lastnikov zaraščajočih se površin za gojitvena dela pri pretvorbi teh površin v gozd majhen, je upoštevana dejanska raba tudi kot celotna možna. Dejanska izraba v letu 1999 je bila 27,5 GWh.

## 1.2 Obnovljivi energijski viri

**Sončno sevanje.** Del energije sončnega sevanja je mogoče koristno izrabiti pasivno, če se hkrati izboljša toplotna izolacija sedanjih stavb [7], del energije v višini 6,2 GWh pa s postavitvijo sprejemnikov sončnega sevanja (aktivna izraba) [8]. Dejanska aktivna izraba energije sončnega sevanja je 0,2 GWh.

**Energija biomase** gozda in zaraščajočih se površin v obsegu  $78,0 + 30,0 = 108,0$  GWh je v občini razmeroma dobro izrabljena, slabše pa energija biomase iz žagarskih ostankov v obsegu 18,4 GWh. Skupna izkoriščenost lesne biomase je 51 %.

**Potencialna energija vode** znaša pri vstopu v občino 98,3 GWh, kar pomeni teoretično potencialno

energijo Soče pri vstopu v občino glede na gladino jezera Most na Soči. Ker te energije ni mogoče izkoristiti zaradi zaščite Soče ali neopredeljenosti možnih lokacij v prostorskih načrtih, je v energijski bilanci občine ocenjena kot nič. Vodni viri znotraj občine omogočajo sedanjo proizvodnjo električne energije v obsegu 40,3 GWh(e), v izgradnji je HE Kneža s proizvodnjo 4 GWh(e), ostanejo še doslej neizrabljene možnosti v obsegu 4,3 GWh(e). Nadaljnjih 205,4 GWh predstavlja potencialna energija vode na območju občine Tolmin, ki pa jo izkorišča v HE Dobljar v sosednji občini Kanal. Občina Tolmin je bila leta 1999 neto izvoznik električne energije v obsegu 4,4 GWh.

Če predpostavimo, da potencialna energija vode zaradi ohranitve povodja reke Soče ni uporabna in da izkorišča potencialno energijo vode sosednja občina Kanal, potem je izkoriščenost te vrste energije v občini velika in bo po dograditvi HE Kneža še večja. Izkoriščenost potencialne energije vode v letu 1999 je bila 83 %.

**Kinetična energija vetra** je ocenjena na podlagi podatkov o meritvah moči vetra v Tolminu in

na Voglu. Meritve kažejo, da izkoriščanje te vrste energije trenutno ni gospodarsko upravičeno. V prihodnje je treba izvesti meritve na več različnih krajih.

**Geotermalne energije** so neizrabljen energetske vir v ocenjenem obsegu 112 GWh. Dejanska izraba geotermalne energije je enaka nič.

**Energija organskih odpadkov** v živinoreji za proizvodnjo bioplina je neizrabljen vir v obsegu 5,1 GWh, dejanska izraba je enaka nič.

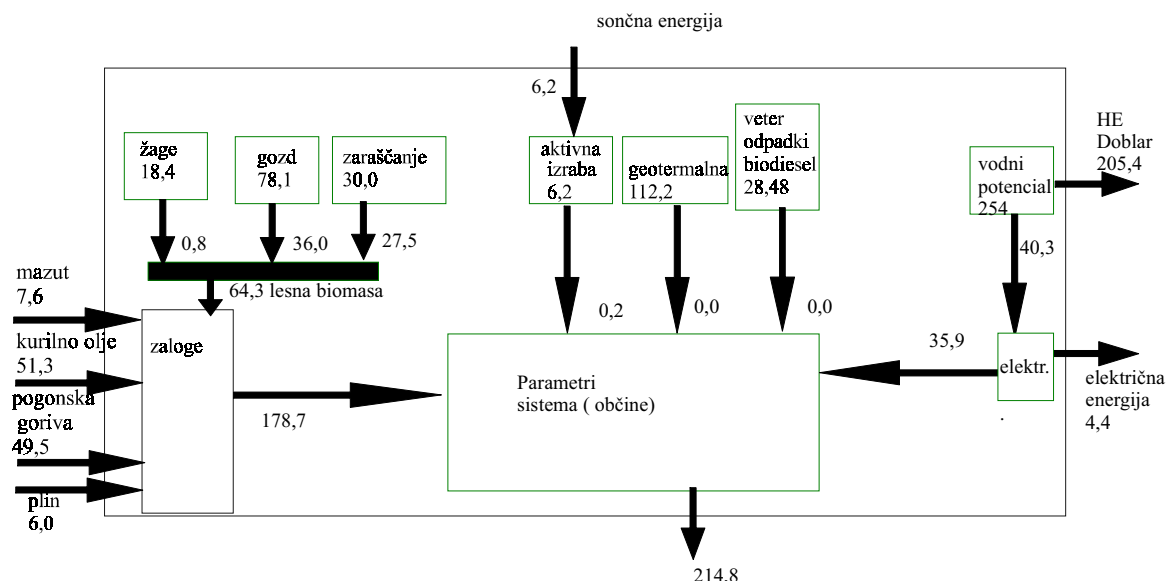
**Energija komunalnih odpadkov** gospodarsko ni uporabna.

### 1.3 Neobnovljivi energijski viri

Poraba posameznih primarnih energetskih virov, kupljenih na trgu, je prikazana v preglednici 3, kjer je tudi vidna razdelitev posameznih energijskih virov glede na sektor uporabe. Ta goriva so mazut, kurilno olje, pogonska goriva za promet, plinska goriva in električna energija. Zaradi organizacije delitve električne energije je treba šteti to energijo kot kupljeno

Preglednica 3. Energijska bilanca občine Tolmin v letu 1999

Energijski vir	Dejanska poraba GWh						mogoče povečanje proizvodnje	skupaj GWh
	industrija	promet	gospodinjstva	obrtna, javna poraba	prodaja	skupaj		
mazut	7,6	-	-	-	-	7,6	-	7,6
kurilno olje	4,4	-	32,4	14,5	-	51,3	-	51,3
pogonska goriva	-	49,5	-	-	-	49,5	-	49,5
plinska goriva	3,6	-	1,8	0,6	-	6,0	-	6,0
električna ener.	13,5	-	13,3	9,1	4,4	40,3	8,3	48,6
sončna energija	-	-	0,2	-	-	0,2	6,0	6,2
geotermalna en.	-	-	-	-	-	-	112,0	112,0
lesna biomasa	0,8	-	63,5	-	-	64,3	62,1	126,4
organski odpad.	-	-	-	-	-	-	5,1	5,1
skupaj	29,9	49,5	111,2	24,2	4,4	219,2	193,5	412,7



Sl. 1. Energijska bilanca občine Tolmin v letu 1999 v GWh

na trgu, čeprav je proizvodnja električne energije v občini večja od njene porabe. Značilno za občino je, da ni zunanjšega nakupa lesa prav tako ne nakupa premoga.

#### 1.4 Izstopajoče energije

Energija v obliki fosilnih goriv (52,2 %), lesne biomase (29,3 %), električne energije (18,4 %) in izrabljene energije sončnega sevanja (0,1 %), ki vstopa, se na ozemlju občine spremeni v mehansko in električno delo ter toploto. Porablja se za različne tehnološke postopke in za ogrevanje. Energija zapušča meje občine predvsem kot toplota pri temperaturi okolice, prodani les, prodana električna energija in podobno.

Meje občine zapušča tudi potencialna energija vode, ki jo izkorišča sosednja občina Kanal v HE Dobljar in presežek električne energije za trg v obsegu 4,4 GWh.

## 2 ENERGIJSKA BILANCA OBČINE

Energijska bilanca občine Tolmin je prikazana na sliki 1 in v preglednici 3. Osnovni okvir slike pomeni mejo občine, prek katere vstopajo ali izstopajo energije, kupljene ali prodane na trgu. Znotraj te meje so opisani posamezni viri energije. Številke v okvirih, ki pomenijo notranje vire energije, pomenijo letno mogoče izkoriščanje nekega vira v GWh. Številke ob puščicah, ki pomenijo spremembo energije, pa pomenijo dejansko uporabo tega vira v občini Tolmin v letu 1999.

Energijski tok skozi občino Tolmin je v letu 1999 znašal 219,2 GWh. Od tega je bilo 114,4 GWh ali 52,2 % energije uvožene in 2,0 % iz občine izvožene. Poraba energije v občini je bila 214,8 GWh.

Iz preglednice 3 je razvidno, da je zelo dobro uporabljena potencialna energija vode in relativno dobro tudi energija lesne biomase. Vendar pa so v občini prav pri izkoriščanju lesne mase še precejšnje možnosti. Ti dve vrsti energije sta namreč porabni tako za spremembo v toplote kakor za spremembo v

mehansko ali električno delo in zato kakovostni in iskani.

Tik pred uporabo je geotermalna energija tople vode, ki lahko delno nadomesti fosilna goriva. Geotermalna energija je uporabna za ogrevanje, ne more pa nadomestiti električne energije. Njena delazmožnost je majhna, energija ni kakovostna.

Skromno je izrabljena sončna energija, vendar je tudi njena uporabnost omejena: dandanes jo je mogoče gospodarsko upravičeno spreminjati le v toploto. Za izkoriščanje energije sončnega sevanja so potrebne tudi ustrezne državne vzpodbude.

### 3 PRIMERJAVA OBČINE TOLMIN S CELOTNO REPUBLIKO SLOVENIJO

Energijska slika občine postane bolj nazorna, če jo primerjamo z rabo energije v Republiki Sloveniji [9], diagram 1. Opazno je, da je delež porabe trdnih goriv, kamor sodi tudi lesna biomasa, v občini Tolmin bistveno večji od slovenskega povprečja. Večja poraba trdnih goriv gre predvsem na račun plinastih.

Stanje v občini dobro ponazarja tudi primerjava rabe energije po sektorjih, ki jo kaže diagram 2. Medtem ko je v Sloveniji zastopanost industrije 29%, je ta delež v občini Tolmin le 14%. Razlika gre deloma na račun slabe razvitosti industrije v občini, deloma na račun industrijskih panog v občini, ki niso energijsko potratne. Večja industrija v občini je elektrokovinska s poudarkom na montaži naprav. Preglednica ne kaže samo majhno industrijsko, ampak tudi na manjšo prometno razvitost občine. Velik pa je delež energije za široko porabo, v ta sektor spadajo gospodinjstva in javna poraba.

Struktura rabe energije v gospodinjstvih je razvidna iz preglednice 4. Opazen je velik delež uporabe lesne biomase, kar je posledica lastne energijske oskrbe kmetov in polkmetov.

Primerjava z državami zahodne ter srednje in vzhodne Evrope je prikazana v preglednici 5. Primerjani so podatki o porabi energije na prebivalca v letu 1990 in napovedi porabe energije v letu 2010 ([10] in [11]) in primerjani s podatki energijske bilance

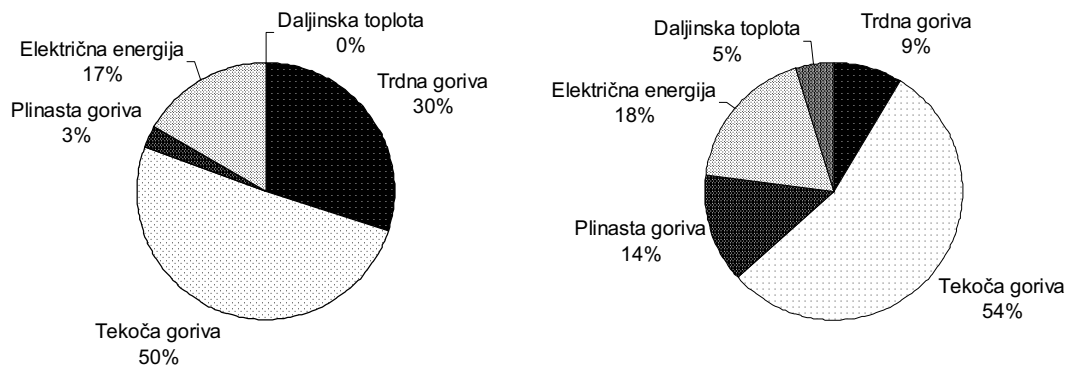


Diagram 1. Deleži posameznih energijskih virov v občini Tolmin (levo) in v Republiki Sloveniji (desno)



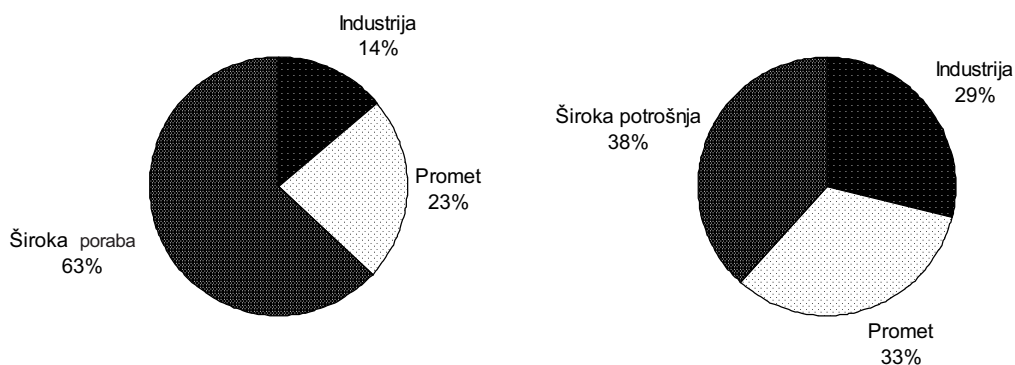


Diagram 2. Poraba energije po sektorjih v občini Tolmin (levo) in v Republiki Sloveniji(desno)

Preglednica 4. Strukture porabe energije v gospodinjstvih v občini Tolmin in v Republiki Sloveniji

Vir energije	Občina Tolmin 1999	R Slovenija 1996
biomasa	57,0%	14,0%
rjavni premog	0,0%	3,0%
tekoča goriva	29,1%	44,0%
plinska goriva	1,7%	6,0%
električna energija	12,0%	22,0%
daljinska toplota	0,0%	11,0%
skupaj	100,0%	100,0%

Preglednica 5. Poraba energije in električne energije na prebivalca

Pokrajina	Letna poraba energije MWh/preb.	Letna poraba elekt. energije MWh(e)/preb.
Zahodna Evropa 1990	39,3	5,44
Zahodna Evropa 2010	43,1	7,97
Sred. in Vzh. Evropa 1990	35,5	3,61
Sred. in Vzh. Evropa 2010	35,0	5,35
Republika Slovenija 1996	39,5	6,28
Občina Tolmin 1999	25,4	2,91

občine Tolmin v letu 1999. Podobna primerjava je opravljena tudi pri porabi električne energije na prebivalca. Po teh podatkih je Republika Slovenija povsem primerljiva z drugimi evropskimi državami, opazno pa je zaostajanje občine Tolmin.

#### 4 SKLEPI

Izdelana in razčlenjena je podrobna energijska bilanca občine Tolmin, ki je primer za druge slovenske občine v luči energijskega zakona.

Energijska bilanca je pokazala, da je občina Tolmin razmeroma skromen porabnik energije na prebivalca v primerjavi s Slovenijo in Evropo. Primerjava z državo nadalje kaže, da je občina gospodarsko manj razvita, opazno zaostaja tudi na področju prometa.

Struktura porabe energije je v občini Tolmin ugodna predvsem po zaslugi lesne biomase. Kot

najmočnejši energijski vir se pojavljajo naftni derivati, ki počasi izpodrivajo lesno biomaso. To je opazno v mestih in na podeželju, izjema so le visokogorske vasi.

Na področju rabe lesne biomase so viri v občini Tolmin večji, kakor so trenutne potrebe po tej vrsti energije. Izkoriščenost lesne biomase je večja od povprečja v Sloveniji, omejena pa je le na lastno oskrbo. Obstajajo možnosti organizirane proizvodnje in delitve lesne biomase, predvsem iz lesnopredelovalnih podjetij in gozdnih površin v zaraščanju.

Občina je kljub velikim lastnim energijskim virom uvoznik energije, predvsem na področju prometa. Opazen je majhen delež plina in odsotnost daljinske oskrbe s toploto.

Na območju občine Tolmin potekajo raziskave o možnostih uporabe geotermalne energije za ogrevalne namene. Načrtovan je skorajšnji začetek

uporabe te vrste energije za daljinsko ogrevanja mesta Tolmin.

Možnost rabe sončne energije je skromna, odvisna je od politike denarne pomoči.

Izkoriščanji kinetične energije vetra in energije komunalnih odpadkov sta zaradi premajhnih virov ocenjeni kot nezanimivi.

## 5 LITERATURA

- [1] Resolucija o strategiji rabe in oskrbe Slovenije z energijo, *Uradni list Republike Slovenije št. 9/96*, Ljubljana 1996.
- [2] Energetski zakon, *Uradni list Republike Slovenije št. 79/99*, Ljubljana 1999.
- [3] Drole, M. (2002) Energetska bilanca občine Tolmin, magistrsko delo, *Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani*.
- [4] Osnutek regionalnega razvojnega programa statistične regije Goriška 2002/2006, *Severnoprimorska mrežna regionalna razvojna agencija*, Idrija 2001.
- [5] Medved, S., P. Novak (2000) Varstvo okolja in obnovljivi viri energije, *Fakulteta za strojništvo*, Ljubljana.
- [6] Torelli, N. (1996) Ekološki, surovinski in energetski pomen gozda in lesa, zbornik *Biomasa - vir energije za Slovenijo*, Ljubljana.
- [7] Jordan, S., M. Tomšič (1996) Perspektive uporabe sončne energije v Sloveniji, *Energetika: Politika, Časopis za kritiko znanosti*, Ljubljana.
- [8] Duffie, J. A., W.A. Beckman (1991) *Solar engineering of thermal processes*, Wiley-Interscience Publication, New York.
- [9] Poročilo o stanju okolja v Sloveniji, Poročevalec - *Državni zbor Republike Slovenije*, Ljubljana 1996.
- [10] *Energija za jutrišnji svet*, Slovenski odbor Svetovnega energijskega sveta, Ljubljana 1994.
- [11] Kleinpeter, M. (1995) *Energy planning and policy*, UNESCO, John Wiley & Sons, Chichester.

Naslov avtorjev: mag. Miran Drole  
dr. Mihael Sekavčnik  
prof.dr. Matija Tuma  
Fakulteta za strojništvo  
Univerze v Ljubljani  
Aškerčeva 6  
1000 Ljubljana

Prejeto: 27.5.2002

Sprejeto: 20.9.2002

## Strokovna literatura

### Professional Literature

#### Ocene knjig

##### Helmut Lindner: Physik für Ingenieure

Zal.: Fachbuchverlag Leipzig, 16. izdaja 2001.

Obseg: format 16 × 23 cm, 795 str.

Cena je 35 € in 15 € za zbriko nalog.

V oceno smo dobili 16. popravljeno izdajo učbenika fizike "Physik für Ingenieure", že pokojnega avtorja H. Lindnerja, ki je napisan v nemškem jeziku. Veliko število izdaj govori o kakovosti in uporabnosti učbenika.

Opraviti imamo z zajetno knjigo na 795 straneh, ki obsega celotno snov uvodnih tečajev fizike, od osnov merenj do elementarnih delcev. Žal že bežen pregled pove, da je pedagoški način podajanja snovi ostal preveč blizu letnice prve izdaje in da je fizikalna zahtevnost učbenika na stopnji boljše srednje šole, seveda z nekaj uporabe diferencialnega računa. Snov je predstavljena na nezahteven način in se v večini primerov omeji na najbolj osnovne fizikalne pojme, ki so sicer lepo razloženi ob številnih skicah, a razlaga zaradi svoje preprostosti včasih zaide v dolgovezenje. Potrebno matematično predznanje obsega poznavanje osnov vektorskega računa in nekaj preprostega odvajanja in integriranja. Presenetljivo seže včasih podana snov krepko čez ustaljeni program osnov fizike, posebej pri poglavju o atomiki, vendar je to zgolj zavajajoče podajanje dejstev brez natančne in dosledne razprave. Kot primer navedimo zapis Fermi-Diracove porazdelitve povprečnega števila delcev po energijskih stanjih, ki je poudarjeno zapisana na strani 600. Omenjanje tega rezultata brez osvetlitve ozadja in brez izpeljave je zgolj zamegljevanje osnov in odvracanje bralca od namenjenega cilja.

Oglejmo si vsebino. V uvodu je podanih nekaj osnovnih misli o fizikalnih enotah, njihovem zapisovanju, o merilnih pogreških ter celo o linearni regresiji. Sledi poglavje o mehaniki od kinematike do opisa vrtenja. Nato sledijo poglavja mehanika tekočin in plinov, nihanje in valovanje, toplota, optika, električna, kvantna teorija in relativnost ter poglavje o atomski fiziki. Na koncu je dodano še obsežno stvarno kazalo. Hitro opazimo nekoliko nenavaden vrstni red snovi, saj je fizikalno težko obravnavati električno nihanje in kasneje valovno optiko pred obravnavo električnih pojavov.

Bolj kakor vrstni red zmoti v knjigi nenavaden način poudarjanja rezultatov. Avtorju se je skoraj vsak obrazec zdel tako pomemben, da ga je postavil v okvir, ga s strani imenoval z debelim tiskom in jo še oštevilčil. Avtorjeva vnema vodi tako daleč, da ni težko najti strani, na kateri je zarisanih tudi pet ali več okvirčkov (na strani 592 jih je celo osem).

Takšen način poudarjanja je mogoče dober za ustne nastope, nikakor pa se ne zdi primeren za študij fizike. Pri fiziki je namreč treba razumeti osnovne fizikalne zakone in njihove medsebojne vplive, komur pa se zdi pomembno, da si zapomni vse zapisane obrazce, je gotovo zgrešil osnovni namen začetnega tečaja fizike pa tudi ustni del izpita mu bo povzročal težave.

Zanimivi so tudi rešeni primeri, ki so posejani po knjigi. Ti primeri sodijo v "vedenje o formulah in znanje o tem, kako podatke vstaviti vanje". V rešitvi avtor po navadi kar pove številko obrazca, v katerega bo vstavil podatke, potem pa največ prostora izgubi z izpisovanjem računskih izrazov, v katerih vedno znova kaže, kako je treba v obrazec vstaviti številko z enoto. Mogoče je takšen način reševanja fizikalnih nalog uporaben v kakšni srednji šoli, kasneje gotovo ni.

S tehničnega vidika ne moremo knjigi zameriti ničesar. Je pregledna, vključuje skrbno izdelane skice, tudi nekaj fotografij, veliko preglednic, tiskana je na dobrem papirju in je trdo vezana. Ljubitelji tovrstne ameriške literature bodo knjigi zamerili črno-belo tehniko, vendar je študij fizike bolj trdo garanje ob vsebini in manj uživanje ob barvnih slikah, raznobarnih okvirčkih in ob bolj ali manj posrečenih ilustracijah.

Povejmo še, da učbenik dopolnjuje zbirka nalog istega avtorja, ki nosi naslov Physikalische Aufgaben, Fachbuchverlag Leipzig, 32. izdaja, 2001. V tej knjigi je zbranih in rešenih 1200 nalog, katerih zahtevnost spet sodi bolj na srednješolsko kakor na visokošolsko raven.

Zato bi omenjeni učbenik in pripadajočo zbirko nalog pogojno priporočil predvsem študentom visokošolske strokovne smeri, posebej tistim, ki jim je nemški jezik bliže od angleškega.

Učbenik in zbirko nalog lahko naročite na naslovu <http://www.hanser.de>.

M. Kokol

##### Rainer Ose: Elektrotechnik für Ingenieure Band 1: Grundlagen

Zal.: Fachbuchverlag, Leipzig, Carl Hanser Verlag, München, 2. predelana izdaja 2001.

Obseg: 16 × 23 cm, 302 strani + 31 strani zbirke formul.

Cena je € 25,46.

Knjiga je nastala kot učni pripomoček na visoki strokovni šoli v Braunschweigu. Zajema tri osnovna področja elektrotehnike: 1. enosmerni viri, učinki in vezja 2. električna in magnetna polja in 3.

izmenični viri, učinki in vezja. Po enakem vrstnem redu je tudi razporejena vsebina knjige. Obravnava učinke električnega toka, osnovne zakone pri reševanju oz. načrtovanju vezij, merjenje napetosti in tokov, obravnava določitev delovne točke pri linearnih in nelinearnih elementih, električna in magnetna polja, izračune električnih polj vodnikov, ozemljitev in drugega, izračune magnetnih polj v feromagnetnih materialih in v zračnih režah, pojave v kondenzatorjih in tuljavah, vezja z njimi in prehodne pojave v vezjih RCL. Nazadnje obravnava še izmenične sinusne vire in vezja, ki vključujejo upore, kondenzatorje in tuljave, tudi z njihovimi stranskimi učinki (predvsem izgube). Posveti se tudi meritvam induktivnosti in kapacitivnosti z mostičnimi metodami. Obravnava tudi filtre, četverpole, navidezno, delovno in jalovo moč ter trifazne sisteme. V tej 2. izdaji je zlasti razširjena obravnava vezij z izmeničnimi viri s kazalčnimi diagrami.

Značilnost knjige je predvsem njena usmerjenost v hitro reševanje raznih problemov. Vsebuje veliko zgledov, vključenih v posamezna poglavja, na koncu pa je še zbirka nalog, katerih rešitev lahko najde bralec oz. reševalec na medmrežju. Za lažjo uporabo obravnavanih postopkov je knjigi dodana zbirka obrazcev, ki pa je uporabna le v povezavi s knjigo, tako da je zbirko bolje razumeti kot posebno pojmovno kazalo.

Knjiga je dober uvod v osnove elektrotehnike. Več o elektrotehniki in njeni uporabi je zbrano v 2.delu.

A. Hussu

**Johannes Borgmeyer : Grundlagen der Digitaltechnik**

Zal.: Carl Hanser Verlag, München, 2. predelana izdaja 2001.

Obseg: 16 × 23 cm, 332 strani, 195 slik, 65 preglednic.

Cena je € 49,80.

Knjiga je nastala kot učni pripomoček za področje digitalne tehnike na visoki strokovni šoli v Konstanci. Njen namen je širši, tudi za samostojen študij. Pomena digitalne tehnike ne bomo utemeljevali, pogledjmo raje vsebino knjige. Razdeljena je v 11 poglavij. Začne s številskimi sistemi, njihovimi pretvorbami, zapisi s stalno in premično vejico. Drugo poglavje obravnava dejansko predstavitev dvojiških števil z raznimi elektronskimi elementi oz. tehnologijami (TTL, CMOS itn.). V tretjem poglavju je zajeta preklonpa algebra, spremenljivke, osnovni operatorji, izreki, normalne oblike zapisov logičnih funkcij, poenostavljanje funkcij. Naslednje poglavje obravnava kode (kodiranje številskih podatkov, alfanumerične kode, Grayeve kode, kode, ki omogočajo preverjanje prenesene oz. shranjene

informacije). V petem poglavju so obravnavana nekatera osnovna digitalna vezja, primerjalniki, multiplekserji in demultiplekserji, seštevalniki, pretvorniki kod in drugo. Sledi obravnava pomnilnih elementov oz. preklonnih vezij in njihovo krmiljenje. Sedmo poglavje je namenjeno Moorovim in Mealyjevim avtomatom in nekaterim osnovnim uporabnim izvedbam, n.pr. števeci, premikalni registri, serijsko-paralelni pretvorniki in drugo. Osmo poglavje obravnava pomnilna vezja. V šestem poglavju je bila obravnava omejena na elemente, ki shranijo en sam bit. Tu so tudi obravnavani postopki za shranjevanje posameznih bitov, vendar v elementih, ki jih lahko shranijo veliko, n.pr. različna pomnilna vezja v računalnikih. Naslednje poglavje obravnava enkrat in večkrat programljiva vezja, predzadnje poglavje digitalno-analogne pretvornike, razne izvedbe, stranske pojave, hitrosti itn. ter zadnje poglavje analogno-digitalne pretvornike.

Obet naslova knjige je z zajetimi področji digitalne tehnike, s sistematično obravnavo, številnimi zgledi in nalogami z rešitvami prav gotovo izpolnjen.

A. Hussu

**Reiji Mezaki, Masafumi Mochizuki, Kohei Ogawa:**

**Engineering Data on Mixing**

Zal.: Elsevier Science B.V., Amsterdam

1. izdaja, 2000

Obseg: format 17 x 24 cm, trda vezava, 769 strani.

Cena je 272,50 €.

Knjiga odstopa od običajno spisanih, saj je kompilacija velike množice podatkov na temo mešanja, ki so bili objavljeni v okviru člankov pomembnejših revij od leta 1975 dalje. Tako so iz izvornih člankov povzeti naslov prispevka z avtorji ter navedbo prve objave. Sledi opis (s sliko) eksperimentalne naprave, podani so robni pogoji preskušanja. Rezultati raziskav so podani v obliki napovedi ali pa so vrednosti tabelirane oziroma prikazane v grafični obliki. Sledi označba veličin.

Oblikovanje mešala in posode se še vedno močno opira na predhodne izkušnje. S tega vidika so podatki zbrani in predstavljeni na način, ki omogoči lažji dostop do iskanih pojmov. Knjiga obsega osem poglavij, ki sistematično zajemajo področje mešanja snovi naslednjih faznih sistemov: trdnina - kapljevina, kapljevina - kapljevina, plin - kapljevina, in trdnina - plin - kapljevina. V prvem poglavju so predstavljeni različni tokovni vzorci kombinacij posod in vrst mešal. Večina meritev je bila opravljena z napravami LDA. Poglavja 2 do 5 podajajo različne vrednosti in napovedi veličin, npr.: čas pomešanja, moč mešanja, prenos toplote ter prenos snovi. V 6. poglavju so

združeni kriteriji povečevalnih metod za že omenjene fazne sisteme. V 7. poglavju so zajeta še preostala področja, značilna pri mešanju: poplavno stanje, zadržek faze, kritična hitrost mešanja, velikost in porazdelitev razpršene faze itn.

Tako knjiga na svojstven način predstavlja alternativo preživetja podatkov zbranih na to temo, ki običajno bralca zanimajo; ne glede na to, ali se s tem ukvarja s teoretične ali pa eksperimentalne plati znotraj različnih inženirskih dejavnosti.

A. Bombač

## UGODNE CENE V SKLADIŠČU V NEMČIJI

### Vrtalni stroji

CNC COLLET & ENGELHARDT Bfb 100	X/Y/Z 1400/750/1200/710 mm, ISO 50, TNC 135, Ø 100	1967/84
UNION BFT 90/3	X/Y/Z 1600/1600/1000 mm, ISO 50, DRO, Ø 102	1979
CNC UNION BFT 90/5	X/Y/Z 1600/1250/1600 mm, ISO 50, TNC 135, Ø 102	1988
UNION BFT 90/3-2	X/Y/Z 1600/1250/815 mm, DRO, Ø 102	1989
CNC WOTAN Rapid 2 K-850	X/Y/Z/W 4000/2500/800/1000 mm, SINUMERIK, Ø 140	1987

### CNC obdelovalni centri

DECKEL DZ 3 - S	X/Y/Z 450/300/500 mm, 2 Pal. ATC 40	1983
HELLER BZH 07	X/Y/Z 630/500/560 mm, 2 Pal. ATC 40	1990
FRITZ WERNER TC 1.4 C	X/Y/Z/B 630/500/630 mm/0,001°, ATC 92	1992
NORTE HS 4000	X/Y/Z 2000/500/800 mm, ATC 30	1991
STAMA MC 318 2 vreteni	2 mizi 1250 × 630 mm, 2 × ATC 18	1989

### Stroji za izdelavo zobnikov

CNC PFAUTER PE 150	Ø 150 × 150 mm / Modul 4, 5 osni CNC	1986
LIEBHERR L 160 R	Ø 165 × 480 mm / Modul 6, za rotorje	1980
PFAUTER P 253	Ø 250 × 250 mm / Modul 6	1980
PFAUTER PA 320	Ø 350 × 250 mm / Modul 8	1981
PFAUTER P 400	Ø 400 × 275 mm / Modul 8	1976
CNC LIEBHERR LC 752	Ø 750 mm, Modul 10(16), širina 600 mm	1985
MODUL ZFWZ 1250/3	Ø 1250 × 800 mm / Modul 16, stalen	1978

TECO Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG, tel. +49-2103-3682-0, faks +49-2103-3682-20/21  
e-mail: teco-werkzeugmaschinen@megabit.net, www.teco-germany.com



## Osebnosti vesti

### Personal Events

#### Doktorati, magistreriji, specializacije, diplome

##### DOKTORATI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani so z uspehom zagovarjali svoje doktorske disertacije, in sicer:

*dne 11. junija 2002: mag. Drago Bračun*, doktorsko disertacijo z naslovom: "Meritev oblike teles na osnovi laserske triangulacije";

*dne 13. junija 2002: mag. Mojca Noč Razinger*, doktorsko disertacijo z naslovom: "Adaptivno krmiljenje rezalnega procesa";

*dne 14. junija 2002: mag. Tomaž Kolšek*, doktorsko disertacijo z naslovom: "Modeliranje specifičnih oblik v hidravličnih pretočnih elementih" in

*dne 26. junija 2002: mag. Robert Kunca*, doktorsko disertacijo z naslovom: "Malociklična nosilnost tečine ležaja z utrjeno kotalno površino".

S tem so navedeni kandidati dosegli akademsko stopnjo doktorja tehničnih znanosti.

##### MAGISTERIJI

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani so z uspehom zagovarjali svoja magistrska dela, in sicer:

*dne 3. junija 2002: Miran Drole*, magistrsko delo z naslovom: "Energetska bilanca občine Tolmin";

*dne 5. junija 2002: Matej Grm*, magistrsko delo z naslovom: "Napetostne in deformacijske razmere v rebričastem jermenu pri prehodu preko jermenice" ter **Matej Grm**, magistrsko delo z naslovom: "Izvedba masne skale" in

*dne 7. junija 2002: Davorin Kramar*, magistrsko delo z naslovom: "Izbira postopkov konturnega rezanja ploščatih izdelkov".

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru sta z uspehom zagovarjala svoji magistrski deli, in sicer:

*dne 14. junija 2002: Janja Zupančič*, magistrsko delo z naslovom: "Zanesljivost in varnost rektifikacijske kolone" in

*dne 19. junija 2002: Peter Meža*, magistrsko delo z naslovom: "Projektni management in industrijski grozdi".

S tem so navedeni kandidati dosegli akademsko stopnjo magistra tehničnih znanosti.

##### SPECIALIZACIJE

Na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru je z uspehom zagovarjal svoje specialistično delo:

*dne 11. junija 2002: Janez Žlak*, z naslovom: "Izkoriščanje toplote dimnih plinov kotlarne Toplotne oskrbe Maribor".

S tem je navedeni kandidat dosegel akademsko stopnjo specialista.

##### DIPLOMIRANISO

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

*dne 27. junija 2002: Marko BUTALA, Miloš PEGAN, Jernej PERNE, Franci PeTKOVŠEK, Tomaž SKUBIC;*

*dne 28. junija 2002: Andraž RANT, Peter Rihard SCHWARZBARTL, Tomaž SEDEJ, Goran STANOJEVIĆ.*

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

*dne 27. junija 2002: Stanko GOJKOŠEK, Aljoša PODOJSTERŠEK, Barbara SENEGAČNIK-JAKOVAC.*

\*

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

*dne 27. junija 2002: Matjaž BOGATAJ, Aleš BRENCI, Zvonko ERŽEN, Drago FRUHVIRT, Janez HOJS, Jožef JERIČ, Silvo JESENEK, Jožef KOLENC, Dušan MESNER, Anton OZEBEK, Janez PRIMIK, Marjan REBERNIK, Mitja ROBEK, Rebeka SREBOTNIK, Dušan UNGER, Tomaž VAUHNİK, Hinko ZUPANC, Franc ŽABERL.*

\*

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

*dne 27. junija 2002: Milan HLADE, Marko POPIČ, Anton TUMPEJ, Vojko VERŠNIK, Anton ZDOLŠEK.*

## Navodila avtorjem

### Instructions for Authors

Članki morajo vsebovati:

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

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

#### Vsebina članka

Članek naj bo napisan v naslednji obliki:

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

#### Oblika članka

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

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

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

#### Enote in okrajšave

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

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

Papers submitted for publication should comprise:

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

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

#### The format of the paper

The paper should be written in the following format:

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

#### The layout of the text

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

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

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

#### Units and abbreviations

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

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

### Slike

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

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

Vse označbe na slikah morajo biti dvojezične.

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

### Preglednice

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

Vsi podnaslovi preglednic morajo biti dvojezični.

### Seznam literature

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

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

### Podatki o avtorjih

Članku priložite tudi podatke o avtorjih: imena, nazive, popolne poštno naslove, številke telefona in faksa ter naslove elektronske pošte.

### Sprejem člankov in avtorske pravice

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

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

Rokopisi člankov ostanejo v arhivu SV.

Vsa nadaljnja pojasnila daje:

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

### Figures

Figures must be cited in consecutive numerical order in the text and referred to in both the text and the caption as Fig. 1, Fig. 2, etc. Figures may be saved in any common format, e.g. BMP, GIF, JPG. However, the use of CDR format (CorelDraw) is recommended for graphs and line drawings, since vector images can be easily reduced or enlarged during final processing of the paper.

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

All figure captions must be bilingual.

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

### Tables

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

All table captions must be bilingual.

### The list of references

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

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

### Author information

The following information about the authors should be enclosed with the paper: names, complete postal addresses, telephone and fax numbers and E-mail addresses.

### Acceptance of papers and copyright

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

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

Papers will be kept in the archives of the JME.

You can obtain further information from:

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